République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda

Département de Technologie

Filière : Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Professeur d'Enseignement Secondaire Technique

Thème :

Renforcement du terrain argileux avec un taux de ciment

Présenté par : Zabat Faiza

Aidi Mokhtaria

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
BISKRI Yasmina	MCA	ENSET-Skikda	Président
MOUDJARI Maroua	MCB	ENSET-Skikda	Encadrant
DOB Hanane	MCB	ENSET-Skikda	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

DÉDICACES

Nous dédions ce mémoire

A toute la famille ZABAT en général

et en particulier à mon père qui m'a toujours soutenu

A ma mère qui m'encourage à progresser

A mes frères et sœurs : Nassim, Rida, Moufida, Hamida, Rania, Nihad, Soufian, Israa qui me soutiennent et m'encouragent

et à mes amies de l'université a réunies : Assia, Dalal, Chaima, Salwa, Omaima, Mokhtaria, Afaf, Ines, Malak.

A tous mes camarades de la promotion 2019.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit

du primaire, moyen et secondaire ou

de l'enseignement supérieur.

A tous les personnes qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin, et qui

nous ont accompagnés durant notre chemin d'étude.

FAIZA

DÉDICACES

Nous dédions ce mémoire

A toute la famille AIDI et ben garchouh en général

et en particulier à mon père qui m'a toujours soutenu

A ma mère qui m'encourage à progresser

A mes frères et sœurs : Mahjouba ; hanane ; youcef el mokhtar qui me soutiennent et m'encouragent

et à mes amies de l'université a réunies : faiza ; yamina ; ikram ; salwa ; omaima ; khadija ; dalal ; sarah ;hind .

A tous mes camarades de la promotion 2019.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit

du primaire, moyen et secondaire ou

de l'enseignement supérieur.

A tous les personnes qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin, et qui

nous ont accompagnés durant notre chemin d'étude.

Mokhtaria

REMERCIEMENTS

Mon premier remerciement va à الله عزوجل.

Je tenais à remercier vivement notre encadrante

Mm. Moudjari Maroua pour sa gentillesse, sa

Disponibilité contribution générale à

L'élaboration de ce travail.

Je souhaiterais également remercier

mes professeurs de l'ENSET pour tout le savoir

qu'ils nous a donnés.

Je remercie aussi les membres de jury pour avoir fait

l'honneur de juger et d'évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier tous les responsables du laboratoire

LTPO DE TIARET

Merci à tous ceux qui nous aides, de près ou de loin

RÉSUMÉ

Les problèmes posés aux ouvrages de génie civil par le comportement de certains sols sont largement répandus. Le phénomène de gonflement et le glissement ont été, aussi longtemps, considérés dans le domaine de la géotechnique, car ils causent beaucoup d'endommagements et de désordres, qui se chiffrent à un coût très élevé.

Les sols argileux ne sont pas adaptés à la construction des routes aussi, en raison de leurs propriétés faibles. C'est pourquoi nous avons eu recours à la technique de stabilisation, l'une de ces techniques dites chimique, largement utilisée dans les projets routiers. Parmi les méthodes de stabilisation les plus répandues, on trouve la stabilisation par adjonction de ciment, qui améliore les propriétés physiques et mécaniques du sol.

Cette étude vise à évaluer l'impact de l'ajout de différentes proportions de ciment sur les caractéristiques des sols argileux. Un échantillon de sol a été prélevé dans la région de Bordj Bounaâma. Un mélange de sol argileux avec des proportions variables de ciment (4%, 7% et 10%) a été préparé et des essais au laboratoire ont été effectués, notamment l'essai de cisaillement direct, CBR et l'essai de Proctor.

Les résultats ont montré que l'addition de ciment a influences positivement la densité sèche après le compactage et l'indice CBR, donc le ciment a permis de lier les particules du sol entre elles, ce qui s'est traduit par une augmentation significative de la résistance et de la rigidité du sol. Cela le sol rend plus durable et capable de supporter des charges plus importantes, aussi plus adapté à la construction des routes.

Mots clés : Argile, Gonflement, Stabilisation, Ciment, Cisaillement, CBR, Proctor

ملخص

المشاكل التي تطرحها أعمال الهندسة المدنية بسبب سلوك بعض أنواع التربة "المنتفخة" منتشرة على نطاق واسع. كما تم تناول ظاهرة انتفاخ التربة منذ فترة طويلة في مجال هندسة الجيوتقنية، لأنها تسبب الكثير من الأضرار والفوضى، مما يؤدي إلى تكلفة باهظة للغاية.

تُعدّ التربة الطينية غير مناسبة للاستخدام في بناء الطرق نظرًا لضعف خصائصها. ولذلك لجانا إلى تحسينها بتقنية التثبيت الكيميائي المتداولة بكثرة في مجال مشاريع الطرق و من أهم الطرق الأكثر انتشارا التثبيت بإضافة الاسمنت الذي يعمل على تحسين خصائص التربة الفيزيائية والميكانيكية.

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة نسب مختلفة من الاسمنت على خصائص التربة الطينية حيث تم أخذ عينة من منطقة برج بونعامة وتم تحضير مزيج من التربة الطينية مع نسب مختلفة من الاسمنت (4% ; 7 % و10%) وإجراء تجارب مخبرية شملت تجربة القص المباشر; PROCTOR ; CBR.

أظهرت النتائج أن إضافة الاسمنت أدت إلى ربط جزيئات التربة ببعضها البعض مما ينتج عنه زيادة في قوة التربة وصلابتها بشكل ملحوظ وهذا يجعلها أكثر متانة وقدرة على تحمل الأحمال وبالتالي تصبح مناسبة أكثر للاستخدام في بناء الطرق.

الكلمات المفتاحية :الطين , التثبيت , إنتفاخ, القص , الاسمنت , الانزلاق , CBR.

ABSTRACT

The problems posed to civil engineering works by the behavior of certain so-called “swelling” soils are widespread. The phenomenon of soil swelling has also long been considered in the field of geotechnics, because it causes a lot of damage and disorder, which amounts to a very high cost.

Due to their weak properties, clayey soils are not suitable for road construction. Therefore, we resorted to improving them using the chemical stabilization technique, widely used in road projects. Among the most common stabilization methods is cement addition stabilization, which enhances the soil's physical and mechanical properties.

This study aims to evaluate the impact of adding different cement proportions on the characteristics of clayey soils. A soil sample was collected from the Bordj Bounaâma region. A mixture of clayey soil with varying cement proportions (4%, 7%, and 10%) was prepared, and laboratory tests were conducted, including the Direct Shear Test (CBR) and the Proctor Test.

The results showed that adding cement led to the binding of soil particles together, resulting in a significant increase in soil strength and stiffness. This makes it more durable and capable of bearing heavier loads, thus making it more suitable for road construction.

Keywords: Clay, Stabilization, Swelling, Shear, Cement, Slip, CBR.

SOMMAIRE

DÉDICACES I
REMERCIEMENTS III
RÉSUMÉ III
SOMMAIRE VII
LISTE DES FIGURES X
LISTE DES TABLEAUX XIII
INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Généralité sur les sols fins

Introduction 3
1.1 Définition des sols fins 3
1.2 Eléments constitutifs d'un sol 3
1.3 L'eau et le sol 4
1.4 Les différents type des sols fins 4
1.4.1 Les argiles 4
1.4.2 Les silts et les limons 5
1.4.3 Les marnes 5
1.5 Minéralogie des sols 5
1.6 Microstructure des sols 6
1.7 Microstructure des argiles 6
1.7.1 Classification des minéraux argileux 7
1.8 Principaux groupes de minéraux argileux 9
1.8.1 La famille de la kaolinite (T-O) 9
1.8.2 La famille des micas (Les Illites) (T-O-T) 9
1.8.3 La famille de montmorillonite (T-O-T) 10
1.8.4 La famille de chlorites (T-O-T) 10
1.9 Les problèmes liés aux sols fins 11
1.9.1 Phénomène de gonflement 11
1.9.2 Tassement 12
1.9.3 Glissement 13
1.9.4 Erosion des sols 13
1.10 Quelques cas pathologique 14
1.10.1 Cas des bâtiments 14

1.10.2 Cas des chaussées....14
1.11 Système de classification de sol .... …….15
1.11.1 Classification élémentaire....15
A) Classification basée sur la granulométrie 15
B) Classification triangulaire.... 16
1.11.2 Classification USCS/LCPC....17
1.11.3 Classification GTR....19
1.11.4 Classification AASHTO....20
Conclusion.... 21

Chapitre II : Les techniques de stabilisation des sols fins

Introduction 22
2.1 But de la stabilisation 22
2.2 Types de stabilisation 22
2.2.1 Stabilisation chimique....22
2.2.1.1 Stabilisation hydrophobants 22
2.2.1.2 Stabilisation par ajout du sable.... 23
2.2.1.3 Stabilisation par liants .... ……24
2.2.2 Stabilisation par les fibres....34
2.2.3 Stabilisation mécanique....35
2.2.3.1 Stabilisation par compactage.... 35
2.2.3.2 Stabilisation par drainage 38
2.2.3.3 Stabilisation par substitution 38
2.2.3.4 Stabilisation par application de fortes pressions 38
2.2.3.5 Stabilisation pré humidification 38
2.2.3.6 Colonne ballastée 38
2.2.4 Méthodes thermiques....39
2.3 Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation.... 40
Conclusion.... 41

Chapitre III : Essais réalisés et procédures expérimentales

Introduction 43
3.1 Situation géographique des sols étudies.... 43
3.2 Caractéristiques de ciment ajouté.... 43
3.3 Caractéristiques d'argile (Les essais réalisés au laboratoire) 44
3.3.1 Les essais chimiques....44
3.3.1.1 Essais Bleu de méthylène....45

3.3.2 Les essais physiques....46
3.3.2.1 Détermination de la teneur en eau [NF P94-050].... 46
3.3.2.2 Essai d'analyse granulométrique [Norme NF P 94-056].... 46
3.3.2.3 Analyse Granulométrique par Sédimentométrie 47
3.3.2.4 Limites d'Atterberg [Norme NF P 94-051].... 48
3.3.3 Les essais mécaniques....49
3.3.3.1 Essai Proctor normal [NF P 94-093].... 49
3.3.3.2 Essai de cisaillement 51
3.3.3.3 Essais CBR.... 53
3.4 Traitement du sol étudié.... 54
3.4.1 Préparation du mélange....54
Conclusion.... 55

