الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جـــامعـــة محمد الصديق بن يحي- جيجل-
Université Mohammed Seddik Benyahia –Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : des Sciences de la Terre et de l'Univers

كليـة عـــلوم الطـبيعـة و الحـــياة
قســـم : علوم الأرض و الكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Géologie**

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

Valorisation d'un déchet agricole dans la stabilisation des sols

Membres de Jury
Présidente : Mme YELLAS Chahra
Examinatrice : Mme BOUROUDI Nihed
Encadrants : Pr BENZAID Riad
Dr. TEKKOUK Mustapha

Présenté par :

REBIAI DouniaMey

Année Universitaire 2019-2020

Numéro d'ordre (bibliothèque) :……..…..

Remerciement

Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que je dois à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici mes vifs respects et ma profonde gratitude.

Un grand merci à ***Mr. GUELATI*** *directeur des laboratoires aux seins du* ***Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) Alger****, de m'avoir intégré dans l'ensemble de la société, à* ***Melle. SEDIK*** *chargé d'études au* ***Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) Alger****, qui m'a suivi tout au long de ma recherche.*

Je remercie toute l'équipe du ***Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) Alger*** *et tous mes collègues pendant la période du stage plus particulièrement* ***Mr. BADIS*** *et* ***Mr. BOUDALI*** *Pour leur disponibilité permanente et leur soutien au cours de mon stage Je ne pourrais oublier leur conseil qui m'ont été d'une grande utilité.*

Je les remercie également pour leur aide apportée dans la réalisation de mon Projet de Fin d'Etude tout en me laissant une grande autonomie et en prenant note de mes opinions.

Je remercie LCTP dans sa globalité, pour l'expérience qu'il m'a apportée.

J'exprime mes sincères remerciements à ***Mr. WEDJHANI FOUAD*** *directeur de l'entreprise* ***SOALKA SPA*** *ainsi que tout le personnel de l'entreprise pour la procuration du kaolin.*

Un vifs remercîments à la présidente du jury ***Mme YELLAS CHAHRA*** *; vous nous faite l'immense honneur de présider notre soutenance et d'accepter d'examiner notre travail et de l'enrichir avec vos propositions.*

Votre compétence professionnelle incontestable ainsi que vos qualités vous valent l'admiration et le respect de tous.

Je remercie également le membre de jury ***Mme BOUROUDI NIHAD*** *vous nous faites l'immense honneur de siéger au sein de notre jury, nous vous remercions pour l'intérêt que vous portez a notre travail ainsi que votre disponibilité.*

Qu'il me soit permis de vous exprimer ici toute ma gratitude et mon estime.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire ***Pr. RIAD BENZAID*** *Pour m'avoir aidé, soutenue et surtout encouragée a donné le meilleur de moi-même.*

Pour avoir consacré votre temps et votre énergie pour me transmettre vos connaissance afin d'enrichir mon mémoire.

Sans oublier votre dévouement infini, gentillesse et votre disponibilité et patience durant tout le période de préparation malgré les difficultés dues à la crise sanitaire.

Durant mon cursus universitaire j'admirais vos qualités et compétences, j'espère que vous puissiez trouver travers ce mémoire le reflet de vos efforts.

Vous êtes et vous serez pour moi l'exemple dans l'exercice de ma profession.

*Un humble remercîment au **Dr. MUSTAPHA TEKKOUK** mon Co-directeur de mémoire qui m'a transmis une partie de son savoir. J'ai particulièrement apprécié la pertinence de ses conseils, de ses commentaires et ses encouragements pour mener cette recherche.*

*Sans oublier **Melle. BERDI INES** et **Melle. IMANE IDOUI** pour leurs aides et leurs encouragements.*

Enfin je tiens à exprimer mes sincère remercîment a tous les professeurs du département des sciences de la terre et de l'univers (université de Jijel) qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenue dans la poursuite de mes études.

Dédicaces

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez fourni pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puis Dieu, tout haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MA CHERE SŒUR ET BEAU-FRERE,

Mes conseillers fidèles, qui m'ont assisté dans les moments difficiles, qui étaient là pour moi malgré tout, qui ne cessent de m'aider à traverser les épreuves les plus difficiles et qui ont eu un rôle majeur dans la réalisation de ce mémoire

Je vous suis très reconnaissante, et je ne vous remercierai jamais assez pour votre amour, votre générosité, votre précieuse aide et vos encouragement qui me poussent vers l'avant.

À MA TRES CHERE TANTE

Le symbole de la femme forte, qui m'a accueilli en cette période difficile de crise sanitaire, pour son soutien moral, son encouragement, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet, elle a tout fait pour que je réussisse et je lui dois toute mon éternelle reconnaissance.

A MES FRERES ET SŒURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protégé et vous garde.

À MA TRES CHERE GRAND-MERE, MES CHERS TONTONS, FAMILLE ET MES AMIS

Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPE A L'ELABORATION DE CE TRAVAIL A TOUS CEUX QUE JE N'AI PU CITER.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : VALORISATION DES DÉCHETS POUR LA STABILISATION DES SOLS

1.1. Introduction 2
1.2. Techniques de stabilisation 2
1.3. Revue de littérature 3
1.3.1. Stabilisation des sols avec des déchets industriels 3
1.3.2. Stabilisation des sols avec des déchets commerciaux 5
1.3.3. Stabilisation des sols par des déchets agricoles 6
1.4. Conclusion 8

CHAPITRE2 : MINÉRALOGIE DES ARGILES

2.1. Introduction 9
2.2. Les minéraux argileux 9
2.2.1. Disposition des ions oxygène 11
2.2.2. Les substitutions des cations dans les feuillets octaédriques 12
2.2.3. Structure des minéraux argileux 12
2.3. Différents types des minéraux argileux 13
2.3.1. La kaolinite 13
2.3.2. La halloysite 14
2.3.3. La montmorillonite 14
2.3.4. L'illite 15
2.3.5. Le chlorite 15
2.3.6. La vermiculite 16
2.3.7. L'attapulgite 16
2.4. Stabilité de l'ensemble de la structure 17
2.5. Surface spécifique 17
2.6. Interaction entre l'eau et les minéraux argileux 18
2.6.1. De quelle façon l'eau peut-elle être adsorbée à la surface d'une particule argileuse 18
2.6.2. Coefficient d'activité 19
2.7. Le rôle de l'eau 19
2.8. Orientation des particules fines 20
2.9. imperméabilités des argiles 21
2.10. Le phénomène de gonflement des argiles 21
2.10.1. La kaolinite 22
2.10.2. La montmorillonite 22
2.10.3. L'illite 22
2.11. Signification du retrait et du gonflement pour l'ingénieur 23
2.12. Critères indirecte du gonflement 23
2.12.1. Indice de gonflement libre IG 23
2.12.2. Classification de l'aptitude au gonflement en fonction de l'indice de retrait IR 24
2.12.3. Classification de l'aptitude au gonflement en fonction de l'indice de plasticité IP 24
2.13. Les contraintes dues au gonflement des sols 24
2.14. Relation entre le gonflement et l'affaissement 25
2.15. Cas particuliers des argiles gonflantes 25

CHAPITRE 3 : ÉTUDE ÉXPERIMENTALE

3.1. Matériaux et démarche expérimentale 27

3.1.1. Kaolin KT2 de Tamazert 27
3.1.2. Bentonite 29
3.1.3. Les grignons d'olives 29
3.2. Programme expérimental 30
3.2.1. Poids volumique des grains solides γ_s (méthode au pycnomètre à eau NF P 94-054) 31
3.2.2. Détermination de la granulométrie par tamisage et sédimentation (NF P 94 056) et (NF P 94 057) 31
3.2.3. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051) 32
3.2.4. Détermination des caractéristiques Proctor (NF P94-093) 35
3.2.5. Détermination des caractéristiques de cisaillement du sol (NF P94-071-1) 38
3.2.6. Détermination des caractéristiques du CBR immédiat (NF P94-078) 40
3.3. Analyse et discussion des résultats obtenus 42
3.3.1. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg 42
3.3.2. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du compactage 43
3.3.3. Effet des grignons d'olives sur la résistance au cisaillement 44
3.3.4. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du CBR immédiat 44
3.4. Conclusion 45

CONCLUSION GENERALE 46
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE 48

Liste des figures

CHAPITRE 2

Figure 2.1. a) Tétraèdre de silice (d'après Grim 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim 1959) ; c) schéma du feuillet en tétraèdre de silice (d'après Lambe 1953) ; d) vue en plan du feuillet de silice (d'après Warshaw et Roy 1961). 10

Figure 2.2. a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim 1959) ; c) schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Lambe 1953) ; d) vue en plan du dessus du feuillet en octaèdre (d'après Warshaw et Roy 1961). 10

Figure 2.3. Disposition des ions oxygène 11

Figure 2.4. L'empilement des plans compact et hexagonal formant des tétraèdres et des octaèdres 11

Figure 2.5. Représentation schématique d'une unité structurale 12

Figure 2.6. Schéma de la structure de la kaolinite (d'après Lambe 1953) 13

Figure 2.7. Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (d'après Grim 1959) 13

Figure 2.8. Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe 1953) 14

Figure 2.9. Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (d'après Grim 1959) 15

Figure 2.10. Schéma de la structure de l'illite (d'après Lambe 1953) 16

Figure 2.11. Schéma de la structure de la chlorite (d'après Mitchell 1976) 16

Figure 2.12. Schéma d'une molécule d'eau (d'après Lambe 1953) 19

Figure 2.13. Divers états d'un sol 20

Figure 2.14. Schéma d'orientation des particules (d'après Lambe 1958) 21

Figure 2.15. Effet des déformations sur l'orientation des particules 21

Figure 2.16. Relation entre le gonflement et l'affaissement des argiles (Mitchell et Gardner 1975 et Gibbs 1969) 25

CHAPITRE 3

Figure 3.1. Le site d'exploitation du Kaolin d'El-Milia (Soalka SPA) 27

Figure 3.2. Kaolin KT2 utilisé dans la présente étude 28

Figure 3.3. Les constituants d'un grignon d'olive 30

Figure 3.4. Mesures du poids volumique des grains solides γ_s (NF P 94-054) 31

Figure 3.5. Analyse granulométrique et sédimentométrique du sol reconstitué. 32

Figure 3.6. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051) 32

Figure 3.7. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande du sol reconstitué de référence 33

Figure 3.8. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**2%** de grignons d'olives) 34
Figure 3.9. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**4%** de grignons d'olives) 34
Figure 3.10. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**6%** de grignons d'olives) 35
Figure 3.11. Détermination des caractéristiques Proctor (NF P94-093) 35
Figure 3.12. Courbe Proctor du sol reconstitué de référence 36
Figure 3.13. Courbe Proctor du sol traité avec **2%** de grignons d'olives 37
Figure 3.14. Courbe Proctor du sol traité avec **4%** de grignons d'olives 37
Figure 3.15. Courbe Proctor du sol traité avec **6%** de grignons d'olives 37
Figure 3.16. Détermination des caractéristiques de cisaillement du sol (NF P94-071-1) 38
Figure 3.17. L'essai de cisaillement direct sur le sol reconstitué de référence 39
Figure 3.18. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives 39
Figure 3.19. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives 39
Figure 3.20. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives 40
Figure 3.21. Essai CBR immédiat (NF P94-078) 40
Figure 3.22. L'essai CBR immédiat sur le sol reconstitué de référence 41
Figure 3.23. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives 41
Figure 3.24. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives 41
Figure 3.25. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives 42
Figure 3.26. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg 42
Figure 3.27. Effet des grignons d'olives sur la densité sèche maximale 43
Figure 3.28. Effet des grignons d'olives sur la teneur en eau optimale 43
Figure 3.29. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques de cisaillement 44
Figure 3.30. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du CBR immediat 44

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau 1.1. Techniques de stabilisation les plus utilisées 2

CHAPITRE 2

Tableau 2.1. Valeurs moyennes des dimensions relatives, des épaisseurs et des surfaces spécifiques des minéraux argileux les plus communs (d'après Young Warkentin 1975) 18

Tableau 2.2. Coefficient d'activité de différents minéraux (d'après Skempton 1953, et Mitchell 1976 19

Tableau 2.3. Aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de retrait 24

Tableau 2.4. Aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de plasticité 24

CHAPITRE 3

Tableau 3.1. Résultats de l'analyse chimique du Kaolin KT2 28

Tableau 3.2. Composition minéralogique du Kaolin KT2 28

Tableau 3.3. Analyse granulométrique du Kaolin KT2 28

Tableau 3.4. Quelques propriétés physico-chimiques de la Bentonite utilisée 29

Tableau 3.5. Programme expérimental réalisé 30

Tableau 3.6. Poids volumique des grains solides des différents échantillons du sol étudié 31

Tableau 3.7. Résultats des limites d'Atterberg du sol reconstitué de référence 32

Tableau 3.8. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **2%** de grignons d'olives 32

Tableau 3.9. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **4%** de grignons d'olives 32

Tableau 3.10. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **6%** de grignons d'olives 33

Tableau 3.11. Résultats de l'essai Proctor sur le sol reconstitué de référence 35

Tableau 3.12. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives 35

Tableau 3.13. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives 35

Tableau 3.14. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives 35

Tableau 3.15. Résultats de l'essai de cisaillement direct 38

Résumé

En Algérie, l'oléiculture connaît un essor considérable, la majeure partie est destinée à la production d'huile, en revanche l'extraction de l'huile dans les huileries algérienne génère d'importantes quantités de sous-produits connu sous le nom de grignons d'olive. Dans le cadre de la valorisation des déchets agricoles dans la stabilisation des sols et afin de réduire les couts des opérations de stabilisation, la construction de routes et protéger l'environnement, une étude expérimental sur l'effet des grignons d'olive sur les sols plastiques ou autrement dit « sol a problème » a été mener. Cette étude a pour but de déterminer les propriétés géotechniques d'un sol médiocre améliorées en utilisant les grignons d'olive avec diffèrent pourcentage (0%, 2%, 4% et 6%) effectuer sur diffèrent essais physique et mécanique.
A travers cette étude expérimentale, nous avons constaté qu'avec l'augmentation du pourcentage de grignons d'olive, l'indice de plasticité des sols traités diminue et les propriétés de résistance au cisaillement augmentent. Pour ces paramètres géotechniques, l'ajout de 6% de grignons d'olive peut être considéré comme une valeur optimale. D'autre part, la densité sèche maximale la plus élevée et la valeur de teneur en eau optimale la plus basse ont été obtenues pour l'addition de 2% en poids de grignons d'olive. Dans l'ensemble, on peut conclure que le grignon d'olive peut être considéré comme une solution écologique et économique pour le traitement des sols argileux dans les régions en voie de développement.

Abstract

In Algeria, oleoculture is booming, most of it is destined to the production of oil, while the extraction of oil in Algerian oil mills generates large quantities of by-products known as olive pomace. Within the framework of the valorization of agricultural waste in soil stabilization and in order to reduce the costs of stabilization operations, road construction and to protect the environment, an experimental study on the effect of olive pomace on plastic soil or in other words "problem soil" has been carried out. This study aims to determine the engineering and geotechnical properties of a poor soil improved by using olive pomace with different percentages (0%, 2%, 4%, and 6%) carried out on different physical and mechanical tests.
Through this experimental study, we observed that with the increase in the percentage of olive pomace, the plasticity index of the treated soils decreases and the shear resistance properties increase. For these geotechnical parameters, the addition of 6% olive pomace can be considered an optimal value. On the other hand, the highest maximum dry density and the lowest optimum water content value were obtained for the addition of 2% by weight of olive pomace. Overall, it can be concluded that olive pomace can be considered as an ecological and economical solution for the treatment of clay soils in developing regions.

ملخص

في الجزائر تعرف زراعة الزيتون تطورا كبييرا، أغلبها موجة الزيت زيت الزيتون، بالمقابل استخراج زيت الزيتون في المعاصر الجزائرية يسفر عنه كميات كبيرة من منتوج ثانوي يعرف باسم ثفل الزيتون
في إطار تثمين المخلفات الزراعية واستعمالها لمعالجة التربة ولتقليص عمليات التثبيت، قمنا بدراسة تجريبية حول تأثير ثفل الزيتون على التربة الطينية .
الهدف من هذه الدراسة هو تحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة الطينية باستعمال ثفل الزيتون بنسب مختلفة (0%, 2% 4%, 6%) حيث قمنا بعدة تجارب فيزيائية وميكانيكية .
من خلال هذه الدراسة التجريبية وجدنا أنه مع زيادة نسبة ثفل الزيتون ، ينخفض مؤشر اللدونة للتربة المعالجة وتزداد خصائص مقاومة القص. بالنسبة لهذه الخصائص الجيوتقنية ، يمكن اعتبار إضافة 6٪ من ثفل الزيتون قيمة مثالية. من ناحية أخرى ، تم الحصول على أعلى كثافة جافة قصوى وأدنى قيمة محتوى مائي مثلى لإضافة 2٪ من ثفل الزيتون. بشكل عام ، يمكن استنتاج أن ثفل الزيتون يمكن اعتباره حلاً بيئيًا واقتصاديًا لمعالجة التربة الطينية في المناطق النامية.

INTRODUCTION GENERALLES

INTRODUCTION

La nécessité d'améliorer les propriétés techniques du sol est reconnue depuis que la construction existe. De nombreuses cultures anciennes, y compris les Chinois, les Romains et les Incas, ont utilisé diverses techniques pour améliorer l'adéquation des sols, dont certaines étaient si efficaces que de nombreux bâtiments et routes qu'ils ont construits existent encore aujourd'hui. Certains sont encore en usage.

L'ère moderne de la stabilisation des sols a commencé dans les années 1960 et 1970, lorsque les pénuries générales d'agrégats et de ressources en carburant ont forcé les ingénieurs à envisager des alternatives aux techniques conventionnelles de remplacement des sols pauvres sur les chantiers de construction par des agrégats expédiés qui possédaient des caractéristiques techniques plus favorables. La stabilisation des sols est alors tombée en disgrâce, principalement en raison de techniques d'application erronées et de malentendus.

Plus récemment, la stabilisation des sols est redevenue une tendance populaire grâce aux nouvelles méthodes adoptées mécanique qu’elle soit tel que les colonnes ballastées et l’inclusion rigide ou chimique (additif) tel que la chaux et le ciment ou bien mieux encore par recyclage de différents déchet de BTP ou d’agriculture, cette dernier bénéficie de deux avantages majeurs.

D’une part, les avantages financiers, le recyclage et la réutilisation des matériaux in situ permettent de réaliser des économies significatives, car ils minimisent le décapage et l'enfouissement des matériaux ainsi que leurs coûts de transport associés et économisent également sur l'importation de granulats.

D’autre part, la stabilisation des sols présente des avantages environnementaux importants par rapport aux méthodes de construction traditionnelles, notamment les économies d'énergie en réduisant le transport des matériaux, en minimisant l'utilisation des ressources en agrégats et en utilisant certains déchets et sous-produit industriels.

Notre travail repose sur l'idée de valoriser les déchets locaux à travers leurs réutilisations dans le domaine de la stabilisation des sols argileux ce qui peut assurer un développement durable dans les régions pauvres du pays à des coûts raisonnables.

Pour cette raison nous avons proposé d’utiliser les grignons d’olives, qui sont un déchet agricole disponible dans la région de Jijel, pour améliorer les caractéristiques physico-mécaniques des sols argileux.

CHAPITRE 1

VALORISATION DES DÉCHETS POUR LA STABILISATION DES SOLS

1.1. Introduction

La stabilisation du sol a pour objet essentiel, de rendre ce matériau moins sensible aux variations de la teneur en eau et de l'empêcher, à la fois de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'action de l'humidité.