Chapitre IV : Résultats et discussions

4.1 Essai chimique.... 56
4.2 Essais physiques.... 56
4.2.1 Interprétations des essais physiques....58
4.3 Essais mécaniques.... 58
4.3.1 Essai Proctor....58
➢ A l'état naturel (0% ciment).... 58
➢ Avec l'ajout de ciment 59
4.3.2 Essai de cisaillement....60
➢ A l'état naturel (0% ciment).... 60
➢ Avec l'ajout de ciment.... 61
4.3.3 Essais Proctor modifie....63
4.3.4 Essai CBR Immédiat....63
➢ A l'état naturel (0% ciment).... 64
➢ Avec l'ajout de ciment.... 64
4.3.5 Interprétation des essais mécaniques....65
Conclusion.... 66
CONCLUSION GÉNÉRALE 68
Recommandations 69
Annexe 70
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE.... 78

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les sols fins

Figure 01 : Constituants D'un Sol…….…….....03

Figure 02 : Phase liquide retenue dans un sol…….……...04

Figure 03 : Microstructure de limon…….…….....06

Figure 04:Photographiques au microscope électronique à balayage des argiles……07

Figure 05 : Structure du tétraèdre SiO4…….……07

Figure 06 : Structure de l'octaèdre Al2O6…….……..……..08

Figure 07 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile…….....08

Figure 08 : Structure de la Kaolinite…….....…….09

Figure 09 : Structure de l'illite……..……..10

Figure 10 : Structure de la montmorillonite……..……..……..10

Figure 11 : feuillet du chlorite. ……....…….……..11

Figure 12 : le risque retrait-gonflement des argiles……..…...…….12

Figure 13 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation…..…….....12

Figure 14 : Glissement de terrain…….……...13

Figure 15 : l'érosion de sol. …….…….....13

Figure 16 : Une photo réelle représentant l'effondrement du pont à Jijel en raison de l'érosion hydrique……...…….....14

Figure 17 : Déformation structurelle due au gonflement du sol à ……..……...14

Figure 18 : Déformation d'une chaussée de sol instable……..…….15

Figure 19 : classification triangulaire……..…….....17

Figure 20 : Classification des sols fins (USCS/LCPC)…….....18

Figure 21 : Classification GTR des sols avec Dmax < 50 mm…….…….....19

Figure 22 : Classification GTR des matériaux avec Dmax > 50mm, matériaux rocheux et particuliers……...…….19

Chapitre II : Les techniques de stabilisation des sols fins

Figure 23 : Classification des liants……..…….....24

Figure 24 : Poudre de Sodeline……..……26

Figure 25 : Sodeline® au microscope à balayage électronique (×2000)…….....26

Figure 26 : Aperçu de la chaux……...…….....28

Figure 27 : Le nuage de cation autour de la micelle qui représente la dispersion et la floculation…….…….....28

Figure 28 : C-S-H à l'échelle microscopique…….…….…….....29

Figure 29 : Schéma montrant l'action de la chaux sur l'argile ……..…….…….....30

Figure 30 : Technique de Malaxage……..……..……..…….....31

Figure 31 : Technique de Malaxage……..…..……..…….....31

Figure 32 : Technique d'injection……...……...…….....32

Figure 33 : Aperçu du ciment……...…….....33

Figure 34 : Ruptures d'écrasement des éprouvettes avec 8% de chaux et différents dosages en fibres : (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15%, (d) 0.25%, après 7 jours, …….....35

Figure 35 : Compactage de surface…….…….....……..36

Figure 36 : Chantier d'un compactage dynamique profond …….…….....37

Figure 37 : Le Vibro-Compactage……..……..…….....37

Figure 38 : Colonnes ballasté…….…….....39

Chapitre III : Essais réalisé et expérimentation

Figure 39 : Situation géographique des sols étudient……..43

Figure 40 : l'argile utilisée dans cette étude……..….....44

Figure 41 : Essais Bleu de méthylène…….....46

Figure 42 : Colonne de tamis…….....47

Figure 43 : Matériels utilisés d'essai sédimentométrie……...…….....48

Figure 44 : Appareil de Casagrande……...……..49

Figure 45 : Moule Proctor Normal…….……...50

Figure 46 : Schéma de la boîte de cisaillement……...……...52

Figure 47 : appareille de cisaillement……...……..53

Figure 48 : Appareille de CBR…….…..…….....54

Figure 49 : mélange argile- ciment…….54

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure 50 : Courbe granulométrique…….…….……....57

Figure 51 : Synoptique de classification de sol selon la norme NF P 11-30…….....57

Figure 52 : Courbe de limite de liquidité à la coupelle de casagran.……....57

Figure 53 : Courbe de compactage d'argile non traitée (0% ciment) …….……....58

Figure 54 : Courbe de compactage d'argile traité à 4% de ciment…….……..…….....59

Figure 55 : Courbe de compactage d'argile traité à 7 % de ciment……...…….59

Figure 56 : Courbe de compactage d'argile traité à 10 % de ciment…….……..…….....59

Figure 57 : Courbe de compactage d'une argile …….....60

Figure 58 : Courbe contrainte de cisaillement (0%ciment)..……....60

Figure 59 : Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (0%ciment)……..61

Figure 60 : Courbe contrainte de cisaillement (4% ciment)…….....61

Figure 61 : Courbe contrainte de cisaillement- contrainte normal (4%ciment)…….61

Figure 62 : Courbe contrainte de cisaillement (7% ciment)…….62

Figure 63 : Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (7%ciment)……..62

Figure 64 : Courbe contrainte de cisaillement (10% ciment)…….....62

Figure 65 : Courbe contrainte de cisaillement- contrainte normal (10%ciment)…….……..63

Figure 66 : Courbe de Proctor modifie d'argile non traité…….…….……63

Figure 67 : Courbe de CBR (0% ciment)……...…....64

Figure 68 : Courbe de CBR (4% ciment)…….…….....64

Figure 69 : Courbe de CBR (7% ciment)…….…...…….....64

Figure 70 : Courbe de CBR (10% ciment)…….....65

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralité sur les sols fins

Tableau 01 : Dénomination des fractions granulaires des particules de sols…….....16

Tableau 02 : Classification des sols grenus (USCS/LCPC) ……..18

Tableau 03 :Définition du gravier, du sable, du silt et de l'argile selon le système de l'AASHTO……...…….....20

Tableau 04 : Tableau de classification AASHTO…….…….....20

Chapitre II : Les techniques de stabilisation des sols fins

Tableau 05 : Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées, (BEKKOUCHE et al, 2001)…….41

Chapitre III : Essais réalisés et expérimentation

Tableau 06 : Caractéristique physico-mécaniques et chimique de ciment utilisé…….....44

Tableau 07 : Classification de sol selon la valeur VBS……...…….…….....46

Tableau 08 : Degré de plasticité de sol selon l'indice de plasticité……..…..…….....49

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau 09 : Analyse chimique de sol étude …….....56

Tableau 10 : Les caractéristiques physiques ….....56

Tableau 11 : Les résultats de l'essai de Proctor normal …….....58

Tableau12 : Les résultats de cisaillement …….…….....60

Tableau 13 : Les résultats de l'essai de CBR …….63

INTRODUCTION GENERALE

Le sol joue un rôle principal dans le domaine du génie civil. Ses propriétés physiques et mécaniques influencent directement la conception et la stabilité des structures, des routes et des tunnels aux bâtiments et aux barrages.

L'argile se caractérise par sa texture fine et ses petites particules, ce qui la rend impropre à la construction de certaines structures de génie civil et entraîne de nombreux problème comme les glissements de terrain, où l'argile devient plus sujette au glissement lorsqu'elle est saturée d'eau, ce qui peut entraîner des effondrements de terrain menaçant les structures voisines. De même, le tassement pose problème, en particulier lorsque le sol est soumis à des charges lourdes ou à des changements d'humidité, ce qui entraîne des fissures dans les murs des bâtiments et des craquements des fondations, menaçant la sécurité de la structure.

Face aux défis posés par les sols problématiques, les scientifiques et les chercheurs ont développés des solutions ingénieuses, parmi lesquelles le traitement des sols par stabilisation ; pour optimiser leurs caractéristiques géotechniques.

La stabilisation des sols est un ensemble de techniques visant à modifier les propriétés d'un sol naturel afin de le rendre plus apte à supporter des charges et à répondre aux exigences d'un projet de construction, il y a plusieurs types de stabilisation tel que la stabilisation mécanique et chimique. Elle s'applique dans divers domaines du génie civil, notamment :

- **Construction des routes :** pour stabiliser la plateforme routière et les couches de fondation, améliorant ainsi la portance et la durabilité des chaussées.
- **Bâtiments :** pour stabiliser les sols de fondation et les remblais, réduisant le risque de tassement et de fissuration des structures.
- **Travaux publics :** pour stabiliser les talus, les remblais et les sols excavés, limitant les risques d'érosion et d'effondrement.
- **Aménagements hydrauliques :** pour stabiliser les berges des cours d'eau et des canaux, prévenant ainsi l'érosion et les glissements de terrain.

Objectif

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet d'un taux de ciment (4% ,7% et 10%) sur les propriétés mécaniques d'un sol argileux.

Plan de travail

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés, nous avons donc mené un plan de travail qui se compose des chapitres suivants :

- Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés et un plan de travail.
- Dans le périmer chapitre ; nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les sols fins (argile, limon …), et les problèmes rencontrés et les systèmes de classification des sols (classification élémentaire, classification USCS\LCPC etc.…).