La stabilisation sert aussi à améliorer les propriétés physiques (texture, granulométrie), chimiques ou mécaniques du sol traité. Elle doit être compatible avec la conception de l'ouvrage concerné, la qualité du matériau, le coût du projet et la durabilité.

La stabilisation des sols a pour but d'améliorer le comportement mécanique de ces derniers ; améliorer les liaisons existantes entre les particules du sol (amélioration de la cohésion) ; et enfin réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité).

Aussi le choix d'une technique 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 liées à l'environnement.

1.2. Techniques de stabilisation

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, nous pouvons citer la stabilisation mécanique, la stabilisation thermique et la stabilisation chimique par additifs (Babouri, 2008) :

Tableau 1.1. Techniques de stabilisation les plus utilisées

Techniques	Procède	Principes
Stabilisation mécanique	Compactage	Une méthode mécanique très efficace et importante dans la stabilisation des sols fins, elle consiste à exercer une pression au sol par des charges qui permet de réduire les pores et augmenter la compacité.
	Drainage	Evacuer les eaux interstitielles ce qui accélère la consolidation.
	Substitution	Eliminer la couche de terre gonflante et de la remplacer par une terre non progressive (de meilleure qualité géotechnique).
Stabilisation thermique	Augmentation de température	Augmenter la température du sol afin d'améliorer sa résistance
Stabilisation chimique	Ajout ou additifs	Le mélange du sol avec des produits créent des réactions chimiques qui jouent le rôle d'un liant. Ce dernier a un effet positif sur la stabilisation des sols (amélioration de la cohésion et réduction de l'indice des vides du sol).

1.3. Revue de littérature

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et techniques ont été mis au point pour connaître l'influence de l'efficacité d'un ajout donné sur la stabilisation des sols instables et plus particulièrement les sols argileux. Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols (Bellabaci, 2014)

1.3.1. Stabilisation des sols avec des déchets industriels

- **Bille de polystyrène**

Pour étudier les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé (BPE) sur un sol léger stabilisé, des études en laboratoire ont été menées par Li et al. (2006) sur un sol sableux. Les teneurs en ciment été fixées à 20, 40, 60, 80 et 100 kg/m3. Les teneurs volumétriques en billes BPE ont été fixées à 33%, 50%, 60% et 67%. Les résultats ont fourni des relations quantitatives entre les propriétés physico-mécaniques du sol et la proportion du matériau stabilisant. Les auteurs ont remarqués une amélioration de la cohésion en fonction de la teneur en ciment et une augmentation considérable de la résistance à la compression simple en fonction du contenu volumétrique des BPE.

- **Poussière de céramiques**

Sabatb (2012) a utilisé la poussière de céramique comme stabilisant pour un sol expansif de provenance local, la poussière de céramique a été ajoutée progressivement de 5% à 30% avec un incrément de 5%. Les résultats obtenus ont montrés que la poudre de céramique est parfaitement efficace pour la stabilisation des matériaux de chaussée.

- **Déchets de briques démolis**

Anand Kumar et al. (2014) ont effectué une série de tests pour étudier l’effet des déchets de briques issues de la démolition (DBD) sur des sols cohésifs. Les échantillons de sol été mélangés avec des DBD à différentes proportions. Sur la base d'un test de compactage standard, la quantité optimale (appelée aussi seuil de saturation) du DBD s'est avérée être de l’ordre de 40%.

- **Fibres de verre**

Ayininuola et Balogun (2018) ont stabilisé un sol argileux par des fibres de verre en utilisant des pourcentages allant entre 0,4% à 3% avec un incrément de 0,4%. Les résultats obtenus ont montré l’efficacité de cet ajout dans la stabilisation à travers l’augmentation de la valeur CBR et la diminution de la densité sèche du sol traité. Par contre ils ont observé une augmentation de la teneur en eau optimale. La valeur de 1,6 % représente le seuil de saturation pour ce type d’ajout.

- **Poudrette de caoutchouc**

Abbas et Ben Ahmed (2014) ont utilisé la poudrette de caoutchouc issue des pneus usés dans la stabilisation d'un sol argileux gonflant avec les différents pourcentages (0% ,10% ,20% ,25% et 50%). La compagne expérimentale montre que la poudrette de caoutchouc a un effet positif montré par la diminution de gonflement,

- **Ciments et cendres volantes**

Amu et al. (2005) ont combiné le ciment et la cendre volantes pour modifier les propriétés des sols expansifs. Les résultats ont montré que l'échantillon de sol stabilisé avec un mélange de 9% de ciment plus 3% de cendres volantes été largement suffisant pour stabiliser un sol argileux expansif.

- **Laitier de haut fourneau granulé**

Santosh et Vishwanath (2015) ont montré que l'utilisation du mélange du laitier de haut fourneau granulé avec la cendre de balle de blé comme ajout stabilisant réduit la teneur en eau optimale, augmente la densité sèche et améliore également la résistance à la compression simple du sol traité. Les meilleurs résultats ont été enregistrés pour un méalnge de 9% de laitier de haut fourneau granulé et de cendre de balle de blé.

- **Laitier de haut fourneau**

Tarannum Khan et al. (2017) ont amélioré les propriétés géotechniques du coton noir par le laitier de haut fourneau. Une amélioration considérable marquée par la diminution du gonflement et l'augmentation de la résistance à la compression. Le pourcentage idéal de l'addition doit être entre 15 et 20%.

- **Déchet plastique**

Neopaney et al. (2012) ont stabilisé un sol argileux par des bandes de plastique coupées en différents format ayant une largeur de (10, 20, 30 et 40 mm) et une épaisseur de 40µM. Différents pourcentages ont été utilisé à savoir 0,0 ; 0.25 ; 0,5 et 1,0%. Les résultats des tests CBR ont démontré que l'introduction des déchets plastique dans les sols argileux avec des quantités appropriées amélioraient considérablement la résistance à la compression et le comportement vis-à-vis la déformation des sols traités.

- **Déchet de tapis recyclé**

Ghiassian et Poorebrahim (2004) ont présenté des résultats d'une recherche en laboratoire pour déterminer les effets des matériaux fibreux synthétiques sur l'amélioration des caractéristiques de résistance d'un sol sableux fin. Des essais triaxiaux ont montré clairement que les ajouts fibreux dérivés des déchets de tapis amélioraient la résistance au cisaillement des sables limoneux.

1.3.2. Stabilisation des sols avec des déchets commerciaux

- **Poudre de sciure de bois**

Nnochiri et al. (2017) ont canalisé leur recherche dans l'association de la sciure et la chaux pour améliorer les caractéristiques géotechnique d'un sol latéritique avec une variation de 2, 4, 6, 8 et 10% en poids de sol. Les résultats des tests ont montré que l'ajout d'un mélange de chaux et de sciure de bois augmentait la teneur en humidité optimale et diminuait la densité sèche maximale du sol traité. D'autre part, la résistance à la compression simple du sol traité été améliorée de manière optimale par l'ajout de 6% de mélange de sciure de bois et de chaux.

- **Cendre de bois**

Okagbue (2007) a évalué le potentiel de la cendre de bois à stabiliser un sol argileux avec des proportions variables de 5%, 10%, 15% et 20% en poids de sol. Les résultats ont montré que les paramètres géotechniques des sols argileux étudiés sont améliorés par l'ajout de 10% de cendre de bois. La plasticité a été réduite de 35% et le CBR et la résistance à la compression ont augmenté de 23 à 50% et de 49 à 67%, respectivement.

- **Coquilles d'œufs**

Oluwatuyi et al. (2018) ont stabiliser un sol argileux avec trois ajouts à savoir les coquilles d'œufs, le ciment et un mélange entre les deux avec une variation de 2%, 4%, 6% et 8%. La quantité optimale proposée est celle de 8% du mélange coquille d'œuf-ciment. Les résultats ont montré que l'ajout de 8% de ce mélange réduisait considérablement l'indice de plasticité et la densité sèche, mais augmentait la teneur en eau et la résistance à la compression du sol traité.

- **Polymères**

Rehab-Bekkouche et Boukhatem (2016) ont utilisé des polymères PVC et HDPE avec des pourcentages différents (0%, 3% et 6%) afin d'améliorer le comportement géotechnique des sols argileux. Les résultats de cette étude ont montré que l'ajout de PVC et de HDPE au sol argileux réduit ses limites d'Atterberg, son potentiel de gonflement et sa pression de gonflement, et augmente sa densité sèche maximale et ses valeurs CBR.

Rehab-Bekkouche et al. (2018) ont étudié le comportement d'un sol argileux renforcé avec des couches de polyéthylène translucide. C'est un polymère naturel biodégradable de haute performance développé pour les technologies de forage. Les résultats des tests ont montré que le potentiel de gonflement du sol argileux augmente à partir de 5% d'ajout de polymère.

- **Sels**

Hachichi et al. (2007) ont réalisé une étude sur deux sites proches de la ville d'Oran (nord-ouest de l'Algérie) qui ont un fort potentiel de gonflement. Le traitement des sols argileux était basé sur des sels (KCl, CaCl2, NaCl, Na2SO4, NH4Cl) avec différentes concentrations (0,05, 0,5, 1 et 2

moles/litre) et sur quatre types de polymères. Les résultats ont montré des diminutions significatives du gonflement jusqu'à 80% avec certains sels. Un accord parfait a été observé entre l'effet des sels sur le gonflement et la diminution de la plasticité des argiles, les meilleurs résultats ont été obtenus avec le sel de chlorure de potassium (KCl).

1.3.3. Stabilisation des sols par des déchets agricoles

- **Cendres de coquilles de noix de cajou**

Sharmila et al. (2018) ont ajouté 5, 10, 15, 20 et 25% de cendres de noix de cajou à leurs sol de coton noir (sol argileux) tout en maintenant un pourcentage de chaux à 5% pour tous les mélange utilisés. Les tests expérimentaux menés dans le cadre de cette recherche comprennent : les limites d'Atterberg, la gravité spécifique, le compactage Proctor standard, la résistance à la compression simple et le rapport de portance californien (CBR). Les auteurs ont constaté une augmentation des valeurs du CBR ainsi que celles de la résistance à la compression simple. D'autre part, les résultats obtenus ont montré qu'une combinaison de 20% de cendres de noix de cajou avec 5% de chaux est la meilleure proportion pour stabiliser la terre de coton noir.

- **Fibre de bambou**

Brahmachary et Rokonuzzaman (2018) ont utilisé des fibres de bambou naturel ayant respectivement un diamètre de 3 et 6 mm et une longueur de 10 et 20 mm pour stabiliser un sol argileux. La proportion de fibre de bambou été de 0,20 à 1,40 % avec un incrément de 0,2%. L'ajout de fibres de bambou a amélioré le comportement ductile du sol traité et a augmenté les valeurs CBR. Cette augmentation été significative avec un ajout de fibre de bambou de l'ordre de 1,2%.

- **Cendre de balle de blé**

Sharma et al. (2018) ont eu l'idée de traité un sol argileux gonflant avec la cendre de balle de blé (CBB) avec des pourcentages variables de 0, 3, 5, 7 et 9%. Sur différents essais, la résistance à la compression simple et le CBR, les résultats ont montré que la cendre de balle de blé joue un rôle d'un matériau stabilisant. L'ajout de 7 % a donné des résultats satisfaisants vis-à-vis la stabilisation de sols argileux.

- **Cendre de noix de coco :**

Yusuf et Zava (2018) ont mené une étude afin de diagnostiquer l'aptitude de la cendre de noix de coco (CNC) comme stabilisateur de sol routier. Le CNC a été ajoutée en pourcentage précis, allant de 0 à 20% en poids sec de sol par incréments de 2%. Les résultats ont montré que à la teneur optimale en CNC l'amélioration n'était pas suffisamment importante pour justifier son

utilisation comme stabilisateur isolé pour les sols supports et les matériaux de base. Pour de meilleures performances, la CNC doit être mélangée avec des stabilisateurs conventionnels.

- **Déchet d'olive brulé**

Attom et Al-Sharif (1997) ont montré que l'ajout de 2,5% en poids des déchets d'olives brûlées augmentera la résistance à la compression simple et la densité sèche maximale du sol traité, au-delà de cette valeur ces caractéristiques diminuent. D'autre part, l'ajout de 7,5% en poids de cendres d'olive minimise la pression de gonflement du sol traité. Les résultats des tests semblent prometteurs pour que ce matériau soit utilisé comme stabilisant et pour résoudre de nombreux problèmes liés à son accumulation.

- **Cendre d'épi de maïs**

Emeka (2018) a évalué l'effet de la cendre d'épi de maïs (CEM) sur un sol latéritique stabilisé à la chaux (le besoin optimal en chaux était de 10 %). Le CEM a ensuite été ajouté au sol stabilisé à la chaux dans des proportions variables de 2, 4, 6, 8 et 10 %. Les résultats ont montré que 4% de CEM peut être un bon complément à la chaux pour la stabilisation des sols latéritiques.

- **Fibre de bagasse**

Danso et al. (2015) ont étudié l'effet des fibres de bagasse de canne de sucre dans l'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux avec des proportions allant de 0,25 à 1 % de la masse du sol traité. Les auteurs ont proposé l'utilisation de 0,5 % de fibres de bagasse pour une meilleure performance de stabilisation des sols argileux.

- **Fibre de sisal**

Prabakar et Sridhar (2002) ont choisi la fibre de sisal comme matériau de renforcement, elle a été incluse dans le sol avec quatre pourcentages différents 0,25 ; 0,5 ; 0,75 et 1 % en poids de sol brut. Dans cette étude, quatre longueurs de fibres différentes ont été utilisées à savoir 10, 15, 20 et 25 mm. Les résultats ont montré que la fibre de sisal peut être considérée comme un bon matériau de renforcement des sols argileux.

- **Coque de noix de coco**

Athira et Ashish (2017) ont investigué l'efficacité du mélange de la poudre de coque de noix de coco et de chaux dans la stabilisation d'un sol expansif. Ils ont utilisé différents dosages de la poudre de coquille de noix de coco (0, 3, 6, 9 et 12%) et de chaux (3, 6 et 9%). A partir des résultats obtenus, les auteurs ont montré que le mélange de la poudre de noix de coco et la chaux à un effet favorable vis-à-vis l'amélioration des propriétés géotechniques des sols expansifs.

- **Résine naturelle**

Aksoy et Gor (2013) ont modifié les propriétés d'un sol non cohésif en utilisant la résine de l'astragale avec quatre pourcentages différents (0, 3, 5 et 10%) en poids de sol. Les auteurs ont

constaté que l'ajout de 1% de contenu en résine astragale été très pratique pour l'amélioration de la cohésion des sables.

- **Cendres de coque d'arachide et des déchets de fibres :**

Krishna et Beedi (2015) ont utilisé la cendre de coque d'arachide et des déchets de fibres de polypropylène dans la stabilisation des sols. Ils ont évalué l'effet de ces déchets sur la résistance au cisaillement et la résistance à la compression des sols traités. Le pourcentage de cendre de coque d'arachide était de 3, 6 et 9% et l'ajout en fibres de polypropylène varié de 0,05 % jusqu'à 0,15% avec un incrément de 0,05 %. Les résultats obtenus ont montré une augmentation considérable de la résistance au cisaillement et de la résistance à la compression des sols traités.

1.4. Conclusion

La valorisation des matières consiste en la réutilisation ou le recyclage de déchets ou sous-produits afin d'obtenir des matières réutilisables. Tous les procédés permettent de réaliser d'importantes économies de matières premières en plus d'un fort impact socio-écologique.

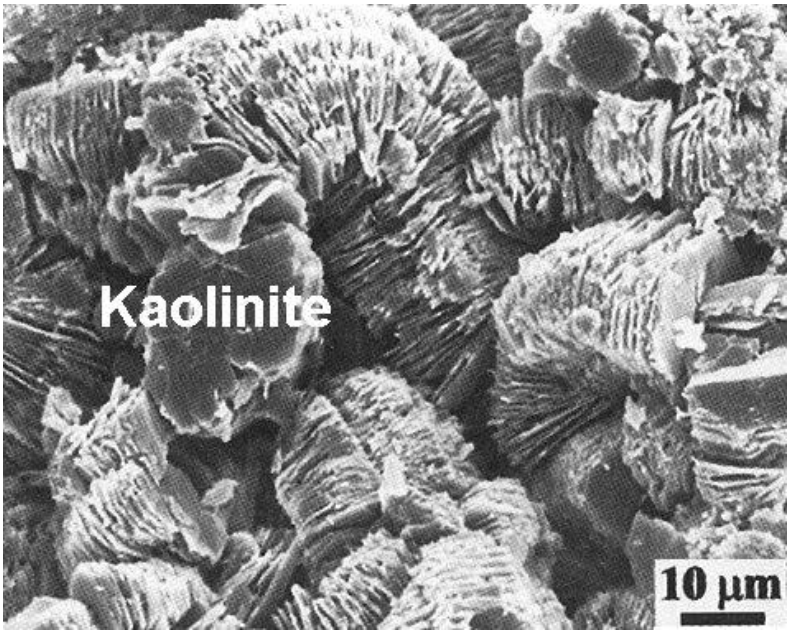
La stabilisation du sol consiste à modifier une ou plusieurs propriétés du sol faible ou mou, par des moyens physiques, mécaniques ou chimiques, pour créer un matériau de sol amélioré avec les propriétés techniques recherchées.

Notre démarche repose sur l'idée de valoriser les déchets locaux afin de les réutiliser dans le domaine de l'amélioration des propriétés géotechniques des sols et d'assurer un développement durable dans les régions pauvres du pays à des coûts raisonnables.

Pour cette raison nous avons tenté d'améliorer les caractéristiques physico-mécaniques d'un sol argileux en ajoutant des grignons d'olive avec différentes proportions.

CHAPITRE 2

MINÉRALOGIE DES ARGILES



2.1. Introduction

Le terme argile est actuellement utilisé dans trois sens différents granulométrique, minéralogique et pétrographique.

Au sens granulométrique, depuis Atterberg (1913) on donne le nom de fraction argileuse aux éléments fins de taille < à 2µ. On a ajouté plus tard une limite inférieure et la fraction argileuse est maintenant comprise entre 2 et 0,2µ. Ces valeurs varient quelque peu selon les auteurs et selon les pays, les extrêmes étant 5 et 0,1µ ; en dessous viennent les colloïdes, au-dessus les silts et limons. Les argiles sont aussi des minéraux appelés silicate d'alumine hydratée. Pour les pétrographes, les géologues et les géotechniciens, les argiles sont aussi des sols cohérents ou des roches sédimentaires terreuses, faisant pâte avec l'eau et ne présentant pas de stratification apparente ou en tout cas pas de schistosité.

Les minéraux argileux proprement dits sont soit simplement repris par érosion à partir des roches argileuses préexistantes ; soit formé par altération de minéraux ou roches antérieurs (micas, feldspath, verres volcaniques) ; soit enfin le produit de la transformation d'autres minéraux argileux (Gopal et Rao 2005, Budhu 2007, Bouafia 2013).

2.2. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leur origine de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Sur le plan chimique, ce sont des alumino-silicates hydratés ajoutés à d'autres ions métalliques. Tous les minéraux argileux sont de très petits cristaux colloïdaux (de diamètre inférieur à 1µm).

Les cristaux ressemblent à de minces plaques ou plaquettes, des études par diffraction de rayon X, ont permis d'établir que ces plaquettes sont un empilement de feuillets à structure atomique répétée. En réalité, il n'existe que deux types de feuillets de cristaux de base les feuillets en **tétraèdre** (ou de silice) et les feuillets en **octaèdre** (ou d'alumine). Leur constitution se différencie par le mode d'empilement de ces feuillets et par les divers liants et ions métalliques contenus dans le treillis cristallin (Costet et Sanglerat 1981, Costet et Sanglerat 1983).