- Dans le deuxième chapitre ; nous avons abordés les différents types de techniques de stabilisation des sols.
- Puis dans le troisième chapitre nous avons menés des essais au laboratoire sur un mélange d'échantillon d'argile et de différentes proportions de ciment afin d'étudier les propriétés physiques et mécaniques du sol.
- Le dernier chapitre est consacré les résultats du traitement par l'ajout de ciment sur les caractéristiques du sol concernant l'étude.
- Enfin, notre travail est achevé par une conclusion générale et de recommandations au service de travaux ultérieurement.

Chapitre I :

Généralité sur les sols fins

Introduction

Le sol fin représente environ 10 à 30 % de tous les types de sols sur terre. En Algérie, on en trouve l'argile une proportion de 20 à 50 %. Cette argile se caractérise par une structure fine et une composition qui la rende sensible aux facteurs externes (eau, chaleur, etc.) et à une faible résistance.

Dans ce chapitre, nous avons définies le sol fin, sa microstructure, ses différents types, ainsi que son système de classification, ses propriétés et les principaux problèmes de l'argile que nous rencontrons dans le domaine du génie civil.

1.1 Définition des sols fins

Un sol est défini par la géotechnique comme « un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère**.** Ce sont des sols où les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 20µm sont prédominent. Ils sont appelés également « sols cohérents ».

Les sols fins ont un comportement facilement déformable. De plus, l'eau a une influence très importante sur leur comportement mécanique. **[1]**

Ce matériau discontinu est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. L'altération physique comprend l'érosion, le gel et dégel, la variation de température, et l'anthropisation, etc. L'altération chimique comprend l'hydratation, l'oxydoréduction et la carbonatation. Certains sols, qu'on dit organiques, contiennent des débris végétaux ou d'animaux. Le caractère meuble ne suffit pas pour définir un sol naturel car certains matériaux fabriqués artificiellement à partir de sol sous de roches présentent aussi ce caractère**. [5]**

1.2 Eléments constitutifs d'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau libre ou liée et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases : phase solide, phase liquide et phase gazeuse**. [2]**

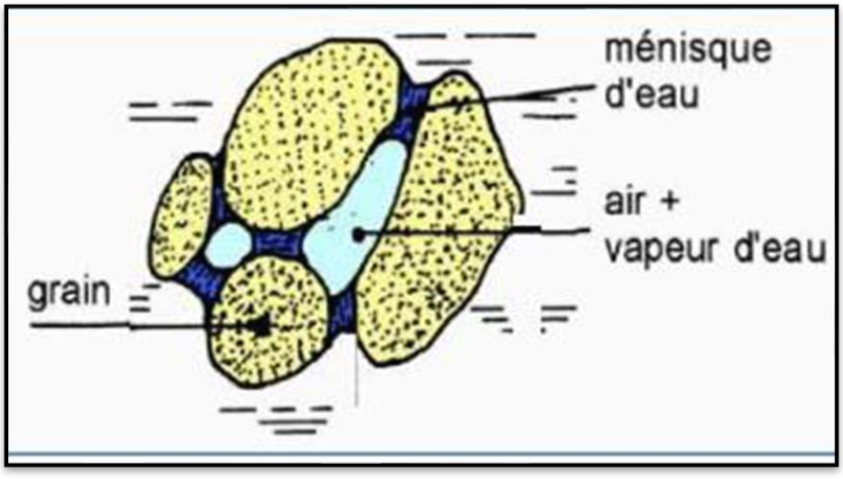


Fig 01 : Constituants D'un Sol. [2]

Le squelette solide influence le sol par un effet de la taille des grains. L'eau peut circuler ou non entre les particules solides d'un sol. Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Lorsqu'il n'ya pas d'eau, le sol est dit sec.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide**. [5]**

1.3 L'eau et le sol

La phase liquide est aussi importante que celle solide dans un sol par sa texture granulaire, le sol constitue un bon réservoir pour cette eau, qui se vide et se remplit continuellement. Lors des précipitations, l'eau tombant sur le sol s'infiltre, ruisselle ou s'évapore. L'eau peut se retrouver temporairement entrainée par la pesanteur dans la macroporosité, sans qu'elle soit retenue c'est l'eau de gravitation. Elle est retenue dans le sol sous plusieurs formes (eau de constitution, inter-feuillets, liée et libre) tel que :
Une eau absorbée qui forme un film à la surface des agrégats, c'est l'eau pelliculaire.

Une eau qui imprègne les colloïdes d'argile et d'humus, c'est l'eau d'imbibition.

Une autre eau qui occupe la microporosité, c'est l'eau capillaire.

L'eau de rétention gravite continuellement entre ces trois parties. Le point dit de ressuyage est atteint lorsqu'il ne reste plus d'eau de rétention dans le sol. Plus les éléments du sol sont fins et plus ils retiennent d'eau. La capacité de rétention en eau est la quantité d'eau retenue en sol ressuyé, en grammes d'eau pour cent grammes de terre fine et sèche. Elle dépend donc essentiellement de la texture, (sol sableux : 20g/100g de terre, sol argileux : de 56~80g/100g de terre).

L'eau de gravitation s'infiltre en fonction de la perméabilité du sol, cette vitesse dépends de la texture et de la structure, (terre argileuse peu perméable : 0.6 cm/h, terre sableuse très perméable : 55cm/h**). [5]**

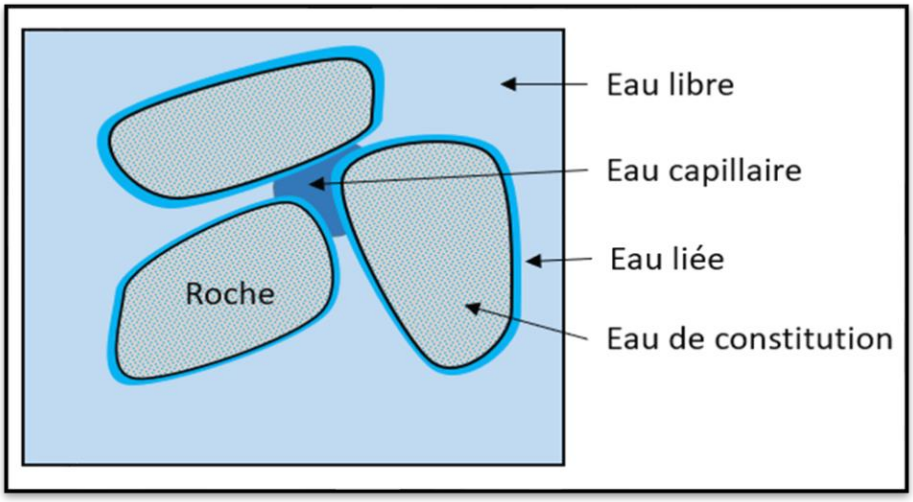


Fig 02 : Phase liquide retenue dans un sol. [11]

1.4 Les différents type des sols fins

1.4.1 Les argiles

C'est un sol d'assise pour un grand nombre de construction qui est en effet issue de la décomposition de roches sédimentaires, c'est une vraie richesse millénaire qui n'est pas près de s'épuiser et elle contient des particules fines de diamètre inférieur à 2µm et qui contient des

minéraux argileux ou tout autre minéral chargé négativement comme la smectite. On distingue deux catégories des argiles :

- **Argiles plastiques :** qui sont déformables et molles.
- **Argiles raides :** qui ont un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité et cela à cause de la présence des carbonates et des quartzs**. [6]**

1.4.2 Les silts et les limons

Les limons, constitués de silt, de lœss et de loehm, possèdent un squelette siliceux à silico calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles, la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et donc à éviter pour les fondations**. [4]**

1.4.3 Les marnes

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques .On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- Les Marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium.
- Les Marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de à 65 % et 65 à 95 %.

Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque déformation de fontis.

On peut conclure que l'évolution des sols fins est dus à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles….etc. qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques**). [6]**

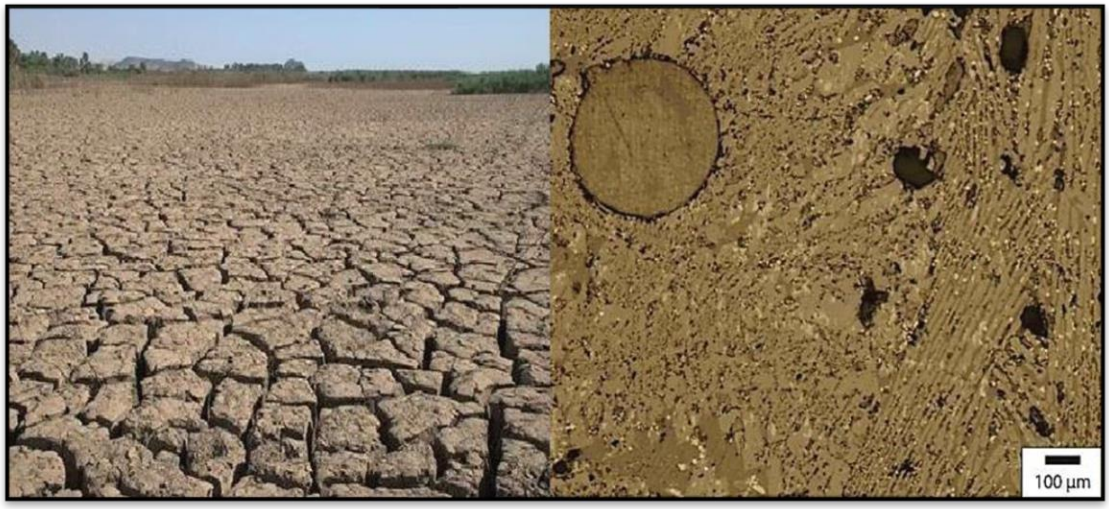
1.5 Minéralogie des sols

Un minéral est une substance inorganique naturelle et homogène ayant une composition chimique connue et des propriétés physiques caractéristiques et particulières. Les sols sont constitués de particules de minéraux sous une forme stable ou en décomposition. Les différents minéraux des sols sont le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas, les carbonates (calcite ou dolomite), les oxydes et les hydroxydes métalliques. Les minéraux peuvent être sous forme de grains polygonaux, de lamelles (les argiles, agrégats). Les propriétés dépendent dans une certaine mesure de l'assemblage de ses minéraux (cohésion) ou microstructure. Les minéraux silicatés représentent 95% des constituants de l'écorce terrestre.

D'un point de vue purement chimique, l'argile est composée d'environ 50% de silicates d'alumine hydratés. Elle contient de nombreux minéraux en majorité silice, aluminium, fer, magnésium, calcium, cuivre, sodium, potassium, manganèse, **…... [6]**

1.6 Microstructures des sols

Une distinction doit être faite entre les notions de texture et microstructure. Le terme de texture d'un sol est employé dans le sens de l'étalement de la courbe granulométrique d'un sol. Ceci revient à relier ce terme avec la notion de teneur en argile. La notion de microstructure correspond à celle de la géologie c'est-à-dire d'un arrangement mutuel des particules de minéraux qui constituent le sol**. [6]**



A : Limon en vue macroscopique **B : Limon à l'échelle microscopique**

Fig 03 (A, B) : Microstructure de limon. [10]

1.7 Microstructure des argiles

L'argilite est une roche sédimentaire composée pour une large part de minéraux argileux, en général des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée (phyllo-silicates) expliquant leur plasticité, ou fibreuse (sépiolite et palygorskite) expliquant leurs qualités d'absorption**.[1]**

La cellule de base des minéraux argileux est appelé cristallite elle est constituée d'un feuillet (layer) et d'un inter feuillet (inter layer) appelé aussi espace inter foliaire. Chaque feuillet est lui-même formé de la superposition de deux ou trois couches (Sheets) cristallisées.**[6]**

Fig 04 : Photographiques au microscope électronique à balayage des argiles. [6]

1.7.1 Classification des minéraux argileux

La classification des minéraux argileux est généralement basée sur les critères suivants :

- Type de feuillet.
- Charge globale du feuillet.
- Nature des cations inter foliaires.

Quelques critères secondaires sont le polytypisme (ou mode d'empilement), la composition chimique, le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les espèces inter stratifiés régulières ou désordonnées. Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi 4 groupes. **[7]**

- **Feuillets en tétraèdre (de silice) :** Le feuillet en Tétraèdre noté « T » est une combinaison d'unités Tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un atome unique de silicium, l'épaisseur des feuillets en Tétraèdre est de 3 Å**. (Fig 05).**

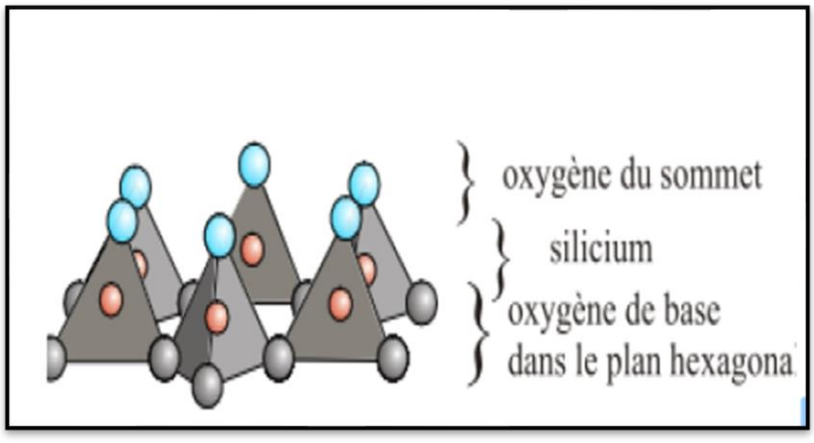


Fig 05 : Structure du tétraèdre SiO4. [8]

- **Feuillets en octaèdre (ou d'alumine)** : Le feuillet en octaèdre noté « O » est une combinaison d'unités octaédrique composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyde entourant un atome d'aluminium Al3+ , de magnésium Mg2+ , de fer ou d'un autre élément son épaisseur est de 4 Å **(Fig 06). [6]**

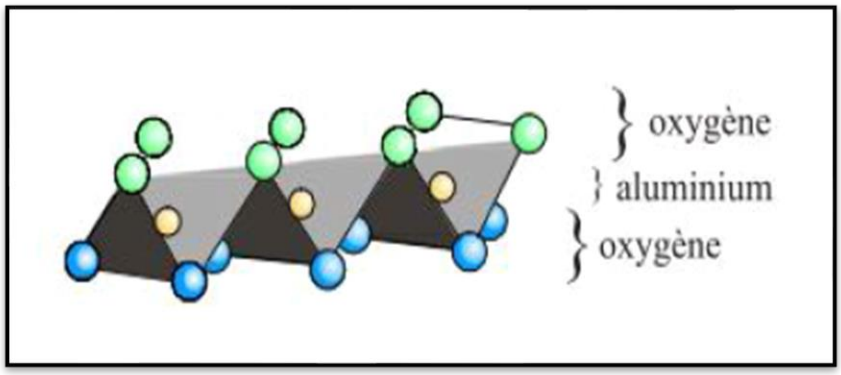


Fig 06 : Structure de l'octaèdre Al2O6. [8]

- **Le type de feuillet T O (1:1) :** formé d'une couche de tétraèdres T surmontée d'une couche d'octaèdres O. Son épaisseur est de 7 Å. Ces feuillets sont reliés aux autres feuillets par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets. **[6]**
- **Le type de feuillet T O T (2:1) :** Formé d'une couche d'octaèdre O entourée de deux couches de tétraèdre T. son épaisseur est de 10 Å. Les couches tétraédriques peuvent soit contenir des atomes de silicium et d'oxygène, soit présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Dans ce cas, les feuillets présentent un déficit en charges positives (substitution Si4+ par Al3+). **[6]**

La différence entre les types d'argiles réside dans leur structure interne soit en feuillets ou une structure fibreuse cette distinction est importante car elle influe sur les pouvoirs d'absorption et d'adsorption de chaque type d'argile. La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant :

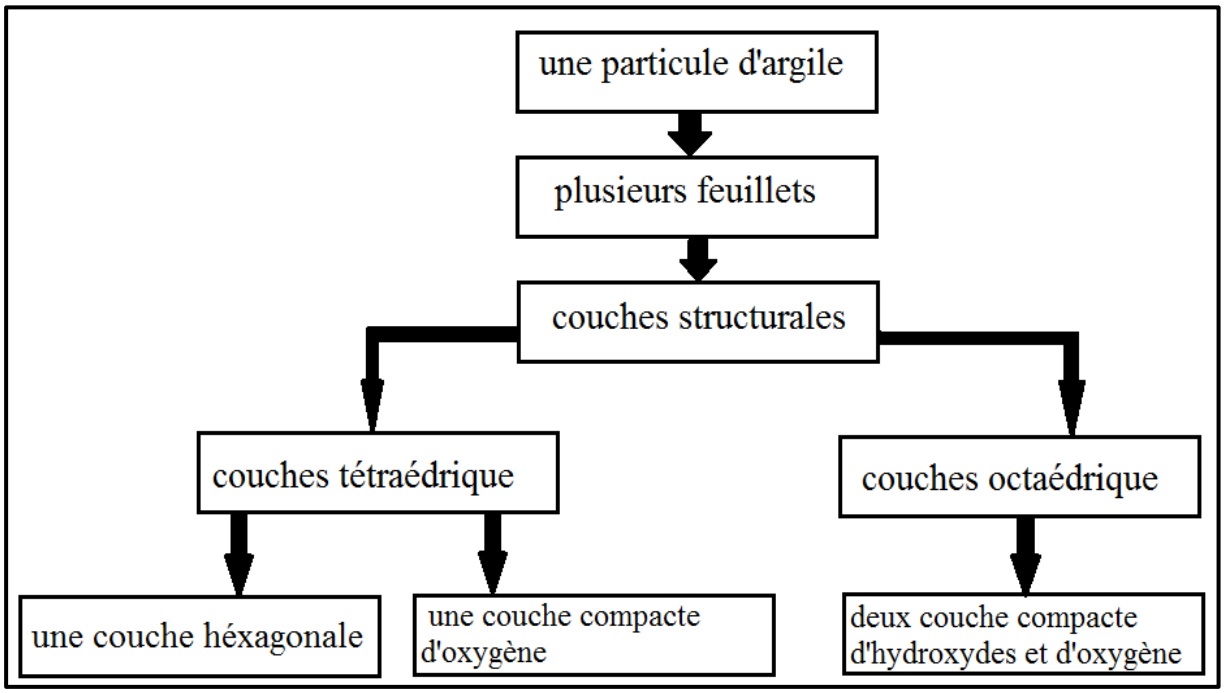


Fig 07 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile[6].

1.8 Principaux groupes de minéraux argileux

Parmi les principales argiles monocouches évoquées dans la littérature sont : la Kaolinite, la Montmorillonite et l'Illite**. [6]**

1.8.1 La famille de la kaolinite (T-O)

La kaolinite est constituée d'une succession alternée de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite)**. [1]**

A une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres, l'épaisseur du feuillet élémentaire, est de 7 Å. Ces feuillets élémentaires adhérents assez fortement entre eux par leurs faces basales, des liaisons hydrogènes existant entre les oxhydryles de la base d'un feuillet et les oxygènes du haut du feuillet en dessous. Il constitue ainsi une particule primaire, qui comprend de 70 à 100 feuillets accolés. La formule générale d'un feuillet de Kaolinite est donnée par la formule suivante : n (Al2 Si2 O5 (OH) 4). La structure de la Kaolinite est donnée dans la figure suivante**. [6]**