Le feuillet en tétraèdre est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un atome unique de silicium (Figure 2.1).

Le feuillet en octaèdre est une combinaison d'unités octaédrique composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'autre élément (Figure 2.2).

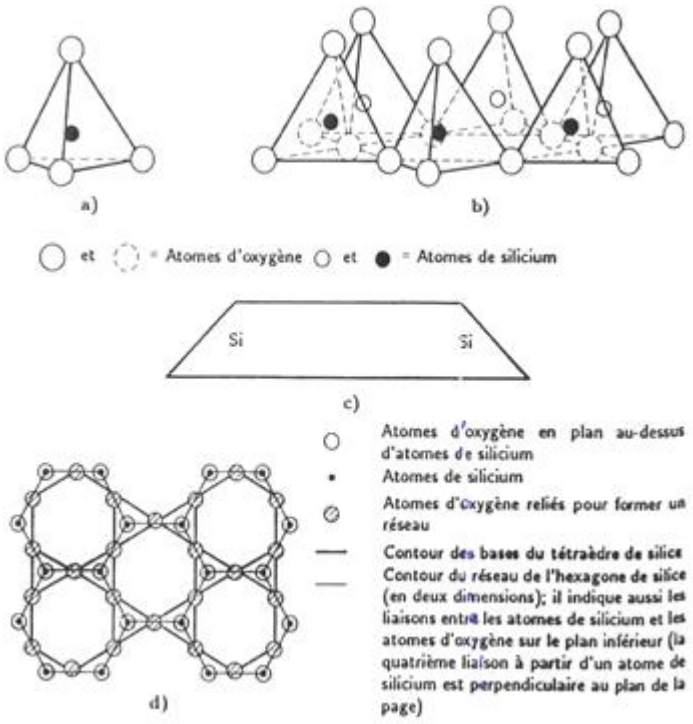


Figure 2.1. a) Tétraèdre de silice (d'après Grim 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim 1959) ; c) schéma du feuillet en tétraèdre de silice (d'après Lambe 1953) ; d) vue en plan du feuillet de silice (d'après Warshaw et Roy 1961).

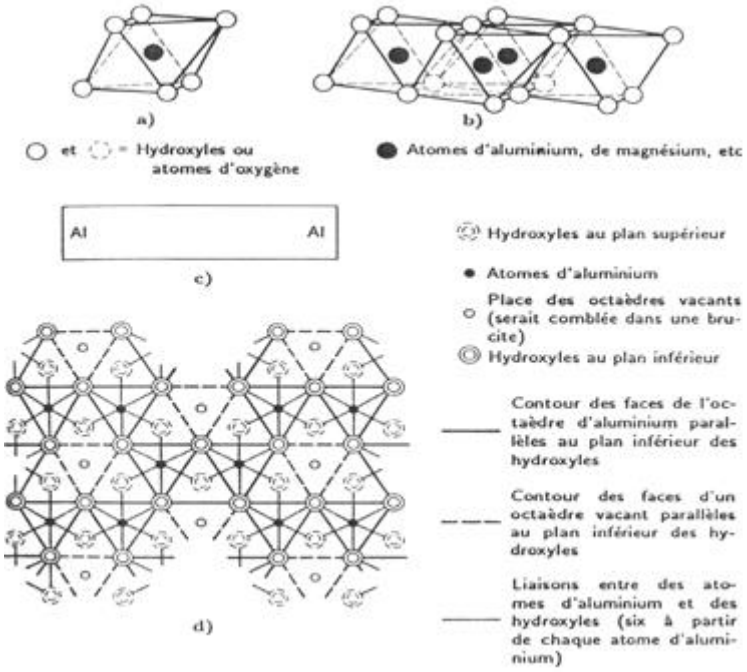


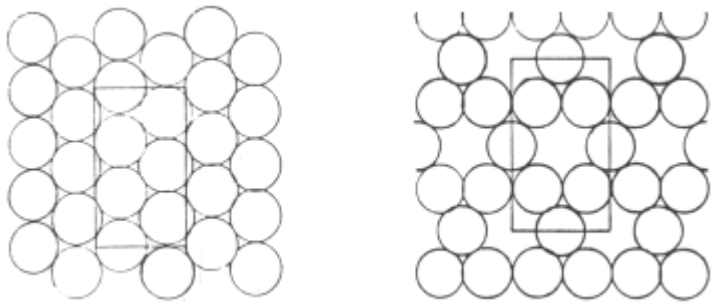
Figure 2.2. a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim 1959) ; c) schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Lambe 1953) ; d) vue en plan du dessus du feuillet en octaèdre (d'après Warshaw et Roy 1961).

2.2.1. Disposition des ions oxygène

Il existe deux arrangements, une valable pour les ions oxygène, les hydroxyles, les fluors. L'autre valable exclusivement pour les ions oxygène (Chelghoum 2006, Lérau 2006).

a) La première disposition "l'ensemble compacte" **:** les centres des atomes (l'atome à une forme de sphère) se situent sur des droites parallèles, décalées par rapport à la droite voisine d'un rayon ce qui constitue l'ensemble compacte (Figure 2.3a).

b) La deuxième disposition "l'ensemble hexagonale" **:** même disposition précédente en retirant une sphère sur deux (1/2) tous les deux rangs. Chaque cavité obtenue est limitée par six (06) sphères ce qui donne la forme d'un hexagone, c'est le plan hexagonal (Figure 2.3b).



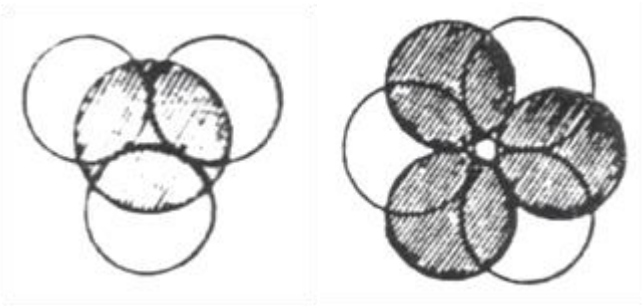
Ions : oxygène, hydroxyle, fluor
(le rectangle représente une maille)

a) couche compacte b) couche hexagonale

Figure 2.3. Disposition des ions oxygène

L'empilement des plans est tel qu'entre les éléments de deux plans superposés on peut isoler des groupes de (4) ou de (6) sphères empilées, dont les centres constituent les sommets d'un tétraèdre ou d'un octaèdre (Figure 2.4).

On obtient des **tétraèdres** on superposant un plan hexagonal et un plan compacte avec le diamètre des sphères du plan inférieur (plan hexagonal) > au diamètre des sphères du plan supérieur (plan compacte). On obtient des **octaèdres** on superposant deux plans compacts, voir les Figures 2.1, 2.2 et 2.4 (Costet et Sanglerat 1981, Costet et Sanglerat 1983).



a) Tétraèdre b) Octaèdre

Figure 2.4. L'empilement des plans compact et hexagonal formant des tétraèdres et des octaèdres

2.2.2. Les substitutions des cations dans les feuillets octaédriques

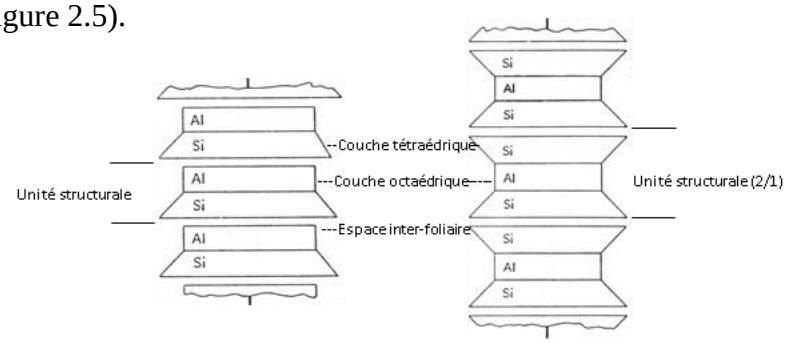
La substitution de différents cations dans le feuillet octaédrique est fréquente et elle est à l'origine de différents minéraux argileux. Lorsque les ions de rechange sont à peu près de la même dimension, on qualifie cette substitution d'isomorphe.

- lorsque tous les anions du feuillet octaédrique sont des hydroxyles et que les deux tiers (2/3) des positions cations sont occupées par atomes d'aluminium, on appelle ce minéral une **gibbsite**[1].
- si le magnésium remplace l'aluminium dans le feuillet et qu'il occupe la position cation on donne alors au minéral le nom de **brucite**[2].

Les variations de la structure en feuillet de base sont à l'origine de la douzaine de minéraux argileux identifiés jusque maintenant. Tous les minéraux argileux sont constitués de deux feuillets de base qui sont empilés d'une façon caractéristique et qui comportent certains cations dans les feuillets en tétraèdre et en octaèdre (Holtz et Kovacs 1991, Murthy 2002).

2.2.3. Structure des minéraux argileux

La structure des minéraux argileux se compose de **(a) plans** c'est les plans d'atomes ; **(b) couches** formées par l'empilement de plans associés (exemple : couche octaédrique et tétraédrique) ; **(c) feuillet** c'est un empilement articulé de couches ; **(d) espace inter-foliaire** c'est l'espace qui se trouve entre les feuillets, il peut être vide, mais le plus souvent il contient des cations sec ou humides (Hydratés), des groupes hydroxyles ou des couches d'hydroxydes ; **(e) unité structurale** c'est l'association d'un feuillet et d'un espace inter-foliaire. Un feuillet peut être du type (1/1) composé d'une couche tétraédrique et une couche octaédrique, ou bien du type (2/1) composé d'une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques (Figure 2.5).



a) feuillet 1/1 b) feuillet 2/1

Figure 2.5. Représentation schématique d'une unité structurale

[1] La **gibbsite** est une espèce minérale de formule chimique $Al(OH)_3$ avec des traces de Fe et Ga. C'est un important minerai d'aluminium et l'un des trois minéraux qui constituent la bauxite avec la boehmite AlO(OH) et le diaspore AlO(OH). *C'est un minéral secondaire, résultant de l'altération des silicates d'aluminium, que l'on rencontre dans les gisements de bauxite et dans les latérites* (Réf : Wikipédia).

[2] La **brucite** est le corps chimique minéral naturel composé ionique des cations magnésium Mg^{2+} et des anions hydroxyles OH^-, soit l'hydroxyde de magnésium de formule chimique $Mg(OH)_2$.
C'est un minéral secondaire produit par l'altération hydrothermale de la serpentine ou de la magnésite. On trouve généralement la brucite en veines à l'intérieur de la serpentine et de la magnésite. Ce minéral est susceptible de se diviser et peut se débiter en minces feuillets flexibles mais non élastiques comme les micas (Réf : Wikipédia).

2.3. Différents types des minéraux argileux

2.3.1. La kaolinite

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). A cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base, on considère la kaolinite comme un **minéral argileux 1:1** (Figure 2.6). Les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche, comme le montre la Figure 7 cette couche à une épaisseur d'environ 0,72 µm et elle s'étend indéfiniment dans les deux autres directions (McCarthy 2007).

Les couches de base successive sont maintenues ensemble par les liens d'hydrogène entre les hydroxyles du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Les liens d'hydrogène étant très forts, ils empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grandes dimensions. Un cristal de kaolin peut être constitué d'une succession de 70 à 100 couches (Holtz et Kovacs 1991).

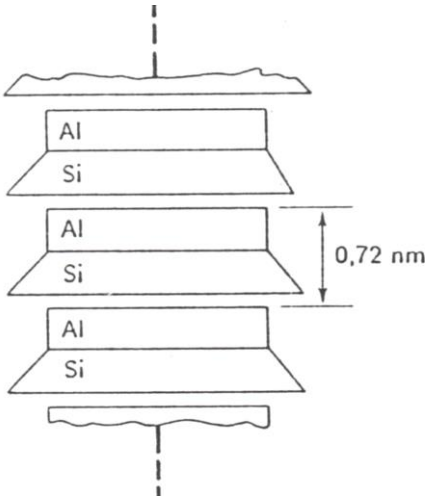


Figure 2.6. Schéma de la structure de la kaolinite (d'après Lambe 1953)

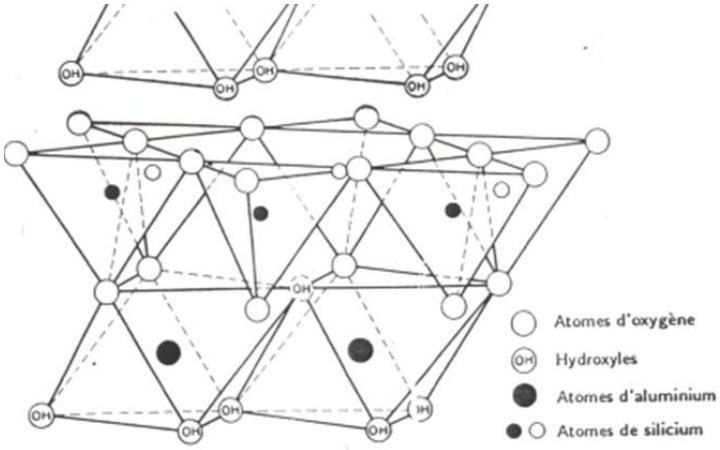


Figure 2.7. Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite (d'après Grim 1959)

2.3.2. La halloysite

C'est un minéral 1:1 semblable à la kaolinite. Elle présente toutefois une hydratation entre les couches et celle-ci est à l'origine de la distorsion ou de l'empilement aléatoire des plaquettes cristallines. Elle a par conséquent, une forme tubulaire.

Suivant un processus irréversible, l'eau peut facilement être chassée d'entre les couches, sous l'effet de la chaleur ou la dessiccation. Autrement dit, la Halloysite ne sera pas réhydratée en présence d'eau.

2.3.3. La montmorillonite

Par fois appelée **smectite**, c'est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite) Figure 2.8. La montmorillonite est désignée comme un minéral 2:1. Le feuillet en octaèdre se trouve entre deux feuillets de silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former q'une seule couche comme à la Figure 2.9. L'épaisseur de chaque couche 2:1 est d'environ 0,96 µm, ces couches peuvent se prolonger indéfiniment dans les deux autres directions.

Bien que les cristaux de montmorillonite puissent être très petits, ils ont une forte affinité avec l'eau; lorsque leur teneur en eau augmente les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflant. Les pressions de gonflement qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et aux pavages ou plateformes.

Les forces qui soudent les sommets des feuillets de silice sont faibles, cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans le feuillet en octaèdre. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches.

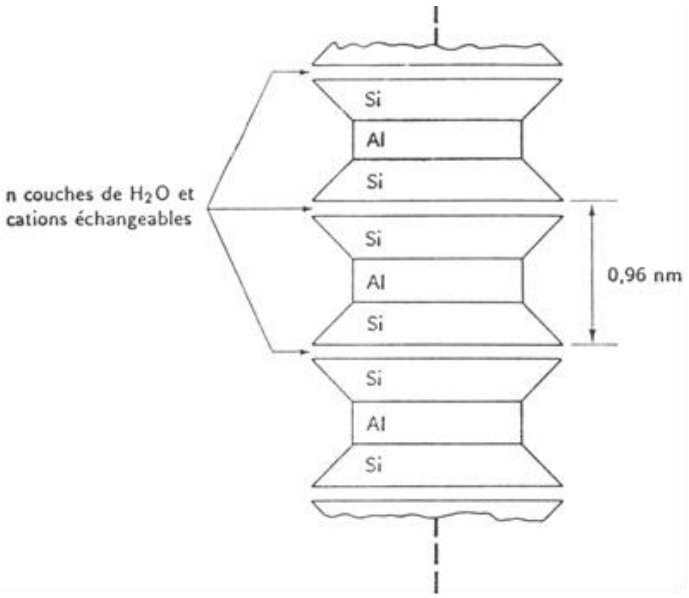


Figure 2.8. Schéma de la structure de la montmorillonite (d'après Lambe 1953)

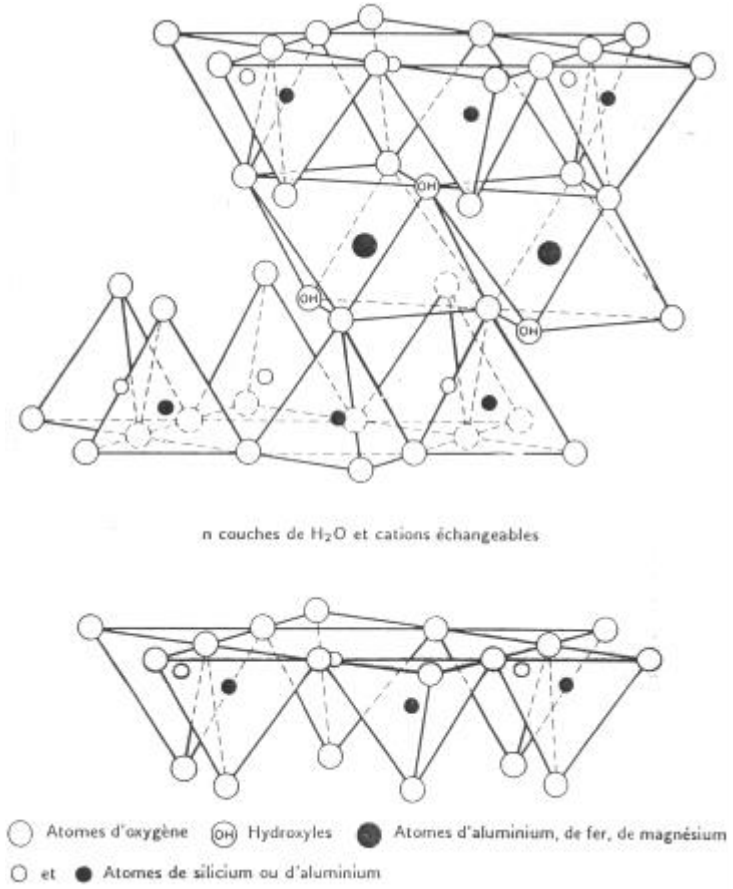


Figure 2.9. Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite (d'après Grim 1959)

2.3.4. L'illite

C'est une autre composante importante des sols argileux. Comme la montmorillonite elle à une structure 2:1, dans son cas, cependant, les espaces entre les couches sont reliées par un atome de Potassium. Le diamètre du trou hexagonal qu'on a remarqué dans le feuillet de silice correspond exactement à l'atome de potassium qui, en le comblant, crée un lien très fort entre les couches Figure 2.10. On peut aussi rencontrer dans le feuillet de silice certaines substitutions isomorphes de silicium par l'aluminium.

2.3.5. La chlorite

Relativement fréquente dans les sols argileux; elle est constituée d'une répétition des couches suivantes : un feuillet de silice - un feuillet d'aluminium - un autre feuillet de silice et finalement un feuillet de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg), Figure 2.11.

On pourrait la considérer comme un minéral 2:1:1 la chlorite peut aussi comporter plusieurs substitutions isomorphes et dans certains cas, perdre une couche de brucite ou de gibbsite. Etant

donné que l'eau peut pénétrer entre les couches, la chlorite peut être gonflante ; elle n'est cependant pas aussi active que la montmorillonite.