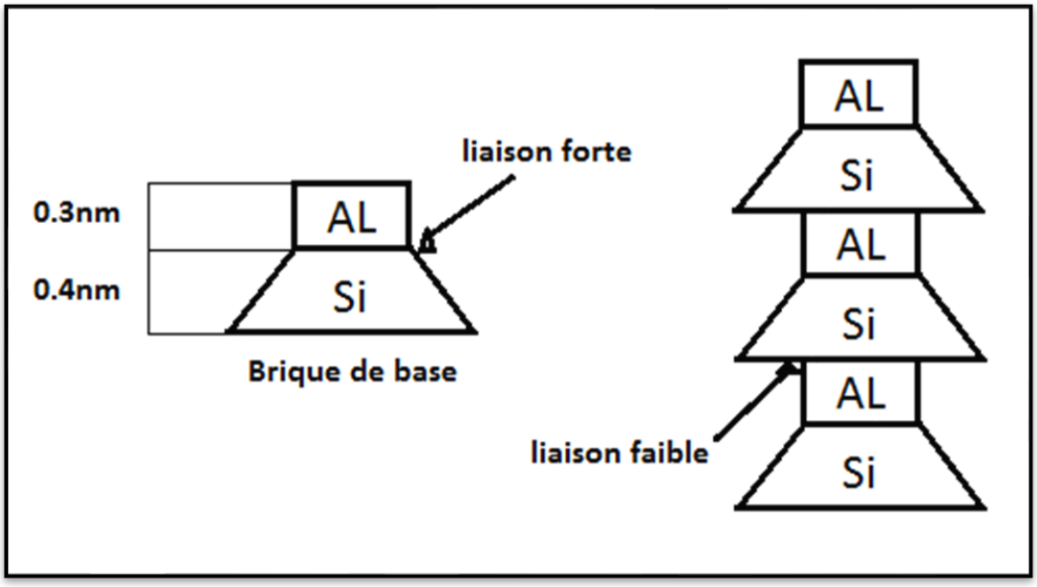


Fig 08 : Structure de la Kaolinite. [1,6]

1.8.2 La famille des micas (Les Illites) (T-O-T)

Les illites sont des particules de dimensions plus petites que la kaolinite de diamètre équivalent moyen de 0,3 µm, et d'une épaisseur de 10Å. Les feuillets d'équidistance sont assez fortement liés les uns aux autres par des ions potassium (K+), l'équidistance est donc constante. La structure de l'illite ressemble à celle de la montmorillonite. La différence provient de ce que l'aluminium remplace à 20 % le silicium dans les tétraèdres et que des atomes de potassium venant rétablir l'équilibre des charges rompu par le remplacement, assurent la liaison des couches tétraédriques et octaédriques. Cette liaison est suffisante pour empêcher l'eau de s'insérer à l'inter- couche et l'illite n'est pas donc une argile très gonflante. **[6]**

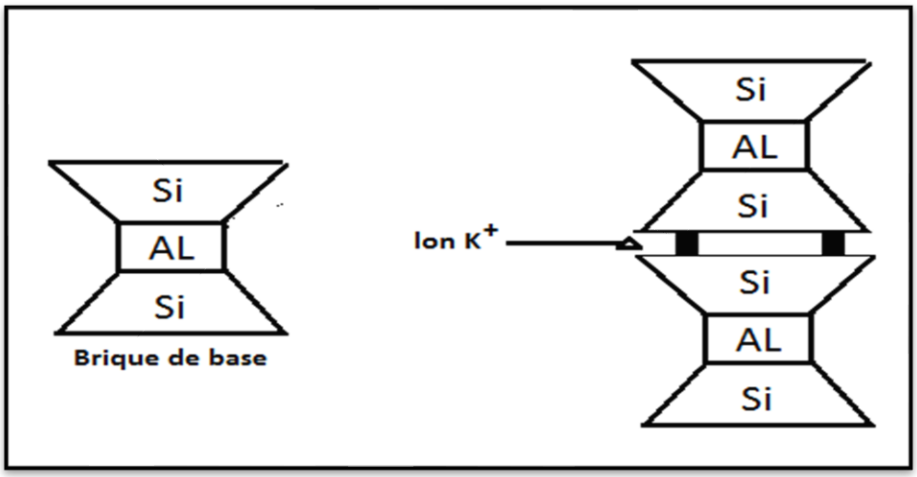


Fig 09 : Structure de l'illite. [1]

1.8.3 La famille de montmorillonite (T-O-T)

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets, épais de 10 Å, sont très faiblement liés les uns aux autres, aussi des couches d'eau peuvent se fixer entre les feuillets, l'épaisseur de ces couches pouvant atteindre 9 Å. La montmorillonite peut exister sous la forme de cristaux isolés épais de 10 Å. Pour la vermiculite, l'absorption d'eau est limitée à 2 couches de molécules d'eau. La formule générale de la montmorillonite est la suivante. Les smectites, ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques. Elles sont formées dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement. [**6]**

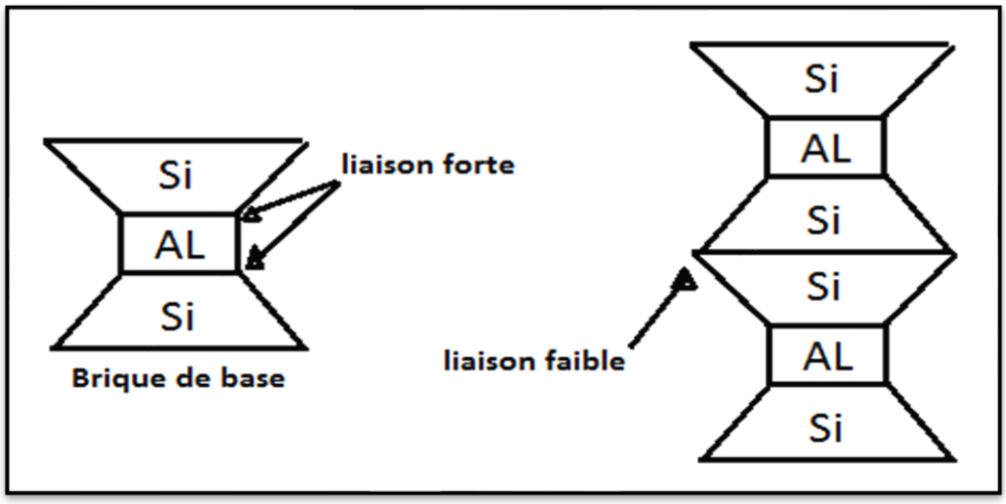


Fig 10 : Structure de la montmorillonite. [1]

1.8.4 La famille de chlorites (T-O-T)

Les chlorites sont des argiles de composition semblable à celle des smectites. L'espace inter foliaire contient une couche composée de magnésium (Mg2+) et d'ions hydrogène (OH-).

L'Aluminium (Al3+) est remplacé localement par le fer (Fe2+), la liaison inter foliaire est, de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau (figure 7). Les chlorites existent parfois dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires.

Les argiles contenant un pourcentage de chlorite supérieur à 15% peuvent être sujettes de gonflement. [1]

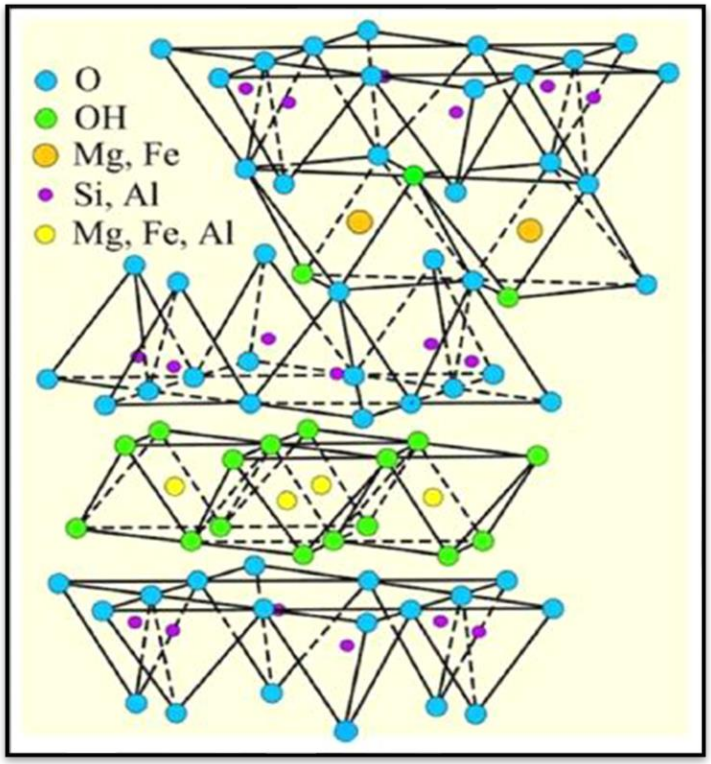


Fig 11 : feuillet du chlorite. [1,6]

1.9 Les problèmes liés aux sols fins

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie, l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, de tassement et de glissement**. [9]**

1.9.1 Phénomène de gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs)**. [3]**

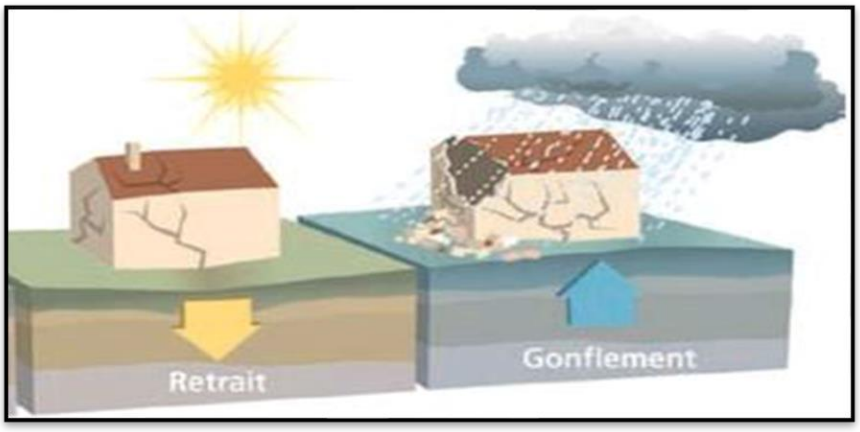


Fig 12: le risque retrait-gonflement des argiles. [2]

1.9.2 Tassement

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place**. [6]**

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation**. [9]**

Les exemples les plus courants des conséquences des ruptures des sols sur des ouvrages avoisinants sont des ruptures de pieux de fondations des ouvrages d'art, des déversements de culées ou de murs de soutènement, des dégradations d'ouvrages enterrés, etc. Les conséquences des effets dus aux tassements sont surtout sensibles aux abords des ouvrages d'art, notamment dans le cas de remblais d'accès après la réalisation de pieux de fondations des appuis, surtout s'il y a des chargements successifs. Les surcharges verticales proches de zones de pieux peuvent entraîner le phénomène bien connu de frottement négatif opéré par le sol qui se tasse le long du pieu en l'entrainant vers le bas**. [2]**

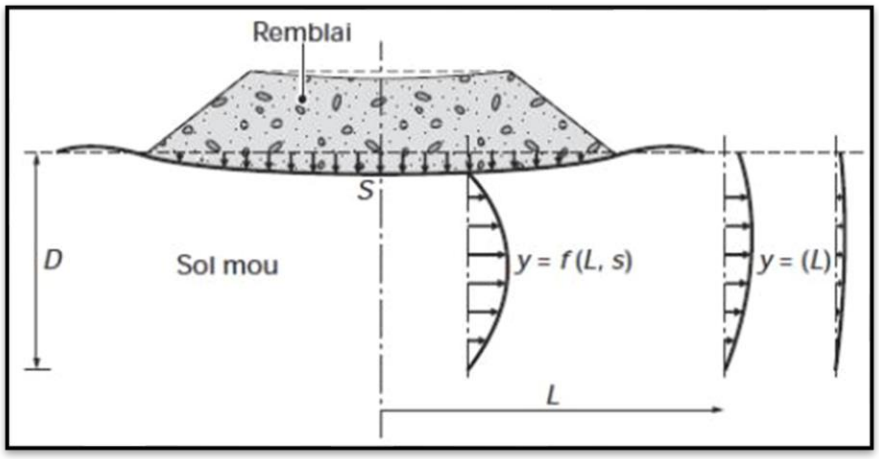


Fig 13 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation. [2]

1.9.3 Glissement

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites**. [3]**

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques mètres par an à quelques millimètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant**. [6]**

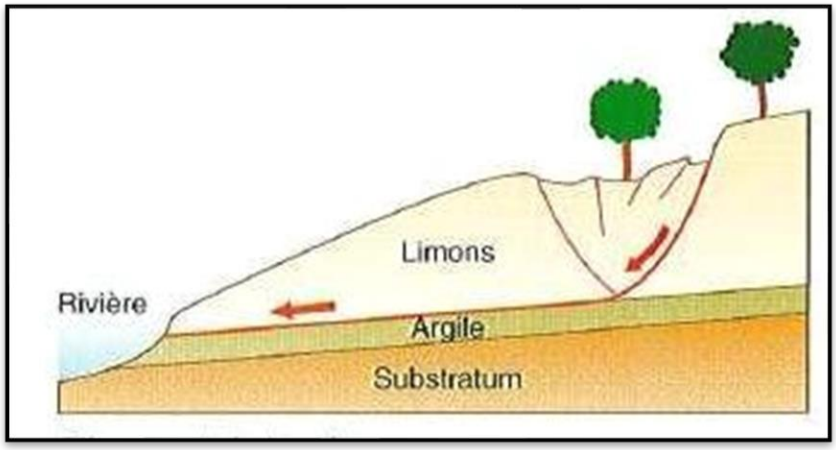


Fig 14 : Glissement de terrain. [2,6]

1.9.4 Erosion des sols

L'érosion des sols fins est un phénomène important en géotechnique, car il peut entraîner des problèmes de stabilité des structures souterraines et des fondations. Ce phénomène est caractérisé par le transport de particules du sol, qui peuvent être érodées par l'eau, le vent, ou d'autres forces environnementales. Les sols fins sont particulièrement susceptibles à l'érosion En raison de leur faible cohésion, de leur porosité élevée et de leur faible densité. Les processus d'érosion peuvent être influencés par de nombreux paramètres, tels que la vitesse de l'eau, le type de sol, la teneur en eau du sol, la pente du terrain et les propriétés du sol. **[10]**

Fig 15 : l'érosion de sol. [2]

Fig 16 : Une photo réelle représentant l'effondrement du pont à Jijel en raison de l'érosion hydrique. [10]

1.10 Quelques cas pathologiques

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries**. [9]**

1.10.1 Cas des bâtiments

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants : Fissuration des structures, distorsion des ouvertures, rupture des canalisations et décollement des bâtiments. **[6]**

Fig 17: Déformation structurelle due au gonflement du sol à Al-Khod(Oman). [9]

1.10.2 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus

facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche. **[6,9]**

Fig 18 : Déformation d'une chaussée de sol instable. [9]

1.11 Système de classification de sol

Les systèmes de classification des sol ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines.

Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement**. [1]**

- Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols, parmi elles on peut citer: Les classifications élémentaires qui se réfèrent uniquement à la granularité du sol (triangulaire) ou aux seuils granulométriques (dimensions des particules). Classification LCPC/USCS (on utilise simultanément la granularité et la plasticité du sol).
- Classification GTR et ASHTOO (pour les terrassements routiers). **[1]**

1.11.1 Classification élémentaire

A) Classification basée sur la granulométrie

Les courbes granulométriques couvrent de large variation des dimensions des particules des sols. Les sols peuvent être classés selon les différentes parties de l'échelle des dimensions des particules appelés « classes granulaires ». Ces intervalles ont des noms différents selon les classifications et les pays. Le tableau ci-dessous compare trois de ces classifications. La classification de la Société Internationale de Mécanique des sols et des Travaux de Fondations (SIMSTF, 1977), utilisée par les normes Britanniques et Allemandes et dans certaines normes Américaines, est progressivement adoptée par de nombreux pays. **[2]**

SIMSTF (1977)		France (traditionnelle)	
Dimensions	Nom	Dimensions	Nom
> 200 mm	Blocs	> 200 mm	Blocs
60 à 200 mm	Galets, cailloux	20 à 200 mm	Galets, cailloux
20 à 60 mm	Gravier grossier	2 à 20 mm	Gravier
6 à 20 mm	Gravier moyen		
2 à 6 mm	Gravier fin		
0,6 à 2 mm	Sable grossier	0,2 à 2 mm	Sable grossier
0,2 à 0,6 mm	Sable moyen	20 à 200 µm	Sable fin
0,06 à 0,2 mm	Sable fin		
20 à 60 µm	Limon grossier	2 à 20 µm	Limon
6 à 20 µm	Limon moyen		
2 à 6 µm	Limon fin		
< 2 µm	Argile	< 2 µm	Argile

Tableau 01 : Dénomination des fractions granulaires des particules de sols. [2]

B) Classification triangulaire

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol. (Fig19). Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols.

Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle. Utilisons le diagramme de la figure 19 pour classer un sol comportant 41% d'argile, 42% de sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnait ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols. **[2]**

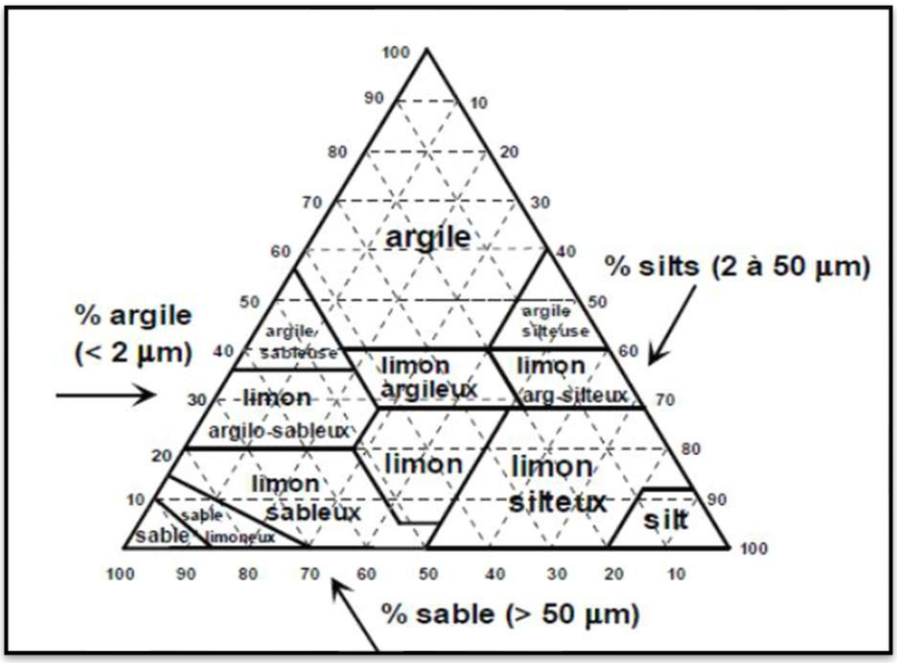


Fig 19 : classification triangulaire. [2]

1.11.2 Classification USCS/LCPC

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- Des critères granulométriques : les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisât à 2 mm et 0,08 mm) ; la forme de la courbe granulométrique : coefficient d'uniformité Cu, coefficient de courbure Cc.
- Les caractéristiques de plasticité W_L et IP, et la ligne A d'équation IP = 0,73 (W_L – 20) (diagramme de plasticité).
- La teneur en matières organiques.
- La classification débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres. La figure donne la classification des sols fins et le tableau la classification des sols grenus. La classification LPC/USCS présente l'avantage d'être d'un maniement relativement simple et d'être utilisée dans de nombreux pays autres que la France**. [1]**