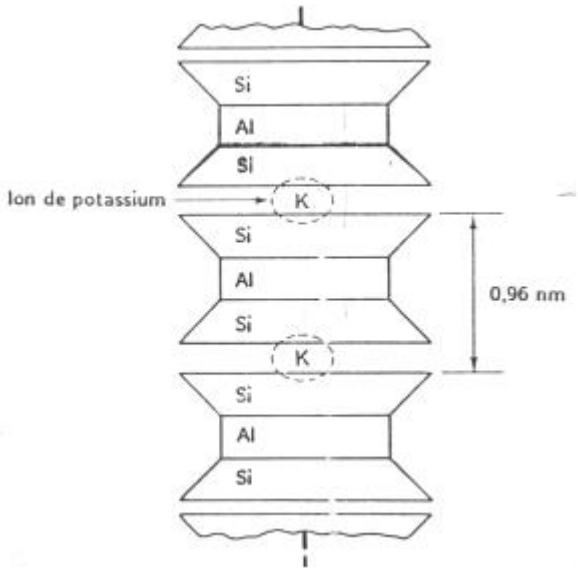


Figure 2.10. Schéma de la structure de l'illite (d'après Lambe 1953)

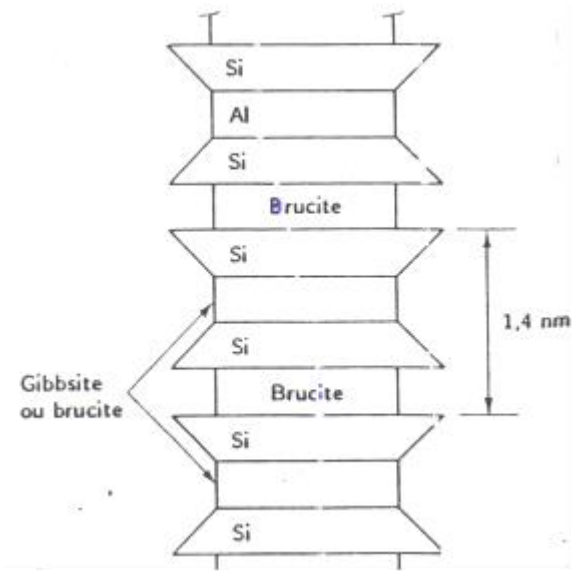


Figure 2.11. Schéma de la structure de la chlorite (d'après Mitchell 1976)

2.3.6. La vermiculite

C'est un minéral 2 :1 semblable à la montmorillonite, mais qui ne comporte que deux espaces d'eau entre les couches. Lorsqu'on la fait sécher à des températures élevées pour en éliminer l'eau, la vermiculite expansée devient un excellent isolant thermique.

2.3.7. L'attapulgite

C'est un autre minéral argileux qui n'a pas de structure en feuillet ; elle est constituée d'une chaîne de silicates et a, par conséquent, la forme d'une aiguille ou d'une tige.

2.4. Stabilité de l'ensemble de la structure

Les sphères que nous venons de considérer matérialisent des ions oxygènes, des hydroxyles ou des ions fluor, sont des éléments chargés négativement, qui ont tendance à se repousser. Ce qui implique que la stabilité de l'ensemble est assurée par des charges positives constituées par des ions loger dans les cavités décrites précédemment.

On se rend compte aisément que la cavité existante à l'intérieur des quatre (4) oxygènes forment un tétraèdre est plus petite que la cavité octaédrique. On peut trouver entre deux plans hexagonaux (juxtaposé) des cavités hexagonales superposées (limitée de 12 atomes d'oxygène). On peut ainsi imaginer que la charpente formée par l'assemblage va jouer le rôle d'un crible et que seuls les éléments positifs, ayant un diamètre correspondant à une certaine dimension, sont susceptibles d'être situés au centre d'un assemblage ou d'un autre (Philipponnat et Hubert 2003).

2.5. Surface spécifique

C'est le rapport entre la surface d'un solide et sa masse ou son volume. En terme de volume, elle est exprimée comme suit : surface spécifique = surface / volume. On peut démontrer la signification physique de surface spécifique à l'aide :

- d'un cube de 1x1x1cm : surface spécifique = 6 ($1cm^2$) / $1cm^3$ = 6 / cm = 0,6/mm.
- si le cube à un côté de 1mm, la surface spécifique sera de : 6 ($1mm^2$) / $1mm^3$ = 6/mm.
- si le cube à un côté de 1µm, la surface spécifique sera de : 6 ($1\mu m^2$) / $1\mu m^3$ = 6/µm = 6000/mm.

Ces trois valeurs soulignent le fait que les plus grosses particules ont des surfaces spécifiques plus petites que les plus petites particules qu'elles soient cubiques ou sphériques.

Pour exprimer la surface spécifique en terme de masse, il suffit de diviser la valeur en volume par la masse volumique de grains solides (γ_s), les unités seront alors des (m^2/g) ou (m^2/kg). La surface spécifique est inversement proportionnelle à la dimension des grains d'un sol.

En partant du principe de la surface spécifique, on peut s'attendre à ce que les teneurs en eau des sols à grains fins soient plus élevées que celles des sols à grains grossiers, lorsque tous les autres factures, tels l'indice des vides et structure, sont identiques, Tableau 2.1 (Philipponnat et Hubert 2003).

Tableau 2.1. Valeurs moyennes des dimensions relatives, des épaisseurs et des surfaces spécifiques des minéraux argileux les plus communs (d'après Young Warkentin 1975)

Vue en coupe	Epaisseur type (nm)	Diamètre type (nm)	Surface spécifique (km^2 / kg)
Montmorillonite	3	100 – 1000	0,8
Illite	30	10000	0,08
Chlorite	30	10000	0,08
Kaolinite	50 – 2000	300 – 4000	0,015

2.6. Interaction entre l'eau et les minéraux argileux

Dans la nature, il semble que les particules argileuses soient à peu près toujours hydratées, autrement dit, on trouve des couches d'eau autour de chaque cristal d'argile. On appelle cette eau « eau adsorbée », la structure des sols argileux et leurs propriétés géotechniques dépendent en définitive de la nature de cette couche d'eau adsorbée.

2.6.1. De quelle façon l'eau peut-elle être adsorbée à la surface d'une particule argileuse ?

On sait que l'eau est une molécule dipolaire (Figure 2.12), même si elle est électriquement neutre, elle a deux centres de charge distincts, l'un positif (+) et l'autre négatif (-). Par conséquent, la molécule d'eau subite une attraction électrostatique ver la surface du cristal d'argile. De plus, l'eau est retenue au cristal d'argile par un lien d'hydrogène, (l'hydrogène de l'eau est attiré par les atomes d'oxygène ou d'hydroxyle à la surface de l'argile). Enfin, les cations présents dans l'eau sont attirés par les charges négatives (-) à la surface de l'argile. L'attraction de l'eau est très forte près de la surface et diminue à mesure que l'on s'éloigne. Il semble que les molécules d'eau tout près de la surface soient maintenues solidement tout en étant fortement orientées.

La charge négative à la surface du cristal d'argile provient à la fois de la substitution isomorphe évoquée précédemment et de certaine imperfection dans le treillis du cristal, notamment près de la surface. Etant donné que le cristal à naturellement tendance à être électriquement neutre, les cations de l'eau peuvent facilement être attirés par l'argile, selon l'intensité des charges négatives (-) en présence (Holtz et Kovacs 1991).

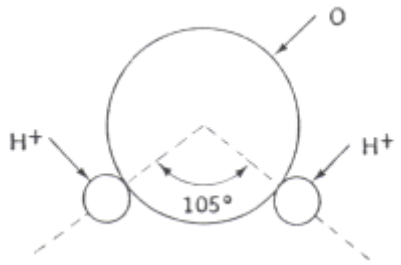


Figure 2.12. Schéma d'une molécule d'eau (d'après Lambe 1953)

2.6.2. Coefficient d'activité

En1953, Skempton a défini le coefficient d'activité A d'une argile de la façon suivante :

$$A = \frac{IP}{FRACTION\ \ ARGILEUSE}$$ = (indice de plasticité / masse des particules inférieures à 2 μm).

Les argiles qui ont un coefficient d'activité d'environ 1 ($0,75 < A < 1,25$) sont considérées comme normales.

- si A < 0,75, elles sont dites **inactives**.
- si A > 1, 25, elles sont dites **actives**.

Le coefficient d'activité est utile dans certains systèmes de classification ; de plus, on a constaté une relation plus ou moins bonne entre le coefficient d'activité et le type de minéral argileux. Cette corrélation est montrée au tableau suivant (Fang 1991, Dysli 1997, Das 2006) :

Tableau 2.2. Coefficient d'activité de différents minéraux (d'après Skempton 1953, et Mitchell 1976)

Minéral	Activité
Montmorillonite de sodium	4 – 7
Montmorillonite de calcium	1,5
L'illite	0,5 – 1,3
kaolinite	0,3 – 0,5
Halloysite (déshydratée)	0,5
Halloysite (hydratée)	0,1
Attapulgite	0,5 – 1,2
Mica	0,2
Calcite	0,2
Quartz	0

2.7. Le rôle de l'eau

La phase liquide du sol (c.à.d. l'eau) joue son rôle dans la formation des pâtes colloïdales. En effet, l'eau peut s'intercaler plus ou moins entre les particules argileuses. Selon son interaction avec les particules solides du sol, l'eau peut être classée en quatre catégories :

L'eau de cristallisation : qui résulte de la combinaison chimique de deux radicaux oxhydryles (-OH). Cette eau est proprement incorporée à la structure minérale. Elle joue un rôle dans les techniques céramiques, mais aucun en géotechnique.

L'eau liée ou adsorbée : qui entoure les grains argileux, elle est chargée électro-négativement, ce qui implique que l'eau contenue dans le sol est soumise à un champ électrique près de la surface des grains. Les molécules d'eau sont alors orientées par rapport à la paroi des grains et n'ont plus les propriétés physiques de l'eau normale. Chaque grains se trouve de la sorte entouré d'une pellicule d'eau dite liée ou adsorbée dont l'épaisseur est environ 5 millimicrons. L'eau adsorbée forme un mince film autour des grains, sa quantité est inversement proportionnelle à la granulométrie du sol (Guendouz 2011).

L'eau interstitielle : constituée d'eau capillaire et d'eau libre. L'eau capillaire est retenue par les pores les plus fins du sol au-dessus du niveau de la nappe (la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée). Par contre, l'eau libre qui obéit aux lois classique de l'hydraulique peut circuler dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur (le volume occupé par cette eau définit la notion de porosité efficace qui est plus petite que la porosité géométrique).

L'eau inter-feuillet : qui provoque le gonflement des particules argileuses du type montmorillonite.

L'importance relative de l'eau adsorbée et de l'eau interstitielles permet de se faire une image des états physiques du sol (ou consistance du sol), Figure 2.13.

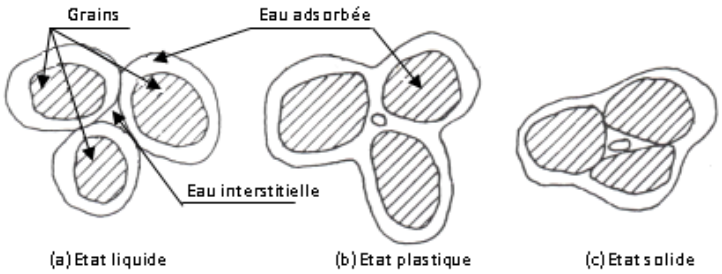


Figure 2.13. Divers états d'un sol (Costet et Sanglerat 1981).

2.8. Orientation des particules fines

Grâce au microscope électronique, l'orientation des particules argileuses n'est plus un mystère, sa structure est orientée selon l'un des deux types fondamentaux suivants (Holtz et Kovacs 1991):

- orientation bord contre face, dite floculée (structure floculée)
- orientation face contre face, dite défloculée (structure dispersée), Figure 2.14.

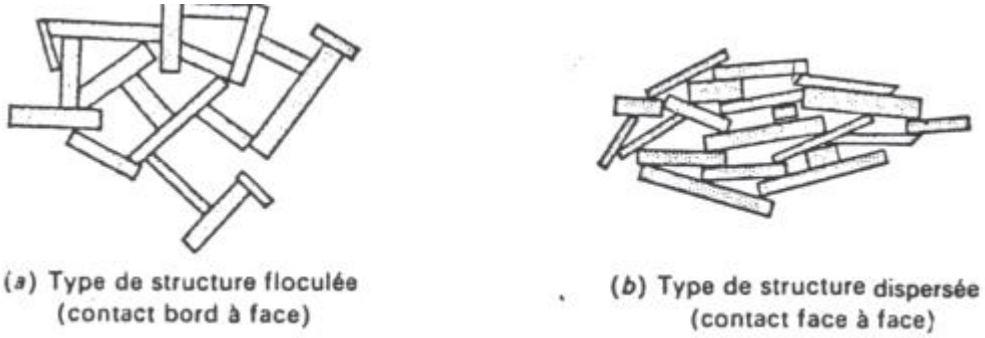


Figure 2.14. Schéma d'orientation des particules (d'après Lambe 1958)

Les particules des sédiments argileux présentent en réalité une disposition intermédiaire entre ces deux orientations fondamentales. En effet au moment de la sédimentation, les particules se déposent au hasard, ce qui conduit à une structure ouverte (plus ou moins floculée) selon qu'elles ont été déposées en milieu marin ou en eau douce (les argiles marines ont généralement une structure plus ouverte que les argiles déposées en eau douce).

Sous l'effet du poids des dépôts sus-jacents ou des efforts qu'elles support ensuite, les argiles se consolident et les particules tendent vers l'orientation dispersée (défloculée). Quant au remaniement, il conduit à des groupes arrangés au hasard comportant chacun des particules orientées parallèlement, Figure 2.15 (Holtz et Kovacs 1991).

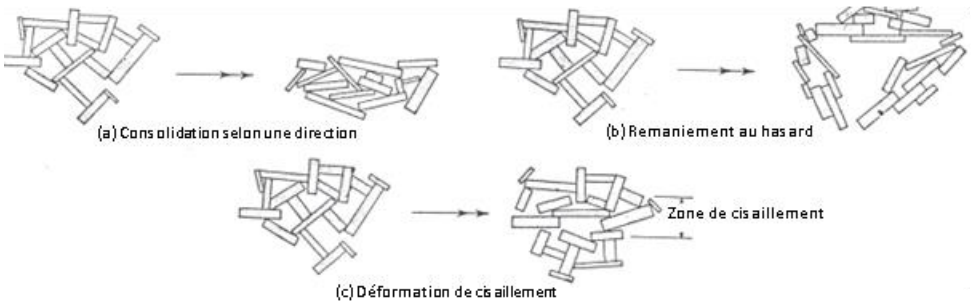


Figure 2.15. Effet des déformations sur l'orientation des particules

2.9. Imperméabilité des argiles

Les molécules d'eau se placent dans les vides de la structure argileuse, elles seront retenues électriquement sur les feuillets c.à.d. obstruction des vides (d'où la gravité est insuffisante pour vaincre ces forces d'attraction). Ce qui implique qu'il n'y a plus de circulation possible d'eau, à ce moment-là l'argile devient imperméable (Smith 2014).

2.10. Le phénomène de gonflement des argiles

Le gonflement est un phénomène complexe; l'importance du gonflement et de la pression exercée dépend des minéraux argileux présents dans le sol, de la texture et de la structure du sol ainsi que

de certains facteurs physico-chimiques tels que la valence des cations la concentration en sels, et la présence de matière organique.

Les sols dont les textures sont aléatoires ont une tendance plus marquée au gonflement que les sols dont les textures sont orientées. Une argile qui comporte des cations monovalents (une montmorillonite sodique, par exemple) présentera une tendance plus forte au gonflement qu'une argile qui contient des cations bivalents (une montmorillonite calcique, par exemple). Généralement l'eau est attirée par les ions (k^+, Na^+) d'où on a constitution des couches non claires formées d'ions hydratés qui écartent les feuillets d'où le phénomène mis en cause est le gonflement.

2.10.1. La kaolinite

Constituée par un empilement de feuillets avec une structure 1:1 et un taux très faible de substitution isomorphe. Les oxygènes de la couche de base d'un feuillet sont liés aux hydroxyles de la couche supérieure du feuillet sous-jacent, probablement par une liaison hydrogène. Comme l'intensité de cette liaison est relativement forte, l'empilement comprend un grand nombre de feuillet, qu'il est difficile de dissocier. Le minéral est stable et ne présente pas de risque de gonflement.

2.10.2. La montmorillonite

Constituée par un empilement de feuillets avec une structure 2:1 et un taux relativement important de substitution isomorphe concernant principalement le motif octaédrique (remplacement de Al^{3+} par Mg^{++}). Le feuillet composé, qui est ainsi globalement électronégatif, attire les cations, tel que Na^+, Ca^{++}, et K^+, qui peuvent se trouver en solution dans la phase liquide du sol, et qui sont aisément interchangeables entre eux. Les feuillets composés sont empilés comme les pages d'un livre, mais les liaisons entre les feuillets sont faibles et aisément dissocier, ce qui implique que l'eau peut ainsi s'introduire entre les feuillets, et provoquer des gonflements importants.

2.10.3. L'illite

Constituée par des feuillets avec une structure 2:1 et une prédominance de la substitution isomorphe au sein du motif tétraédrique (remplacement de Si^{4+} par Al^{3+}). La charge résiduelle électronégative qui en résulte a plus d'effet que dans la montmorillonite, du fait qu'elle est répartie sur les faces externes du feuillet, au lieu d'en être située au centre. D'autre part, cette charge est équilibrée principalement par des ions K^+, qui s'emboîtent mieux entres les atomes oxygènes du feuillet. En définitive, ces ions sont fortement liés aux feuillets, et ne sont pas

échangeable. Les feuillets empilés sont moins facilement dissociés que pour la montmorillonite ce qui implique que l'illite ne présente pas des tendances importantes au gonflement.

2.11. Signification du retrait et du gonflement pour l'ingénieur

Les effets du gonflement des sols à grains fins peuvent avoir une grande importance dans les travaux d'ingénierie. Ainsi, les fissures dues au retrait peuvent se produire en certains endroits lorsque les tensions capillaires sont plus fortes que la cohésion ou que la résistance à la traction du sol.

Ces fissures qui font partie de la macrostructure des argiles, représentent les zones faibles susceptibles de réduire de façon importante la résistance globale d'une masse de sol, la stabilité des talus argileux, et la capacité portante des fondations. La croûte desséchée et fissurée qui recouvre habituellement les dépôts d'argile molle à un effet négatif sur la stabilité des remblais construits sur ces dépôts.

Les fissures dues au retrait sont causés soit par l'évaporation de surface, dans les régions à climat sec, soit par l'abaissement de la nappe phréatique ou encore par la dessiccation des sols par les arbres durant les périodes sèches, dans les régions à climat humide. Lorsque le climat change et que le sol peut à nouveau être irrigué, il a tendance à gonfler ou à augmenter de volume. Souvent, le retrait ou le gonflement des sols à grains fins entraînent des variations de volume assez remarquées pour causer des dommages importants aux pavages et aux constructions légères.

Il arrive fréquemment qu'une construction soit construite alors que la couverture végétale est relativement sèche. L'évaporation est empêchée par l'élément qui recouvre le sol et la capillarité fait augmenter la teneur en eau, dans ces conditions, le sol peut gonfler. Il en résultera un soulèvement si la pression exercée par la construction est inférieur à la pression de gonflement ; ce phénomène n'étant généralement pas uniforme, c'est la structure qui subira les dommages. Les fissures caractéristiques dans la construction sont des fissures d'angle montant à 45° vers le coin à partir d'un point faible.

2.12. Critères indirects du gonflement

2.12.1. Indice de gonflement libre IG

On appelle essai à gonflement libre (Holtz et Gibbs, 1956) l'un des essais simples utilisés pour l'identification des sols gonflant. L'essai consiste à verser doucement 10 ml (cm^3) de sol ayant passé le tamis N°40 dans un cylindre gradué contenant 100 ml (cm^3) d'eau et à observer le volume à l'équilibre après gonflement.