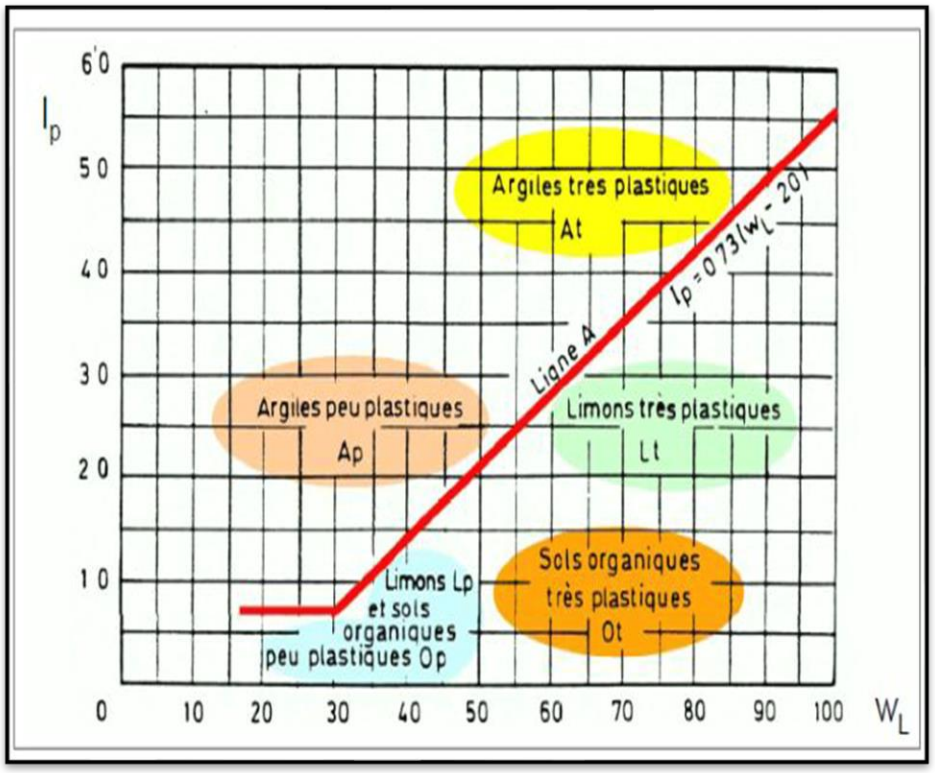


Fig 20 : Classification des sols fins (USCS/LCPC). [1,2]

Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_U = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < C_Z = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (figure 14)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A (figure 14)	Grave argileuse
Sable	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_U = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < C_Z = (D_{30})^2/D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A (figure 14)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A (figure 14)	Sable argileux
Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5 et 12 %, on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL.					

Tableau 02 : Classification des sols grenus (USCS/LCPC). [1]

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier. **[1]**

1.11.3 Classification GTR

Une classification particulière des sols est utilisée en France pour les travaux de terrassements routiers. Cette classification, dite classification du Guide de Terrassements Routiers (GTR), définit des classes de sols corrélées avec l'aptitude au compactage des matériaux en fonction des conditions de chantiers et leur comportement mécanique ultérieur. Elle tient compte des mêmes caractéristiques de base que la classification LCPC/USCS, mais elle est beaucoup plus précise pour les particules argileuses, qui ont une grande influence sur la conduite des terrassements, et tient compte de l'altérabilité des matériaux au cours du temps. Les principes généraux de cette classification sont présentés sur les figures ci-dessous. **[2]**

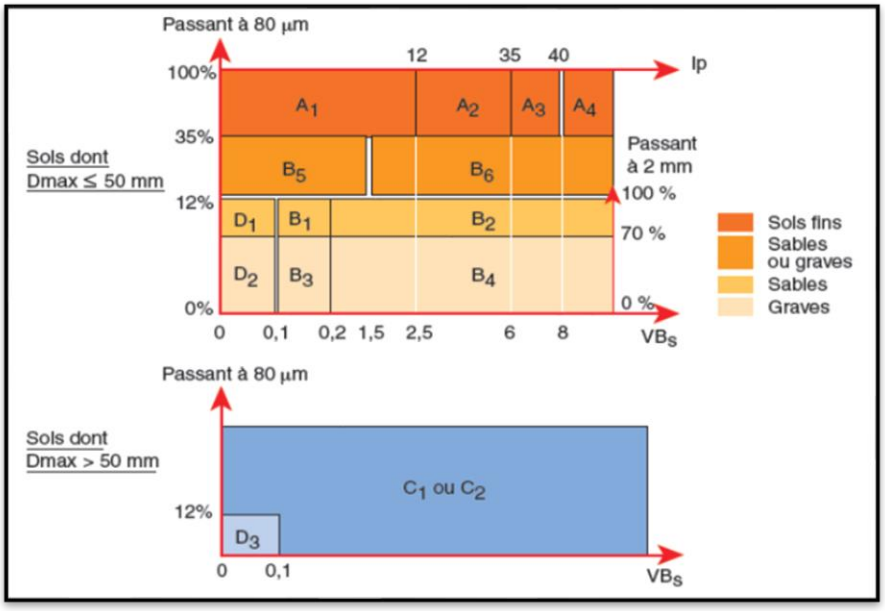


Fig 21 : Classification GTR des sols avec Dmax < 50 mm. [2]

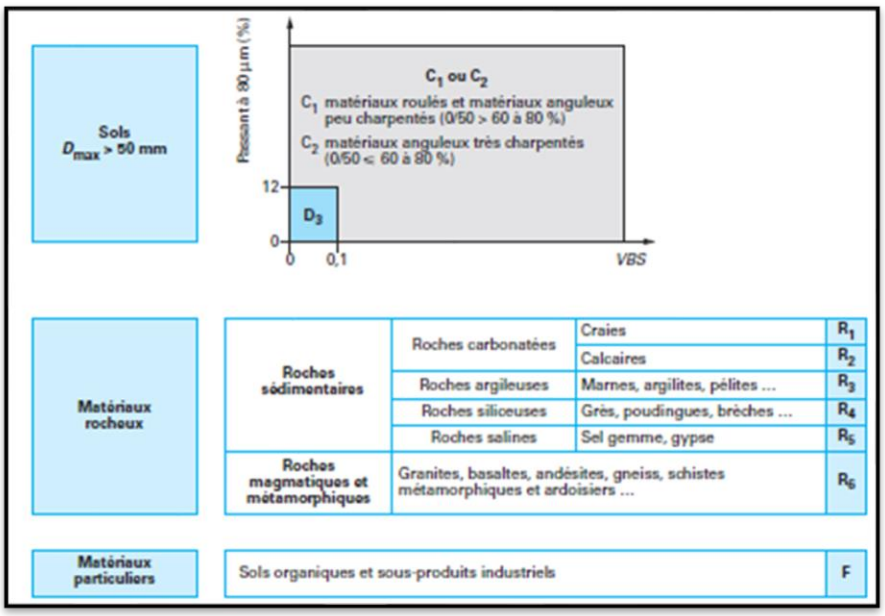


Fig 22 : Classification GTR des matériaux avec Dmax > 50mm, matériaux rocheux et particuliers. [1]

1.11.4 Classification AASHTO

La classification AASHTO (Américain Association of States Highway and Trasportation Official) est une version plus élaborée de la classification de Terzaghi (1929). Elle trouve son application essentiellement en géotechnique routière**.**

Le tableau suivant indique les fractions de sol reconnues par l'AASHTO. Bien que les blocs doivent être exclus des échantillons à classifier, il faut néanmoins noter leur pourcentage relatif. Les particules fines sont siliceuses si la valeur de Ip est inférieure à 10, et argileuses si elle est supérieure à 10. **[1]**

Fraction de sol	Echelle de grandeur
Bloc	Plus de 75 mm
Gravier	De 75 mm à 2.0 mm (tamis n°10)
Sable grossier	De 2.0 mm (tamis n°40) à 0.425 mm (tamis n°40)
Sable fin	De 0.425 mm (tamis n°40) à 0.075 mm (tamis n°200)
Silt et/ou argile	Moins de 0.0075 mm (tamis n°200)

Tableau 03 : Définition du gravier, du sable, du silt et de l'argile selon le système de l'AASHTO. [1]

Dans le système de classification de l'AASHTO, on trouve huit groupes de sol (A-1à A-8) et quelque sous-groupe. Les seuls essais qu'il est nécessaire d'effecteur sont l'analyse granulométrique et les essais de limites de consistance. Le tableau ci-dessous fourni la classification de l'AASHTO utilisée de nos jours. **[1]**

Les sols grenus sont classés dans catégories A-1 à A-3 de la catégorie A-1 sont bien étalés alors que ceux de la catégorie A-3 sont des sables propres et à granulométrie uniforme. Quant à ceux de la catégorie A-2, ils contiennent un pourcentage significatif de particules fines (jusqu'à 35 % de particules passant le tamis n° 200). Dans les catégories A-4 à A-7, On trouve des limons et des argiles ; leur classification repos sur les limites d'Atterberg. Les zones contenant les valeurs de W_L et de Ip proposent à chacun des groupes A-4 à A-7 et des sous-groupes de A-2. On classe généralement les sols fortement organiques (les tourbes, par exemple) dans le groupe A-8 comme dans système USCS, les sols A-8 sont classés d'après un examen visuel. **[1]**

General Classification	Granular Materials (35% or Less Passing 0.075 mm)			Silt-Clay Materials (More than 35% Passing 0.075 mm)			
Group Classification	A-1	A-3[a]	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
Sieve analysis, percent passing:							
2.00 mm (No. 10)	—	—	—	—	—	—	—
0.425 mm (No. 40)	50 max.	51 min.	—	—	—	—	—
0.075 mm (No. 200)	25 max.	10 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of fraction passing 0.425 mm (No. 40)							
Liquid limit	—	—		40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.	N.P.	*b*	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
General rating as subgrade	Excellent to good			Fair to poor			

Tableau 04 : Tableau de classification AASHTO. [1]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appris sur les types de sols fins, en particulier l'argile et ses types et caractéristiques, ainsi que les problèmes auxquels il est confronté en plus des méthodes de classification des sols.

La gravité de ces problèmes a poussé les chercheurs à mener de nombreuses recherches afin de trouver des techniques de stabilisation plus efficaces et respectueuses de l'environnement, et ça ce que nous avons abordés dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

Les techniques de stabilisation des sols fins

Introduction

Les sols fins, tels que l'argile, le limon et le sable fin, sont souvent peu résistants au gonflement ou à l'effondrement. Ils ont également une faible capacité portante. On peut améliorer ces caractéristiques en utilisant différentes techniques de stabilisation, en fonction de la nature du sol et du type de projet à réaliser.

Les chercheurs ont mené des études et des recherches afin de trouver des solutions et des méthodes pour stabiliser les sols fins, en améliorant leurs propriétés géotechniques. Les méthodes varient entre les méthodes mécaniques, chimiques et même thermiques.