On définit le gonflement libre de la manière suivante : $IG = \frac{Vf - Vi}{Vi} \times 100\,(\%)$.

Avec, Vf le volume final (lorsque le gonflement s'arrête) et Vi le volume initial.

A titre indicatif, les bentonites très gonflantes (le plus souvent des montmorillonites sodiques) ont un IG ≥ 1200 %. Même les sols dont les valeurs de IG sont de 100 % peuvent causer des dommages aux structures légères lorsqu'ils sont mouillés, les sols dont la valeur de IG ≤ 50 % ne présentent que de faible variation de volume.

2.12.2. Classification de l'aptitude au gonflement en fonction de l'indice de retrait IR

L'indice de retrait est défini comme suit : **IR = WL – WR**

Avec, WL la limite de liquidité et WR la limite de retrait. Le Tableau 2.3 nous donne l'aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de retrait.

Tableau 2.3. Aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de retrait

IR du sol en (%)	Aptitude au gonflement
0 à 20	Gonflement faible
20 à 30	Gonflement moyen
30 à 60	Gonflement fort
> 60	Gonflement très fort

2.12.3. Classification de l'aptitude au gonflement en fonction de l'indice de plasticité IP

L'indice de plasticité est défini comme suit : **IP = WL – WP**

Avec, IP l'indice de plasticité, WP la limite de plasticité et WL la limite de liquidité. Comme le sol est un mélange, on obtient I_P pour le sol total comme suit :

I_P (du sol total) = [(IP de la fraction < 400 µm) (masse de la fraction < 400 µm)] / masse total du sol. Le Tableau 2.4 nous donne l'aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de plasticité.

Tableau 2.4. Aptitude au gonflement des sols en fonction de l'indice de plasticité

IP du sol en (%)	Aptitude au gonflement
≤ 12	Faible
12 < I_P ≤ 24	Moyen
24 < I_P ≤ 32	Fort
IP > 32	Très fort

2.13. Les contraintes dues au gonflement des sols

- **Youmim et Zaslavsky (1968)**

$$\log\left(\frac{\sigma_G}{1kg/cm^2}\right) = \frac{\rho_0(1{,}3154 - 4{,}7193\ W_0) + 6{,}4116\ W_0 - 1{,}7882}{0{,}2117 - 0{,}5532\ W_0}$$

Avec, σ_G la pression de gonflement, ρ_0 la densité sèche initial et W_0 la teneur en eau initiale du sol.

- **Komornik et David (1969)**

Log σ_G = 0,0208 WL + 0,000665 γd – 0,0269 W – 1,868

Avec, σ_G la pression de gonflement en bars, γd le poids spécifique sec du sol, W la teneur en eau initiale du sol et WL la limite de liquidité du sol.

2.14. Relation entre le gonflement et l'affaissement

La Figure 2.16 établit une relation entre le gonflement et l'affaissement (ou tassement), en se basant sur les masses volumiques in situ et la limite de liquidité du sol. Cette figure est un guide d'évaluation du potentiel d'affaissement de la compressibilité et de l'expansibilité (gonflement) des sols en fonction de la limite de liquidité WL et le poids volumique γ apparent du sol sec (Holtz et Kovacs 1991).

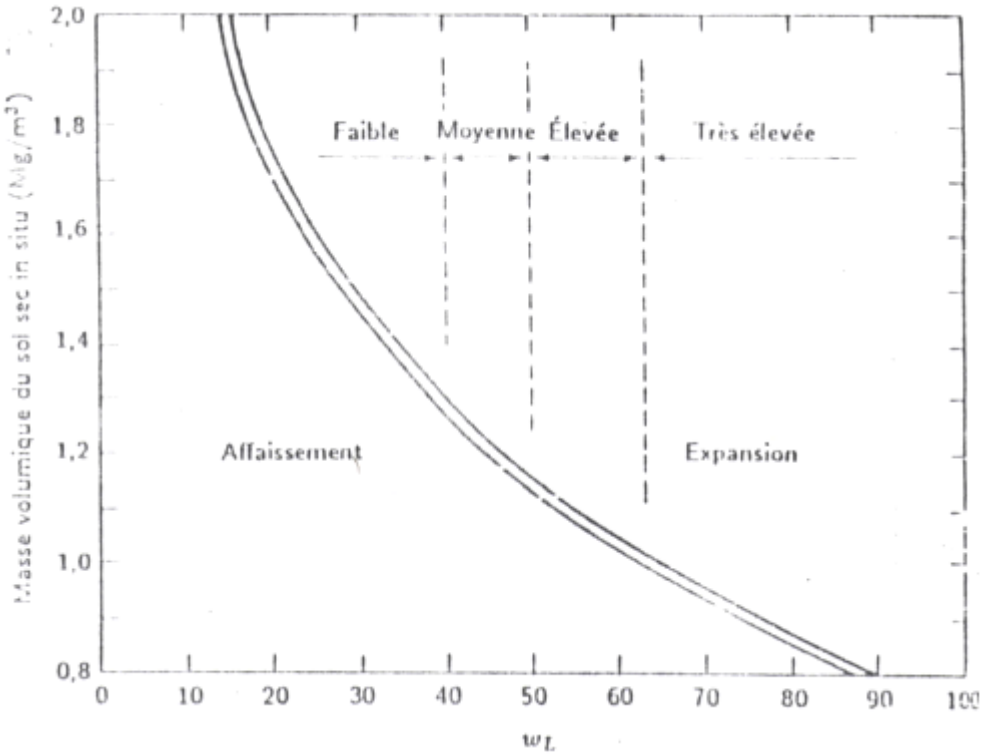


Figure 2.16. Relation entre le gonflement et l'affaissement des argiles (Mitchell et Gardner 1975 et Gibbs 1969)

2.15. Cas particuliers des argiles gonflantes

Certains sols argileux peuvent subir des variations de volume importantes, provoquées soit par un gonflement, soit par un retrait dus à une modification généralement lente de l'état d'humidité du terrain naturel au voisinage immédiat de la construction. Dans l'étude des sols gonflants, il y a lieu de distinguer les sols sur-consolidés et les sols normalement consolidés. L'analyse des phénomènes qui les gouvernent est, en effet, différente (Costet et Sanglerat 1981, Costet et Sanglerat 1983).

- **Gonflement des sols sur-consolidés**

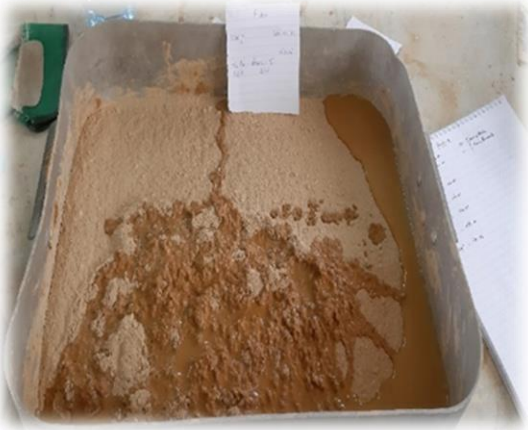
Une forte sur-consolidation peut être provoquée soit par une cimentation des grains (il n'y a alors pas de risque de gonflement) soit par une succion élevée de l'eau interstitielle. La succion correspond à une pression interstitielle négative. L'équation classique $\boldsymbol{\sigma = \sigma' + u}$ montre que l'apparition d'un état de succion (Δu négatif) correspond à une augmentation de la pression effective ($\Delta\sigma'$) c'est à dire à une sur-consolidation. Dans le cas d'un sol à succion élevée contenant des argiles actives, telles que la montmorillonite, une arrivée d'eau provoque un gonflement par élimination de cette pression de sur-consolidation (Costet et Sanglerat 1981).

- **Retrait et gonflement des sols normalement consolidés**

Le cas des sols argileux saturés normalement consolidés dans lesquels la pression interstitielle est voisine de zéro est très différent des sols sur-consolidés. Si l'on provoque une succion dans un tel échantillon, il se produit un phénomène de consolidation par expulsion d'eau. Le volume du sol diminue, il y a donc retrait. Parallèlement il se produit une augmentation de la pression effective. Un tel état de succion dans les couches superficielles peut être provoqué soit par l'action des racines des arbres ou arbustes qui absorbent souvent un volume d'eau important, soit par l'application d'un gradient de température (par exemple, près des chaufferies ou de certaines parties d'usines). Naturellement, ces sols lorsqu'ils se réhydratent, soit sous l'action des intempéries, soit accidentellement lors de fuites de canalisations diverses, sont susceptibles de gonfler (Costet et Sanglerat 1981).

CHAPITRE 3

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE



3.1. Matériaux et démarche expérimentale

Le but de ce chapitre c'est de présenter les matériaux utilisés dans ce travail de recherche ainsi que le programme expérimental suivi pour caractériser les argiles avant et après traitement. Nous présentons en premier lieu les matériaux adéquats qui répondent aux besoins de notre étude, par la suite la manière de stabilisation adoptée.

Le sol utilisé est un sol reconstitué qui est composé de 80 % de Kaolin KT2 et 20 % de Bentonite de charge. Cette option d'utiliser un sol reconstitué nous permet sur le plan expérimental d'avoir un sol de référence gonflant avec les mêmes propriétés géotechniques pour les différentes prises d'essais. Par la suite, le sol argileux reconstitué été traité avec des grignons d'olives qui sont en fait des déchets d'origine végétale.

Il faut noter que nous avons réalisé l'ensemble des essais géotechnique au sein du *Laboratoire Central des Travaux Publics* (LCTP) d'Alger.

3.1.1. Kaolin KT2 de Tamazert

Nous avons utilisé comme matière première pour la préparation du sol reconstitué, un kaolin du gisement de Tamazert. Ce gisement connu depuis 1925 se trouve à 17 km au nord de la Daïra d'El-Milia dans la Wilaya de Jijel (Nord-Est de l'Algérie), il est exploité par la société Soalka SPA (Figure 3.1).

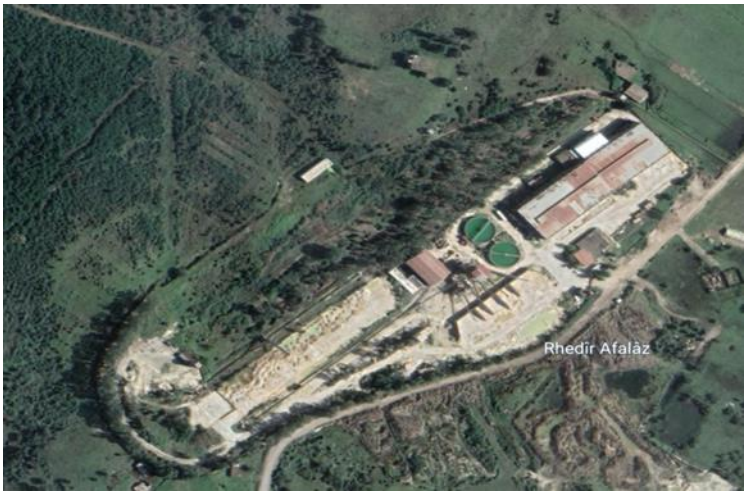


Figure 3.1. Le site d'exploitation du Kaolin d'El-Milia (Soalka SPA)

Le kaolin (Figure 3.2) est un type d'argile composée principalement de kaolinite, de minéraux de mica et de quartz. C'est une argile primaire formée par la décomposition du feldspath sur place. Les grains sont grossiers et ils ne sont pas plastiques en comparaison avec la plupart des argiles sédimentaires. On le trouve généralement déposé dans des poches plutôt qu'en vastes couches stratifiées.

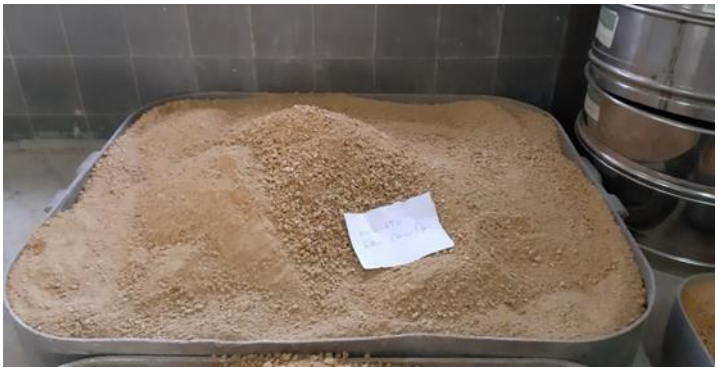


Figure 3.2. Kaolin KT2 utilisé dans la présente étude

- **Analyse chimique (% en poids) :** le Tableau 3.1 présente la composition chimique du Kaolin KT2 que nous avons utilisé dans la présente étude.

Tableau 3.1. Résultats de l'analyse chimique du Kaolin KT2

Composé chimique	**% en poids**
SiO2	49,30
Al2O3	33,50
Fe2O3	33,50
TiO2	0,24
CaO	0,08
MgO	0,40
K2O	2,75
Na2O	0,09
MnO	–
SO3	–
P.A.F	10,50

- **Composition minéralogique (% en poids) :** le Tableau 3.2. présente la composition minéralogique du Kaolin KT2

Tableau 3.2. Composition minéralogique du Kaolin KT2

Minéraux	**% en poids**
Kaolinite	74
Matière micacée	8
Quartz	8
Autre minéraux	10

- **Analyse granulométrique (% en poids) :** les résultats de l'analyse granulométrique du Kaolin KT2 sont présentés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3. Analyse granulométrique du Kaolin KT2

Diamètre	**%**
> 40 µ	0,03
< 10 µ	88±3
< 2 µ	43±3

3.1.2. Bentonite

La bentonite est une argile caractérisée par sa capacité de rétention d'eau car la montmorillonite est un type de smectite particulièrement gonflant. Le débouché le plus important de la bentonite se situe dans les techniques du génie civil, particulièrement dans l'étanchéité des édifices, la construction de digues, la pose de canalisations, les puits de forages et l'édification de tunnels,

Il existe deux types de bentonites, ***la bentonite à base de sodium***, qui augmente de volume lorsqu'elle est humide et qui peut absorber plusieurs fois sa masse en eau (elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique). ***La bentonite à base de calcium*** qui ne possède pas ces propriétés de gonflement, généralement utilisée à des applications parapharmaceutiques.

Nous avons travaillé avec la « bentonite de charge industrielle » du gisement de M'Zila (Wilaya de Mostaganem). En nous basant sur les caractéristiques déterminées par le laboratoire des analyses de la bentonite de l'unité ENOF de Mostaganem, le Tableau 3.4 présente quelques propriétés physico-chimiques de la Bentonite utilisée dans le cadre de notre étude.

Tableau 3.4. Quelques propriétés physico-chimiques de la Bentonite utilisée

Analyse chimique (% en poids)	
SiO^2	55 - 65 %
Al^2O^3	12 - 18 %
Na^2O^3	1 - 3 %
CaO	1 - 5 %
K2O	0,76 - 1,75 %
MgO	2 - 3 %
Fe2O3	ppm
Propriétés physiques	
Humidité	6 % max
Perte au feu à 1000° C	6,9 % max
Analyse granulométrique (% en poids)	
74 µm granulométrie	98 % min
Résidu sur tamis 74 µm	2 % du poids max

3.1.3. Les grignons d'olives

Les grignons d'olives sont des produits de récupération résultant de l'extraction de l'huile d'olive. Ils sont composés essentiellement des résidus de la pulpe, des fragments des noyaux et une certaine proportion d'eau de végétation qui contient à son tour les composants hydrosolubles de l'olive. Ces grignons n'ont pas vraiment une valeur considérable, certes une quantité sert à alimenter les chaudières et les chauffages de maison mais la majorité est jeter et considérer comme une source de pollution

- **Caractéristiques physique des grignons d'olives :** les grignons bruts renferment la coque du noyau réduite en morceaux, la peau et la pulpe broyée de l'olive, environ 25% d'eau et encore une certaine quantité d'huile qui favorisent leur altération rapide. Les grignons épuisés diffèrent essentiellement par une plus faible teneur en huile et une teneur en eau réduite du fait qu'ils ont été déshydratés au cours du processus de l'extraction. Les grignons épuisés partiellement dénoyautés sont constitués essentiellement par la pulpe (mésocarpe) et contiennent encore une petite proportion de coques qui ne peuvent être séparées complètement par les procédés de tamisage ou de ventilation utilisés (Figure 3.3).

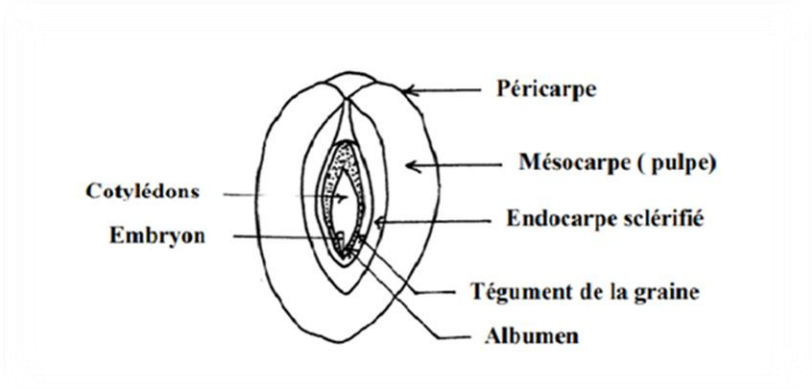


Figure 3.3. Les constituants d'un grignon d'olive

3.2. Programme expérimental

Afin d'étudier l'efficacité des grignons d'olives pour la stabilisation des sols argileux, nous avons mis en œuvre un programme expérimental basé sur une série d'essais géotechniques en laboratoire (Tableau 3.5). Nous avons réalisés tous les essais géotechniques de la présente étude au sein du laboratoire *Laboratoire Central des Travaux Publics* (LCTP) d'Alger dans le cadre d'un stage pratique en milieu professionnel.

Tableau 3.5. Programme expérimental réalisé

Traitement du sol reconstitué avec 2%, 4% et 6% de grignons d'olives		
Essais géotechniques	**Propriétés géotechniques**	**Notation (Unité)**
Propriétés physiques	Poids volumique des grains solides	γ_s
	Pourcentage des grains $\leq$ 0,08mm	*(%)*
Limites d'Atterberg	Limite de liquidité	W_L *(%)*
	Limite de plasticité	W_P *(%)*
	Indice de plasticité	*IP (%)*
Essai de compactage Proctor	Teneur en eau optimale	W_{opt} *(%)*
	Densité sèche maximale	γ_d *(t/m³)*
California bearing ratio	Indice CBR immédiat sans immersion	*CBR (%)*
Essai de cisaillement direct	Cohésion	C_{uu} *(kPa)*
	Angle de frottement interne	φ_{uu} *(°)*

3.2.1. Poids volumique des grains solides γ_s (méthode au pycnomètre à eau NF P 94-054)

La norme (NF P 94-054) s'applique à tout échantillon de sol intact ou remanié dont la dimension des plus gros éléments est inférieure à 2 mm. L'essai a pour but de détermine la masse volumique moyenne d'un échantillon composé de particules, parfois de nature différente (Figure 3.4). La masse volumique des particules solides d'un sol est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité. Le Tableau 3.6 présente le poids volumique des grains solides γ_s mesuré pour le sol reconstitué de référence, les grignons d'olives ainsi que pour les échantillons de sol reconstitué traités avec 2, 4 et 6% de grignons d'olives.

Tableau 3.6. Poids volumique des grains solides des différents échantillons du sol étudié

Matériaux	**Grignons d'olive**	**Essai de référence**	**Essai à 2%**	**Essai à 4%**	**Essai à 6%**
Poids volumique des grains solide γs (t/m3)	1,24	3,26	2,53	2,33	3,18

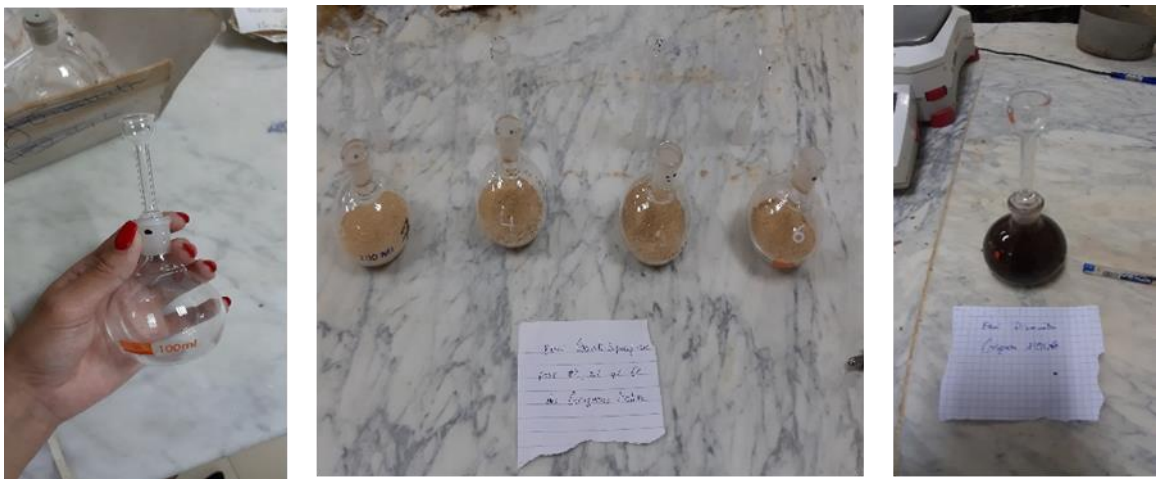


Figure 3.4. Mesures du poids volumique des grains solides γ_s (NF P 94-054)

3.2.2. Détermination de la granulométrie par tamisage et sédimentation (NF P 94 056) et (NF P 94 057)

Elle permet de donner la répartition des grains du sol par classes de taille. Deux techniques sont classiquement mise en œuvre :

- le tamisage (pour les grains de taille supérieure à 80 µm) ;
- la sédimentation (pour les grains de taille inférieure à 80 µm).

Les résultats de ces mesures sont donnés sous forme courbe granulométriques, on représente des courbes cumulatives des tamisât en fonction du logarithme décimal de la taille du grain (équivalent à l'ouverture du tamis concerné).

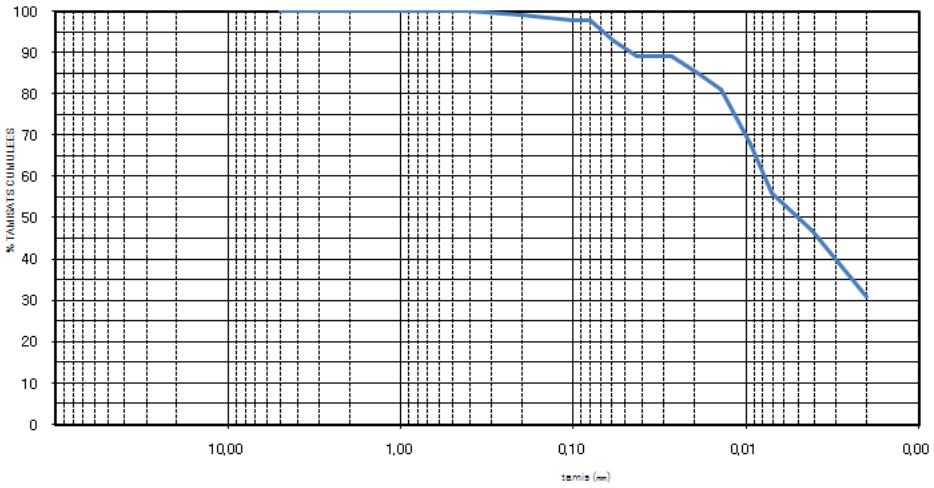


Figure 3.5. Analyse granulométrique et sédimentométrique du sol reconstitué.

3.2.3. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Selon la norme française (NF P 94-051), l'essai a pour but de déterminer la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés (c'est la limite de liquidité). Ensuite, la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure (c'est la limite de plasticité).

En outre, cet essai, permet de prévoir le comportement des sols qui passe de l'état solide à l'état plastique puis à l'état liquide, en particulier sous l'action de la teneur en eau, il se fait uniquement sur les éléments fins du sol (Figure 3.5).

Figure 3.6. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les résultats des limites d'Atterberg effectuées sur les échantillons de sol de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 2, 4 et 6% de grignons d'olives sont présentés dans les Tableaux et Figures ci-dessous :

Tableau 3.7. Résultats des limites d'Atterberg du sol reconstitué de référence

Sol de référence (20% Bentonite + 80% Kaolin)	
limite de liquidité (%)	WL= 84,81
limite de plasticité (%)	WP= 36,82
indice de plasticité	IP = 0,4799

Tableau 3.8. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **2%** de grignons d'olives

limite de liquidité (%)	WL= 82,51
limite de plasticité (%)	WP= 40,60
indice de plasticité	IP = 0,4193

Tableau 3.9. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **4%** de grignons d'olives

limite de liquidité (%)	WL= 83,30
limite de plasticité (%)	WP= 40,60
indice de plasticité	IP = 0,4270

Tableau 3.10. Résultats des limites d'Atterberg du sol traité avec **6%** de grignons d'olives

limite de liquidité (%)	WL= 78,29
limite de plasticité (%)	WP= 39,04
indice de plasticité	IP = 0,3925

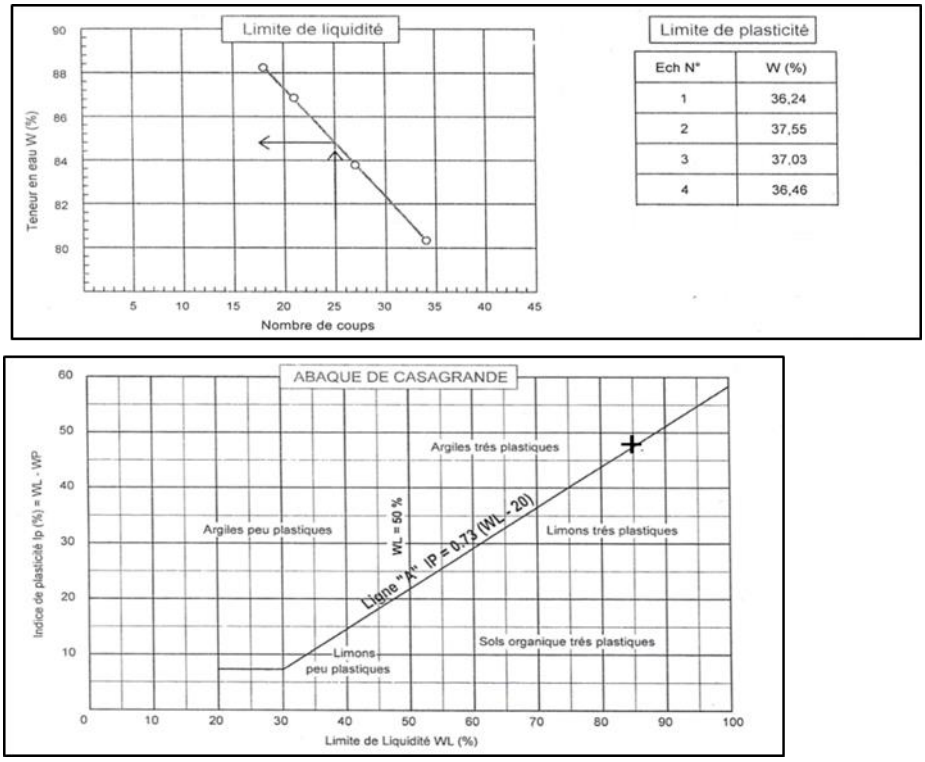


Figure 3.7. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande du sol reconstitué de référence

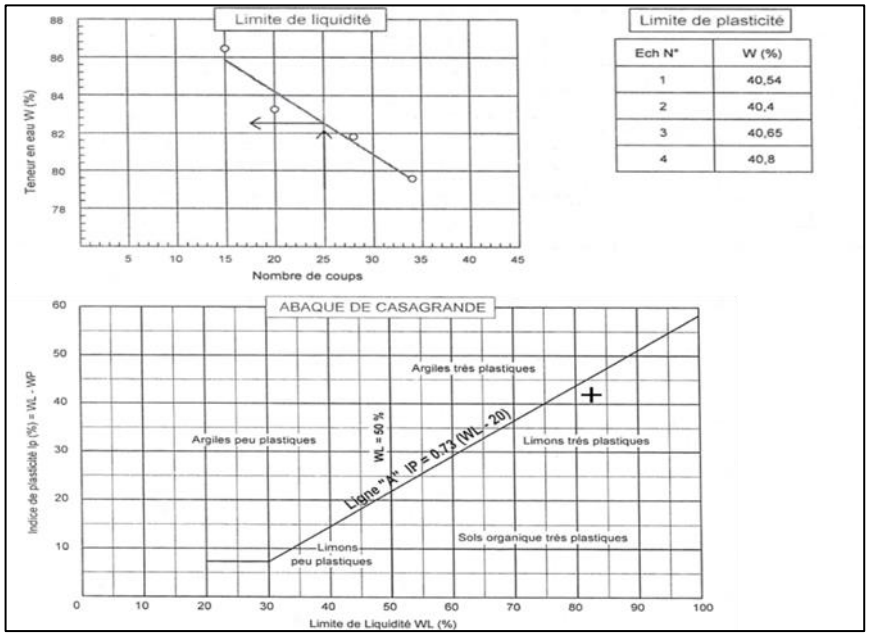


Figure 3.8. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**2%** de grignons d'olives)

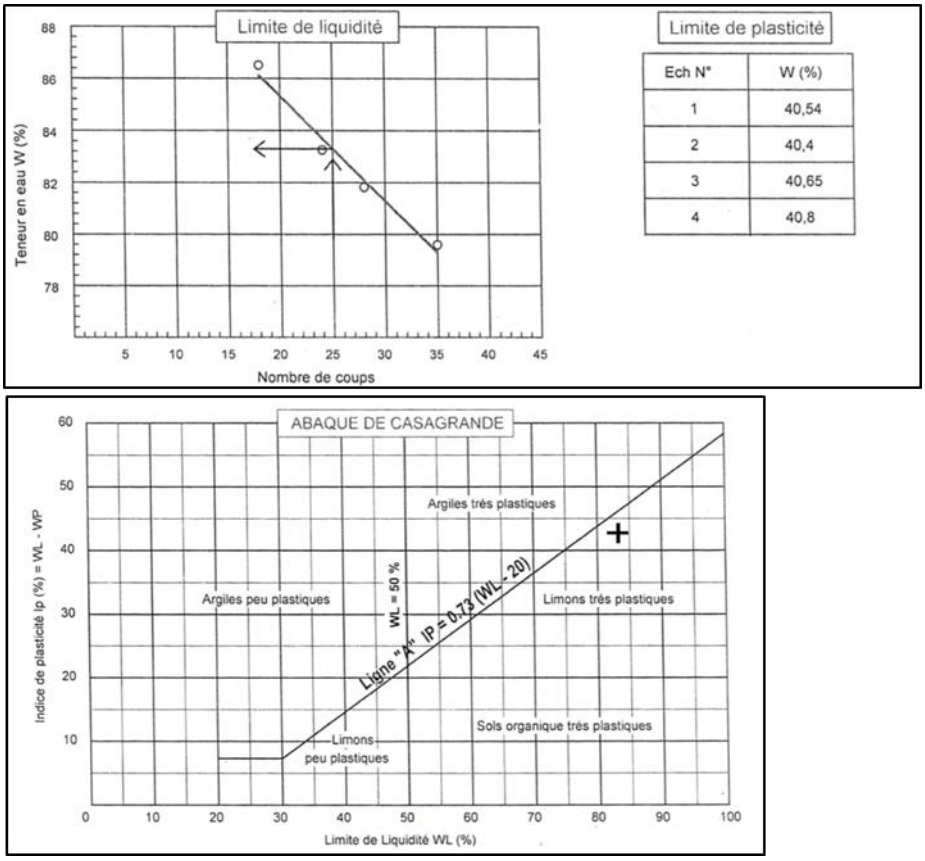


Figure 3.9. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**4%** de grignons d'olives)

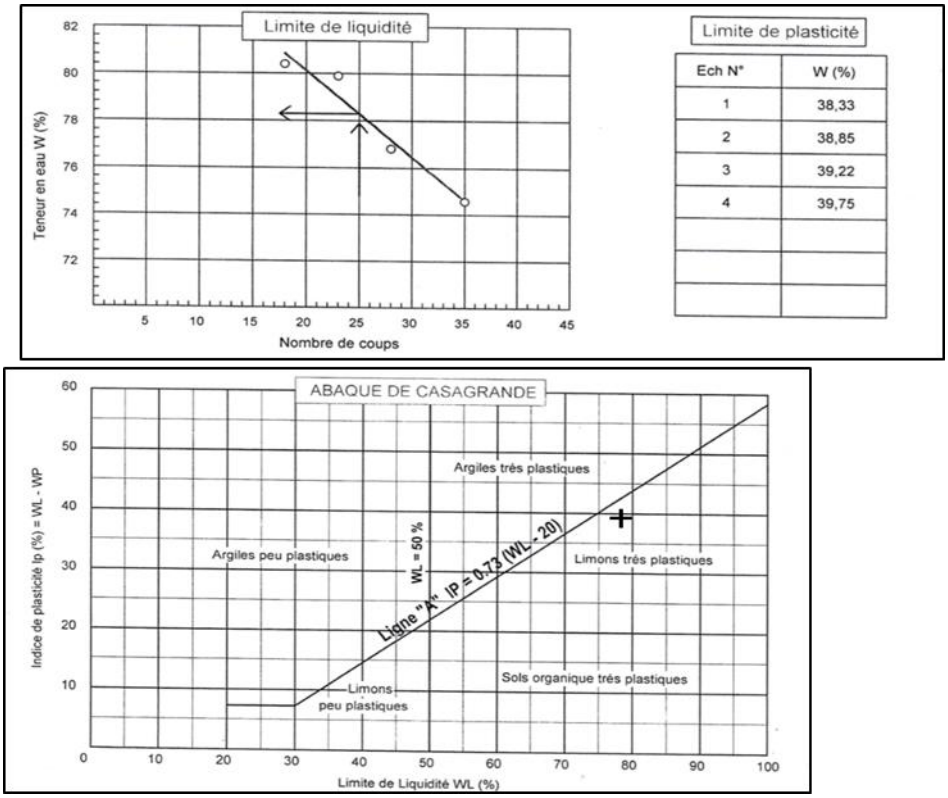


Figure 3.10. Limites d'Atterberg et classification de Casagrande (**6%** de grignons d'olives)

3.2.4. Détermination des caractéristiques Proctor (NF P94-093)

Selon l'ingénieur Proctor (1933), l'essai Proctor est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol par compactage à énergie fixe (dame de poids et dimensions normés). L'essai Proctor a pour but de connaître la réaction d'un sol au compactage en fonction de sa teneur en eau et de déterminer sa densité sèche optimum (Figure 3.9). Il sert de référence pour les objectifs de compactages.

Figure 3.11. Détermination des caractéristiques Proctor (NF P94-093)

Les résultats des essais Proctor effectués sur les échantillons de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 2, 4 et 6% de grignons d'olives sont présentés dans les Tableaux et Figures ci-dessous :

Tableau 3.11. Résultats de l'essai Proctor sur le sol reconstitué de référence

Sol de référence (20% Bentonite + 80% Kaolin)						
Teneur en eau optimale W (%)	16,2	18,9	21,6	23,8	25,0	25,6
Densité sèche max γ_{dmax} (t/m^3)	1,47	1,52	1,54	1,54	1,53	1,47

Tableau 3.12. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives

Teneur en eau optimale W (%)	16,4	20,5	22,4
Densité sèche max γ_{dmax} (t/m^3)	1,44	1,47	1,44

Tableau 3.13. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives

Teneur en eau optimale W (%)	17,0	21,2	23,8
Densité sèche max γ_{dmax} (t/m^3)	1,41	1,47	1,45

Tableau 3.14. Résultats de l'essai Proctor sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives

Teneur en eau optimale W (%)	20,3	21,5	23,0
Densité sèche max γ_{dmax} (t/m^3)	1,41	1,46	1,42

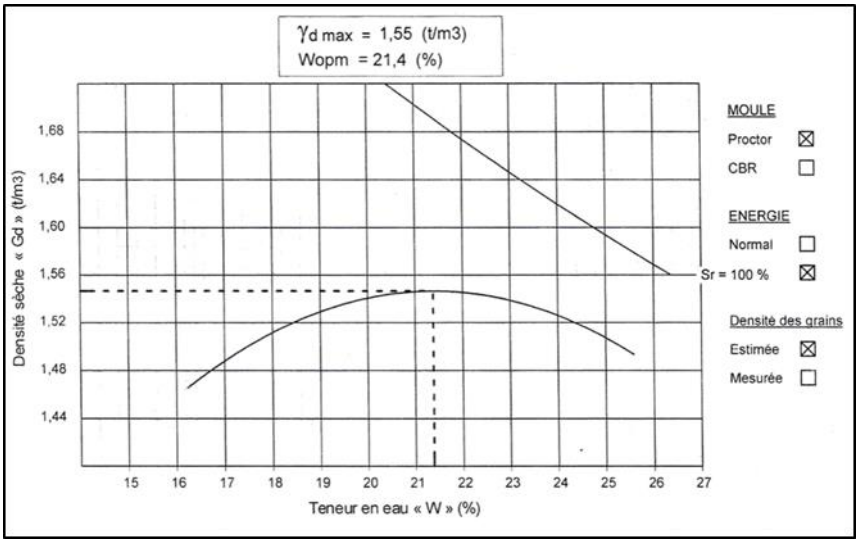


Figure 3.12. Courbe Proctor du sol reconstitué de référence

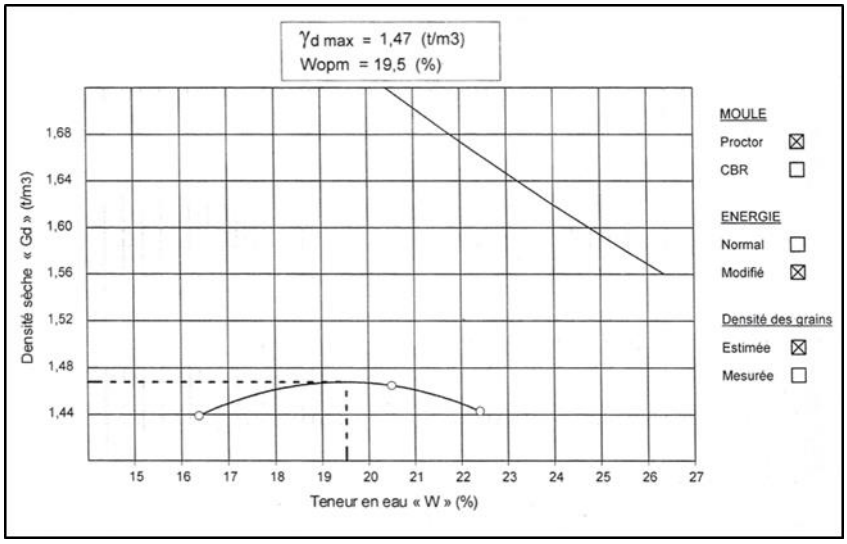


Figure 3.13. Courbe Proctor du sol traité avec **2%** de grignons d'olives

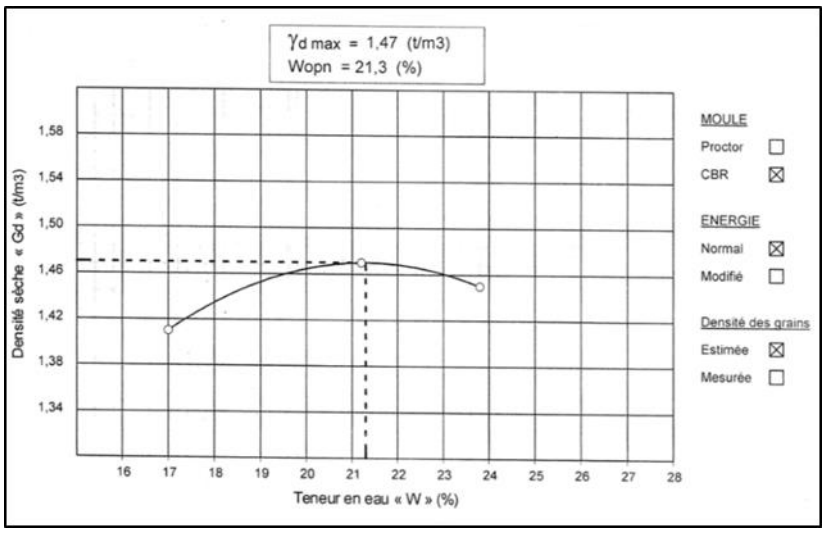


Figure 3.14. Courbe Proctor du sol traité avec **4%** de grignons d'olives

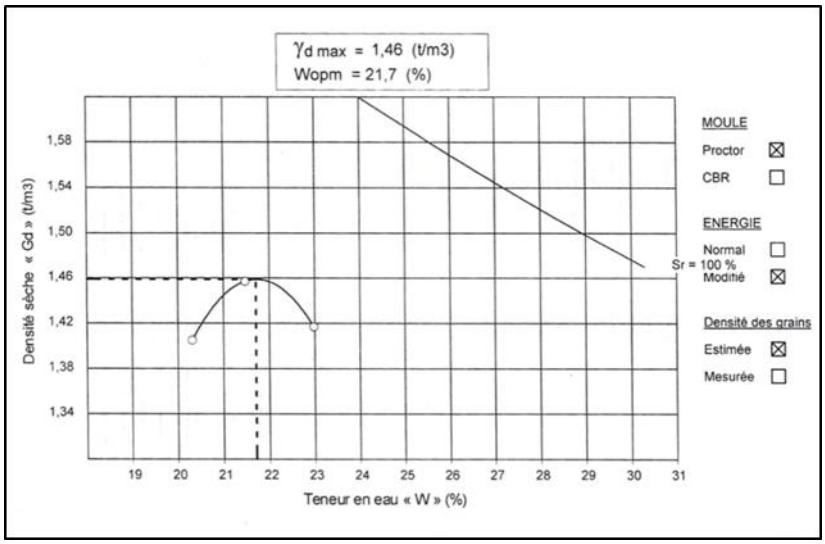


Figure 3.15. Courbe Proctor du sol traité avec **6%** de grignons d'olives

3.2.5. Détermination des caractéristiques de cisaillement du sol (NF P94-071-1)

L'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante. En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif ***φ'*** et la cohésion effective ***C'***, paramètres utilisés pour le dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.

Figure 3.16. Détermination des caractéristiques de cisaillement du sol (NF P94-071-1)

Dans notre étude chaque essai de cisaillement direct été réalisés avec un minimum de trois (3) éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée. Les résultats des essais de cisaillements effectués sur les échantillons de sol de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 2, 4, et 6% de grignons d'olives sont présentés dans les Tableaux et Figures ci-dessous :

Tableau 3.15. Résultats de l'essai de cisaillement direct

sol reconstitué de référence	l'angle de frottement $\varphi°$	20,3
	la cohésion C (kPa)	15,50
sol traité avec **2%** de grignons d'olives	l'angle de frottement $\varphi°$	20,4
	la cohésion C (kPa)	18,80
sol traité avec **4%** de grignons d'olives	l'angle de frottement $\varphi°$	20,4
	la cohésion C (kPa)	23,79
sol traité avec **6%** de grignons d'olives	l'angle de frottement $\varphi°$	20,9
	la cohésion C (kPa)	28,42

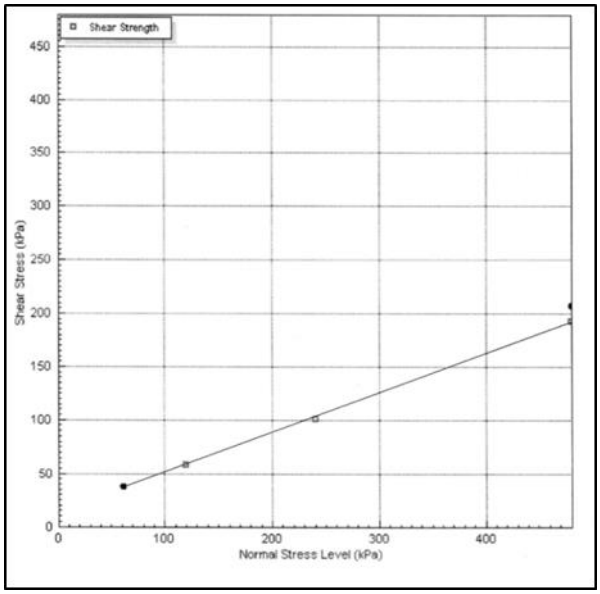


Figure 3.17. L'essai de cisaillement direct sur le sol reconstitué de référence

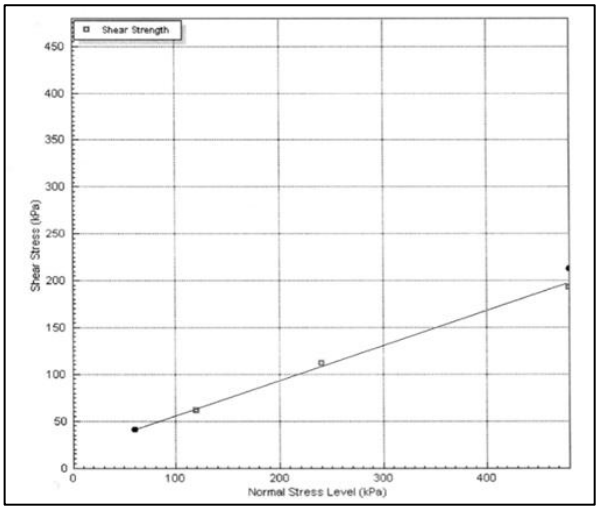


Figure 3.18. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives

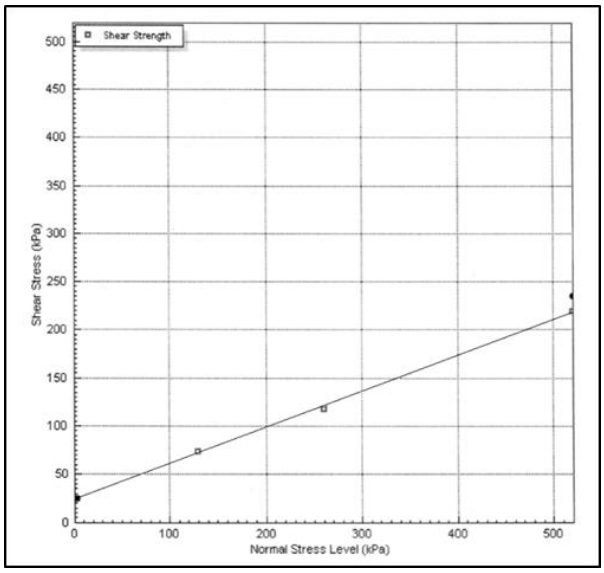


Figure 3.19. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives

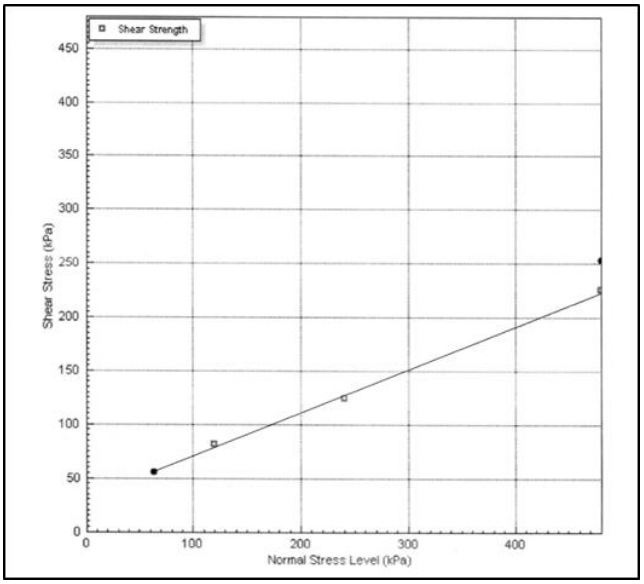


Figure 3.20. L'essai de cisaillement direct sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives

3.2.6. Détermination des caractéristiques du CBR immédiat (NF P94-078) :

Cet essai est réalisé sur les sols, matériaux non rocheux et sous-produits industriels. Il consiste à mesurer la résistance à l'enfoncement d'un piston normalisé dans un matériau compacté dont on connait la teneur en eau. Cet essai est réalisé afin de connaitre trois (3) informations importantes :

- la capacité d'un sol ou d'un matériau élaboré, à supporter la circulation du chantier ;
- déterminer le classement du sol dans le guide des terrassements routiers (GTR) ;
- déterminer les épaisseurs du corps de de chaussées.

Figure 3.21. Essai CBR immédiat (NF P94-078)

Les résultats des essais du CBR immédiat sur les échantillons de sol de référence ainsi que sur les autres échantillons de sol traités avec 2, 4, et 6% de grignons d'olives sont présentés dans les Figures ci-dessous :

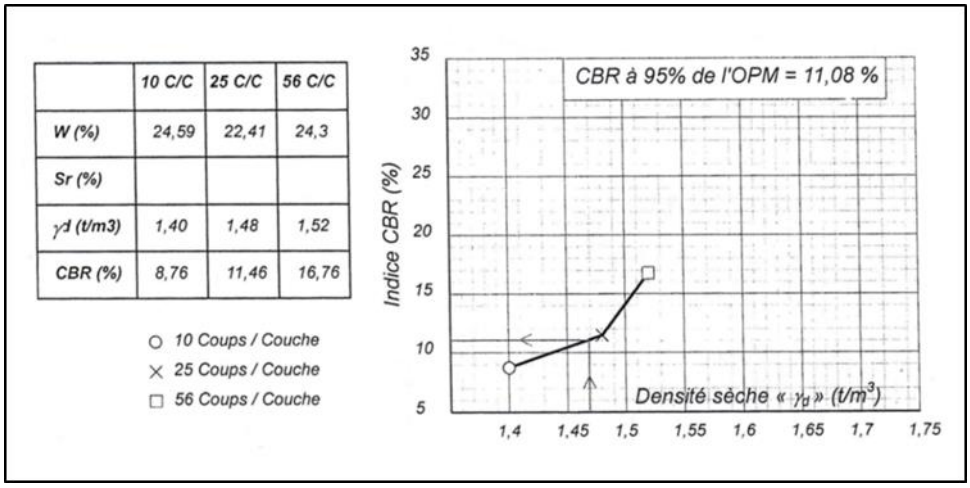


Figure 3.22. L'essai CBR immédiat sur le sol reconstitué de référence

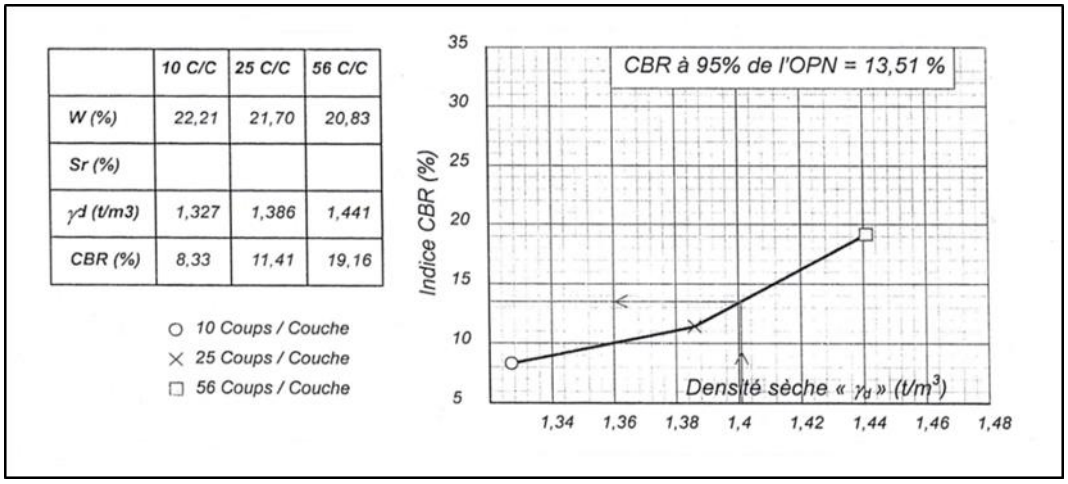


Figure 3.23. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **2%** de grignons d'olives

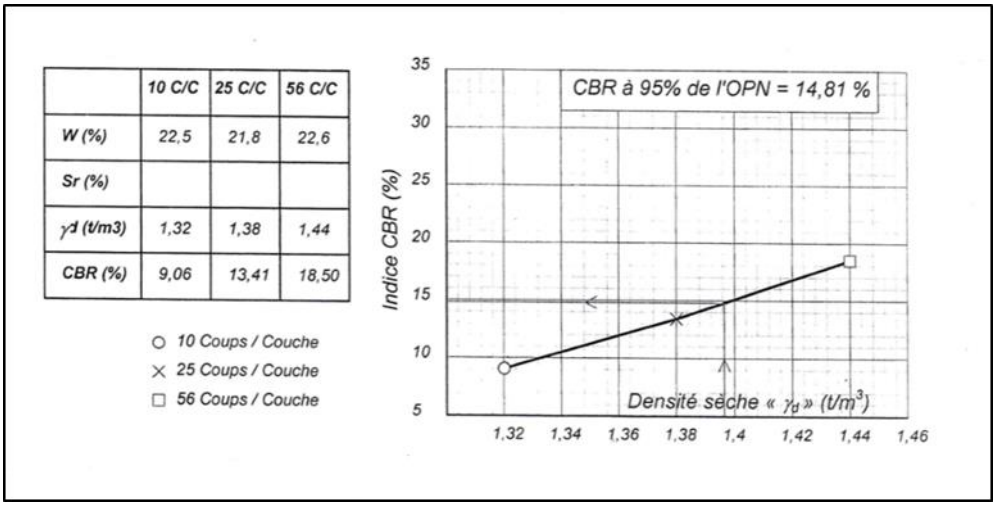
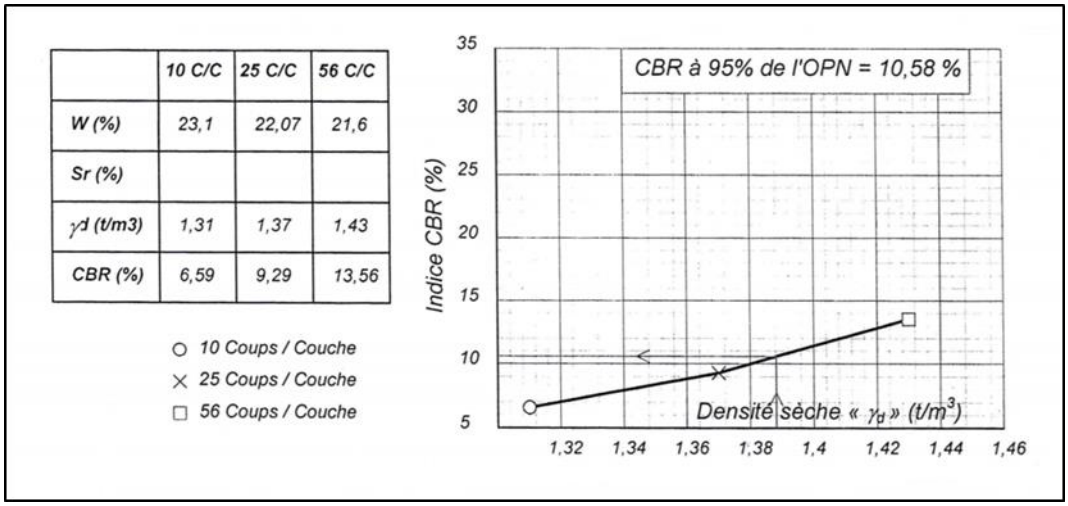


Figure 3.24. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **4%** de grignons d'olives



	10 C/C	25 C/C	56 C/C
W (%)	23,1	22,07	21,6
Sr (%)			
γd (t/m3)	1,31	1,37	1,43
CBR (%)	6,59	9,29	13,56

Figure 3.25. L'essai CBR immédiat sur le sol traité avec **6%** de grignons d'olives

3.3. Analyse et discussion des résultats obtenus

3.3.1. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg

La Figure 3.26 montre l'effet du grignon d'olive sur les limites d'Atterberg du sol traité. Le remplacement du grignon d'olive dans le sol argileux entraîne une légère modification des valeurs des limites d'Atterberg. Les résultats obtenus indiquent que lorsque le pourcentage des grignons d'olives augmente, la limite de liquide (WL) du sol traité diminue, tandis que la limite de plastique (WP) augmente pour un ajout de 2 et 4% puis elle diminue à nouveau pour 6% d'ajout. Cependant, l'indice de plasticité (IP) du sol traité diminue avec l'augmentation du pourcentage de grignons d'olives.

D'autre part, sur l'abaque de Casagrande le point caractéristique se déplace de la gauche (argile très plastique) vers la droite (limon très plastique) de la ligne A en fonction de l'augmentation du pourcentage de l'ajout des grignons d'olives. C'est l'effet de la substitution d'une partie des fines particules par des particules plus grandes qui sont les grignons d'olives.

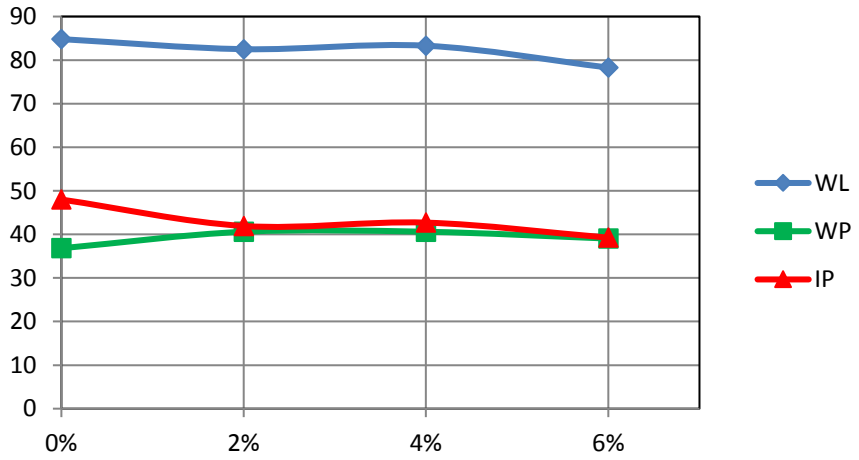


Figure 3.26. Effet des grignons d'olives sur les limites d'Atterberg

3.3.2. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du compactage

Figues 3.27 et 3.28 montrent l'effet des déchets d'olive sur les caractéristiques de compactage du sol argileux étudié. La Figure 3.27 indique que la valeur de densité sèche maximale la plus élevée a été obtenue par l'addition de 2 et 4% de grignons d'olive. L'ajout de pourcentages plus élevés entraîne une réduction de la densité sèche maximale. Cela est dû au fait que les grignons d'olives contient des particules plus légères (γ_s = 1,24 t/m^3) que celles du sol de référence (γ_s = 3,26 t/m^3). Pour le même volume, le poids volumique des particules solides très faible pour les grignons d'olives a réduit la masse du sol traité par rapport à celle du sol de référence, ce qui a donné des valeurs de densité sèche plus faibles.

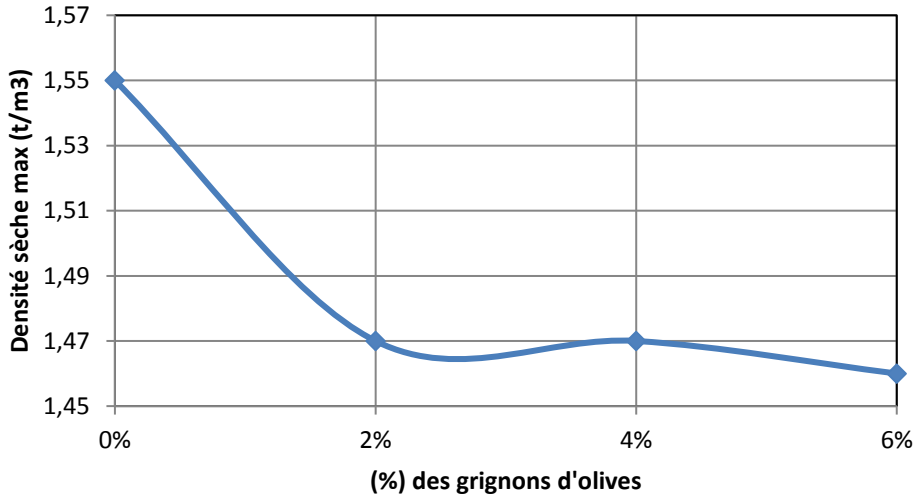


Figure 3.27. Effet des grignons d'olives sur la densité sèche maximale

D'autre part, la Figure 3.28 indique que la valeur de la teneur en eau optimale la plus basse a été obtenue pour l'addition de 2% de grignons d'olive. L'ajout de pourcentages plus élevés entraîne une augmentation des valeurs de la teneur en eau optimale. Cette augmentation est due à l'ajout de grignons d'olive qui remplace une partie des fines particules du sol traité, ce qui nécessite plus d'eau pour compacter le mélange sol-grignons d'olive.

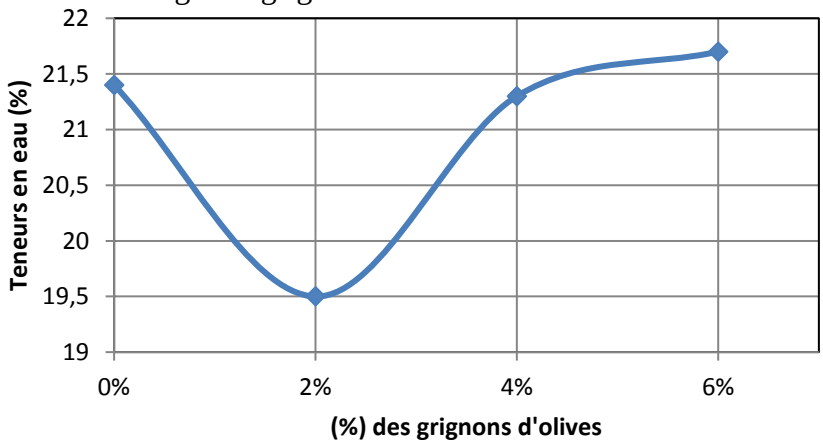


Figure 3.28. Effet des grignons d'olives sur la teneur en eau optimale

3.3.3. Effet des grignons d'olives sur la résistance au cisaillement

Sur la base des essais de cisaillement direct sur les échantillons de sol traité avec 2, 4 et 6% de grignons d'olive, l'augmentation de la cohésion s'est avérée respectivement de 21,29%, 53,48% et 83,35% (Figure 3.29 et Tableau 3.15).

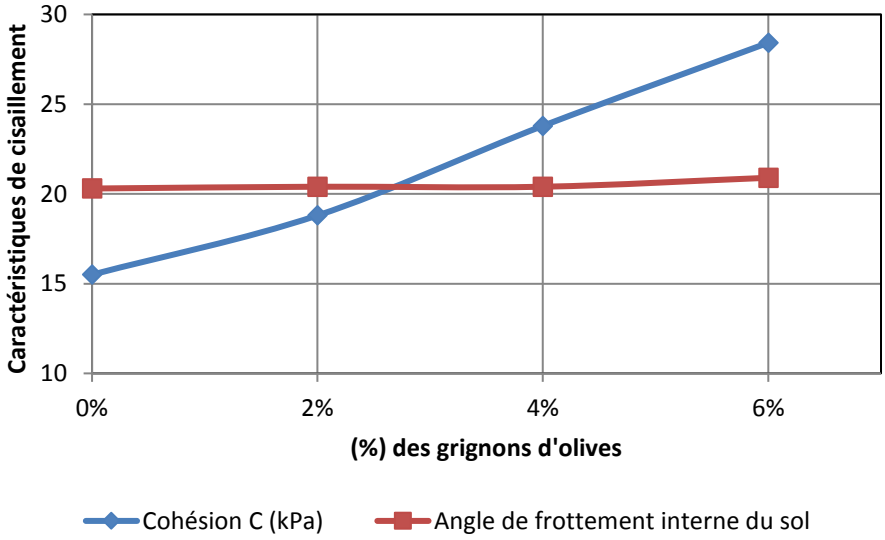


Figure 3.29. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques de cisaillement

D'autre part, nous constatons une légère augmentation de l'angle de frottement interne φ de l'ordre de 0,43%, 0,43% et 2,95 % respectivement (Figure 3.29 et Tableau 3.15). Cette légère amélioration est due à la substitution d'une partie des fines particules du sol argileux par des grignons d'olives qui contient des fragments de noyau d'olive de plus gros diamètres.

3.3.4. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du CBR immédiat

Les valeurs de l'indice CBR immédiat présentées dans les Figures 3.21 à 3.23 montre que les meilleurs résultats sont ceux de l'échantillon traité avec 4% de grignons d'olives. Ce qui indique que l'augmentation du pourcentage de l'ajout réduit à la fois la cohésion du sol traité et ces caractéristiques de compactage ce qui cause la décroissance de l'indice CBR.

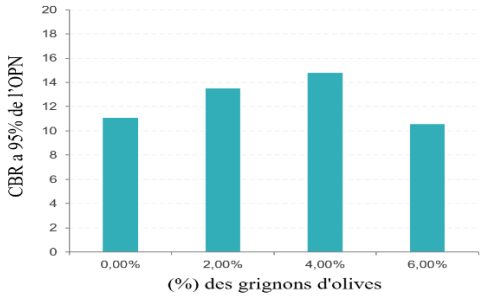
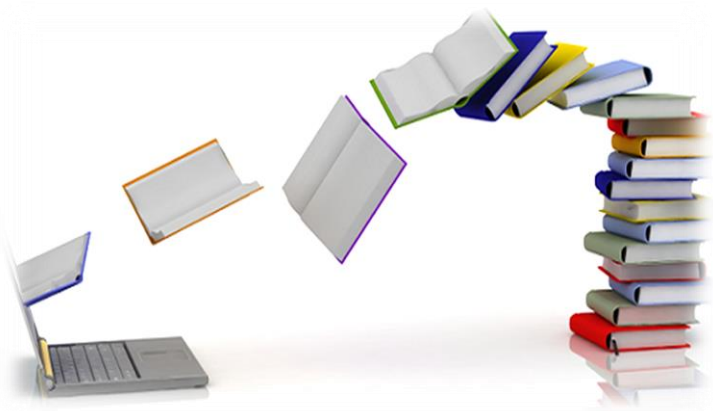


Figure 3.30. Effet des grignons d'olives sur les caractéristiques du CBR immedia

CONCLUSION GÉNÉRALE

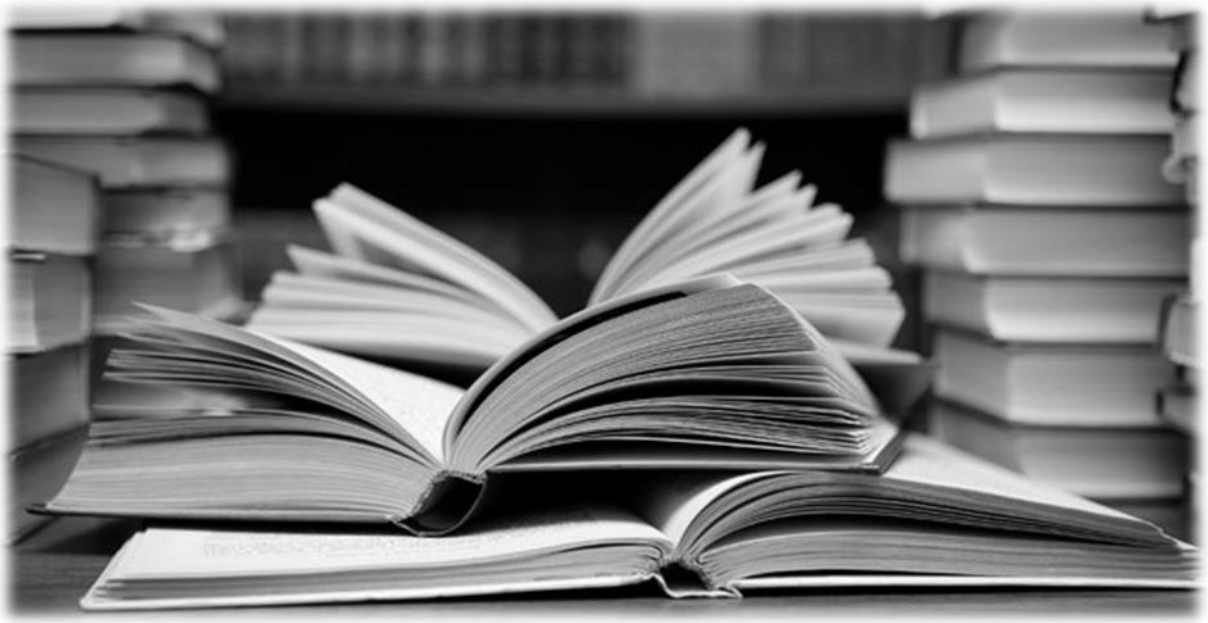


CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail repose sur l'idée de valoriser les déchets locaux à travers leurs réutilisations dans le domaine de la stabilisation des sols argileux ce qui peut assurer un développement durable dans les régions pauvres du pays à des coûts raisonnables.
Pour cette raison nous avons proposé d'utiliser les grignons d'olives, qui sont un déchet agricole disponible dans la région de Jijel, pour améliorer les caractéristiques physico-mécaniques des sols argileux.

A travers cette étude expérimentale, nous avons constaté qu'avec l'augmentation du pourcentage de grignons d'olive, l'indice de plasticité des sols traités diminue et les propriétés de résistance au cisaillement augmentent. Pour ces paramètres géotechniques, l'ajout de 6% de grignons d'olive peut être considéré comme une valeur optimale. D'autre part, la densité sèche maximale la plus élevée et la valeur de teneur en eau optimale la plus basse ont été obtenues pour l'addition de 2% en poids de grignons d'olive. Dans l'ensemble, on peut conclure que le grignon d'olive peut être considéré comme une solution écologique et économique pour le traitement des sols argileux dans les régions en voie de développement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbas Mohamed et Ben Ahmed Mohammed (2014), "Stabilisation des sols gonflants par ajout de poudrette de caoutchouc issue du broyage des pneus usés"

Anand Kumar B.G, Shashank Agrawal , Ankur Dobriyal (2014), "Stabilization of Cohesive Soil using Demolished Brick Waste", for, Innovations and Advances in Civil Engineering Towards Green and Sustainable Systems INACES-2014

Athira T, Ashish Johnson (2017), "Expansive Soil Stabilization using Coconut Shell Powder and Lime", for, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181 Vol. 6 Issue 03, March-2017

Babouri R (2008), stabilisation des sols argileux par la chaux cas des kaolinites de Guelma, mémoire de magister université de M'Sila, Algerie

Belabbaci Zeyneb (2014), stabilisation des sols gonflants, thèse de doctorat

Bouafia, A. (2013) "Aide-mémoire de mécanique des sols". Office des Publications Universitaire, Algérie, 416 p.

Budhu, M. (2007) "Soil mechanics and foundations". 2ème edition, John Wiley & sons, Inc., 634p.

Chelghoum, N. (2006a) "Eléments de base en mécanique des sols". Publications de l'université Badji Mokhtar- Annaba, 318 p.

Costet, J. et Sanglerat, G. (1981) "Cour pratique de mécanique des sols, 1 Plasticité et calcul des tassements". Troisième édition, Dunod, 285 p.

Costet, J. et Sanglerat, G. (1983) "Cour pratique de mécanique des sols, 2 Calcul des ouvrages". Troisième édition, Dunod, 447 p.

Das, B. M. (2006) "Principles of geotechnical engineering". 5ème édition, éditions Thomson, 589p.

Dysli, M. (1997) "Mécanique des sols". *Polycopié de cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Département de génie civil, Cycle post-grade : géologie appliquée à l'ingénierie et à l'environnement, 3ème édition, 79 p.

Emeka Segun Nnochiri, (2018), "Effects of corncob ash on lime stabilized lateritic soil", SSP - Journal of civil engineering Special Issue, March 2018

Fang, H.Y. (1991) “Foundation engineering hand book”. 2ème édition, Chapman et Hall, New-York, 923 p.

Gbenga Matthew Ayininuola, Lukman Olusegun Balogun ,(2018), “Investigation of Glass Fiber Potential in Soil Stabilization”, for, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Volume-7 Issue-5, June 2018

Gopal, R. et Rao, A.S.R. (2005) “Basic and applied soil mechanics”. 2ème édition révisée, New Age International Publishers, New Delhi, 757 p.

H. Suha Aksoy and Mesut Gor ,(2013), “Effect of Natural Resin on Strength Parameters of Sandy Soil, for, International Journal of Environmental Science and Development”, Vol. 4, No. 1, February 2013

Hachichi, A., Bourokba, S., Fleureau, J.M. “Chemical Stabilization of two expansive soils from the Oran region”. Revue française de géotechnique. N° 118, pp. 3-11 (2007). In French.

Holtz, R et Kovacs, W. (1991) “Introduction à la géotechnique”. Traduit en français par Lafleur, J., édition de l’École Polytechnique de Montréal, 808 p.

Hossein Ghiassian, Gholamreza Poorebrahim, (2004), “Soil reinforcement with recycled carpet wastes”, for, Waste Management & Research

Humphrey Danso1, , D. Brett Martinson1, Muhammad Ali1, John B. Williams1, (2015), “Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks”, First International Conference on Bio-based Building Materials June 22nd - 24th 2015 Clermont-Ferrand, France.

Ibrahim T. Yusuf , Aper E. Zava, (2018), “Investigating the suitability of coconut husk ash as a road soil stabilizer”, for, International Journal of Technology 10(1): 27-35 ISSN 2086-9614

J. Prabakar , R.S. Sridhar ,(2002) , “Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil”, for, Construction and Building Materials 16 (2002) 123–131

Lérau, J. (2006) “Mécanique des sols 1”. *Polycopié de cours de l’Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, Département de Sciences et Technologie pour l’Ingénieur, 3ème année ingénierie de la construction.

McCarthy David, F. (2007) “Essentials of soil mechanics and foundations, basic geotechnics”. Pearson Prentice Hall, 7ème édition, 850 p.

Megnath Neopaney, Ugyen, Kezang Wangchuk, Sherub Tenzin, (2012), “Stabilization of Soil by Using Plastic Wastes”, for, International Journal of Emerging trends in Engineering and Development

Mingdong Li, Kejun Wen, Lin Li, Anguo Tian (2006) “Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Beads Stabilized Lightweight Soil”

Mousa F. Attom , Munjed M. Al-Sharif, (1997), “Soil stabilization with burned olive waste”, Applied Clay Science 13 1998 219–230

Mr. Santosh1 Prof. Vishwanath C.S.2, (2015), “Stabilization of Expansive Soil by using Wheat Husk Ash and Granulated Blast Furnace Slag”, for, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 3, Issue 04, 2015

Murthy, V.N.S. (2002) “Geotechnical engineering- principles and practices of soil mechanics and foundation engineering”. Edité par Marcel Dekker, New York, CRC Press, 1029 p.

Nnochiri, E.S., Emeka, H.O., Tanimola, M. “Geotechnical characteristics of lateritic soil stabilized with sawdust ash-lime mixtures”. Stavební Obz. - Civil engineering journal. Vol. 26 (1), p. 66-76 (2017).

Noorina Tarannum Khan, Swapnil Walzade and R.K. Yadav, (2017), “Study on the Effects of Blast Furnace Slag on Geotechnical Characteristics of Black Cotton Soil”, for, International Journal of Current Engineering and Technology

Okagbue, C.O. “Stabilization of clay using woodash. Journal of materials in civil engineering”. Vol. 19 (1), p. 14-18 (2007).

Oluwatuyi, O.E., Adeola, B.O., Alhassan, E.A. Nnochiri, E.S., Modupe, A.E., Elemile, O.O., Obayanju, T., Akerele, G. “Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction”. Case studies in construction materials. Vol. 9, e00191 (2018).

Philipponnat, G. et Hubert, B. (2003) “Fondations et ouvrages en terre”. Editions Eyrolles, 548 p.

Rehab Bekkouche, S., Boukhatem, G., Mendjel, D. “Mechanical behavior of clay reinforced by layers of polymer”. International invention of scientific journal.Vol. 2 (04), pp. 130-133 (2018).

Sabat, A.K. (2012). “Stabilization of expansive soil using waste ceramic dust” Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 17, Bund. Z, 39153926. VII

Sharmila K C, Supriya C L, Madhu K.M, Chetan K M, Ashish dubay B, (2018), “Stabilization of Black Cotton Soil by using Cashew nut shell ash and Lime”, for, International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR), July 2018 IJSDR | Volume 3, Issue 7

Smith Ian G.N. (2014) “Smith’s Elements of soil Mechanics”. 9ème édition, éditions Wiley Blackwell, 488 p.

T. Murali Krishna, Sd. Shekun Beebi, (2015), “Soil Stabilization by Groundnut Shell Ash and Waste Fiber Material”, for, International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJIET)

Tonmoy Kumar Brahmachary and Md. Rokonuzzaman, (2018), “Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value”, for, international journal of Geo-Engineering une ref manquante.

Vikas Sharma, Pramod Kumar Rathore and Amit Sharma, (2018), “Soil Stabilization by Using Wheat Husk Ash”, for, Journal of Civil Engineering and Environmental Technology p-ISSN: 2349-8404; e-ISSN: 2349-879X; Volume 5, Issue 1; January-March, 2018, pp. 31-35

SITE WEB CONSULTÉS

[1] http://enof.dz/v/catalogue-des-produits/

[2] http://soalka.com/filiales/el-milia/

[3] http://www.fao.org/3/X6545F/X6545F01.htm