Dans ce chapitre, nous allons mettre le doigt sur ces méthodes dans toutes leurs variétés.

2.1 But de la stabilisation

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité);
- Colmater les vides que l'on peut supprimer;
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, et de diminuer la sensibilité à l'eau. **[13]**

2.2 Types de stabilisation

2.2.1 Stabilisation chimique

Le traitement chimique des sols est un processus qui consiste à utiliser des produits chimiques pour améliorer les propriétés du sol. Ce processus est utilisé dans le monde entier et est l'une des méthodes les plus communes pour améliorer les propriétés du sol.

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'utilisation des additifs seuls ou combinés est actuellement très largement employée dans la plupart des pays du monde. Ces derniers sont classés en trois grandes familles (BEKKOUCHE et al, 2001) :

- Les hydrophobes.
- Les liants.
- Les matériaux inertes. **[13]**

Il est nécessaire de réaliser des tests appropriés pour connaître la nature physique du sol afin de déterminer le fixateur approprié pour le sol expansif. Ces conditions se traduisent par le contenu en eau, le pH et le type d'argile, comme indiqué dans la figure. **[12]**

2.2.1.1 Stabilisation hydrophobants

La stabilisation des sols hydrophobes est un processus qui rend les sols résistants à l'eau en ajoutant des matériaux hydrophobes. Ces matériaux sont composés de molécules ayant des parties polaires et non polaires. Les parties polaires des molécules attirent l'eau, tandis que les parties non polaires la repoussent.

Les parties non polaires de ces matériaux se lient aux particules du sol, ce qui empêche l'eau d'interagir avec le sol. Cela entraîne une diminution de l'affinité du sol pour l'eau.

Cette opération est utilisée pour stabiliser les sols gonflants, Voici quelques exemples de matériaux qui peuvent être utilisés dans la stabilisation des sols hydrophobes :

- Les huiles minérales
- Les silicones
- Les polymères synthétiques (géotextiles)

2.2.1.2 Stabilisation par ajout du sable

C'est vers les années 70 que des chercheurs ont commencé à étudier l'influence de l'ajout de sable sur les sols gonflants. De nombreuses études scientifiques ont montré qu'on peut stabiliser les sols par ajout de sable. Cependant, des cas pratiques de projets de stabilisation rapportés dans la littérature sont plutôt rares. Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur le gonflement. Nous citerons certaines d'entre eux **: [6]**

- **Satyanarayana, 1969**, cité par allam, 2011 a étudié le comportement de l'argile de black Cotton au sud de l'inde sous forme de mélange avec le sable, et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50% de sable). L'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement en proportion appréciable due principalement à la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. Cette capacité du sable dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou, par mouvement latéral.
- **Komornik et Livneh, 1969**, cité par allam, 2011 ont étudié l'influence de la granularité des constituants sur les caractéristiques des argiles gonflantes. Pour cela, ils ont utilisé des mélanges argile - sable et argile- marbre à différents pourcentages. Il a été constaté que la diminution du taux du gonflement des différents mélanges est due à la faible densité de l'argile et à l'augmentation du matériau inerte dans les mélanges. Ainsi, ils ont constaté qu'il y a une influence du taux de l'humidité de l'argile sur la valeur de la pression du gonflement.
- **Moraux, 1969** a montré dans sa thèse que, si la couche gonflante est d'une grande épaisseur, de manière à ne pas pouvoir l'excaver complètement alors, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis, remblayer pour rétablir les conditions de pression initiale. Pour cela, souvent c'est le sable qui est utilisé. Le bas du remblai est faiblement compacté et ce pour deux raisons :
  - Le haut du sol gonflant serait très compact, et par conséquent son potentiel de gonflement est élevé.
  - Le bas du remblai peut alors «encaisser » un gonflement éventuel.
- **Seed et al, 1969,** cité par ALLAM, 2011 ont retenu trois paramètres significatifs de l'aptitude au gonflement d'un sol : Le pourcentage d'éléments argileux inférieur à 2µ et leur nature minéralogique, l'indice de plasticité et l'indice de retrait. Les auteurs ont mesuré le potentiel de gonflement de sols artificiels préparés en Mélangeant des minéraux argileux avec diverses quantités de sables. Ce mélange permet de diminuer le pourcentage. **[13]**

- **El-sohby et el-Sayed (1981)** ont été traité les argiles expansives d'Egypte avec du sable et du limon en vue d'étudier l'influence de la finesse des éléments non argileux sur le potentiel et la pression de gonflement.
- **Louafi (1997)** a été montré l'effet du sable sur le taux et la pression de gonflement d'une bentonite. Elle a également mis en évidence l'effet marqué de la taille et de la forme des grains qui composent le sable utilisé.
- **Bengraa (2004)** a étudié l'évolution du potentiel et la pression de gonflement d'une argile par ajout de sable à des granulométries différentes et à différents taux de sable. Il a noté une réduction importante du gonflement. Plus le sable ajouté est grossier, plus la réduction du gonflement est importante**. [6]**

2.2.1.3 Stabilisation par liants

La stabilisation des sols fins par liants est une technique efficace et durable qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et géotechniques des sols fins. Elle consiste à mélanger un liant avec du sol, éventuellement avec une quantité d'eau, jusqu'à obtenir les propriétés souhaitées.

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie. **[8]**

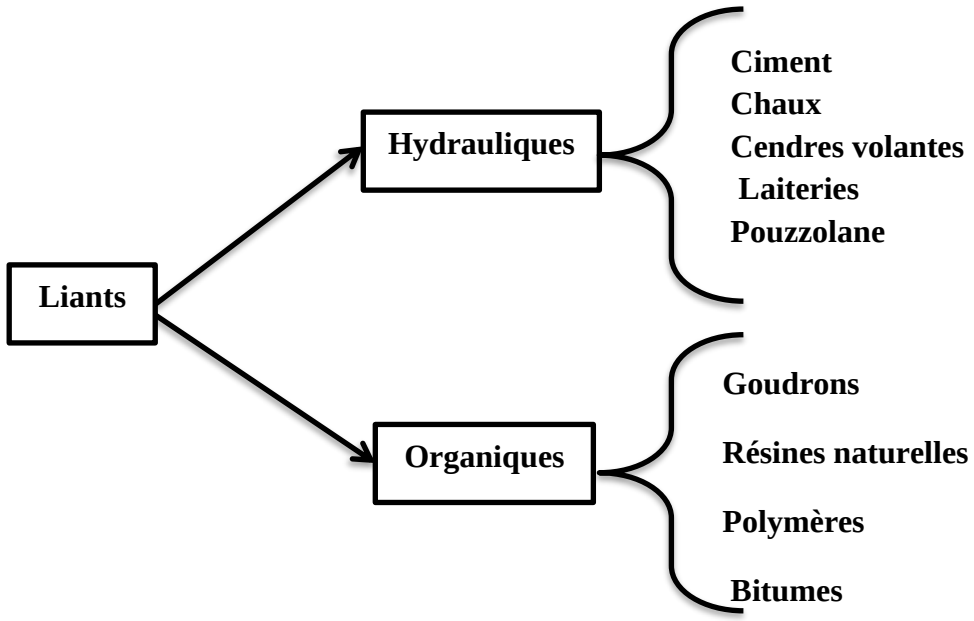


Fig 23 : Classification des liants. [8]

2.2.1.3.1 Liants Organiques

Ce sont des produits de type colle, c'est à dire des composés organiques susceptibles d'une bonne adhésion au squelette. On distingue deux sortes :

- Les mono-composants (un seul constituant) ont un caractère thermoplastique, ce sont par exemple les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille.
- Les bi-composants (deux constituants) sont à mélanger au moment de la mise en œuvre.

Le résultat est intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères, des résines ou des dopes. L'action de ces produits donne au sol des propriétés hydrophobes qui dépendent de l'enrobage des particules du sol par le liant.

L'inconvénient majeur de ces liants organiques est leur biodégrabilité sous des climats tropicaux. **[8]**

a. Stabilisation par polymères

Les polymères sont attirés par la surface des argiles quand ils portent des charges positives, et par les extrémités des feuillets quand les charges qu'ils portent sont négatives. La grande taille de ces molécules, permet une sorte d'en capsulage qui limite l'hydratation ultérieure de l'argile**. [8]**

Hachichi. et al 2005, cité par allam, 2011, ont traité des argiles de Sidi Chahmi et de Mers El Kébir en présence des Polymères ils ont conclu qu'une forte concentration en polymères a pour effet de diminuer le gonflement final. **[8]**

2.2.1.3.2 Liants hydrauliques

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux qui réagit avec l'argile par : Echange cationique, floculation et agglomération, carbonations et la réaction pouzzolanique. Ces réactions se traduisent par :

- Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique.
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction pouzzolanique. [6]

a. Stabilisation aux cendres volante

Les cendres volantes sont considérées comme une pouzzolane artificielle, elles sont produites dans les centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. [**12]**

Dans la stabilisation des sols, les cendres volantes s'emploient dans une large gamme comme telle avec de la chaux ou le ciment à cause de leurs caractéristiques. **[12]**

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

Zalihe, 2004, cité par allam, 2011 a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités.

Le traitement par les cendres volantes change la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires. **[8]**

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent tout dépendant du type de sol, l'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule (Davidson, 1962). Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air, mais également dans l'eau (Lav et al, 1997) avec un bon dosage. L'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement ((Davidson, 1962); Hadi. 1999; Lav et al, 1997). **[12]**

Fig 24: Poudre de Sodeline.

Fig 25 : Sodeline® au microscope à balayage électronique (×2000). [14]

b. Stabilisation par solutions salines

Des types de sels tels que (carbonate de calcium, hydroxyde de calcium, chlorure de calcium, chlorure de sodium et chlorure de potassium) sont utilisés dans la stabilisation des sols argileux car ils interagissent avec les minéraux argileux présents dans le sol. Ces interactions peuvent conduire à la formation de nouveaux minéraux, augmentant ainsi la densité du sol, ou à la modification des propriétés des minéraux existants, améliorant ainsi sa force, sa stabilité, sa perméabilité réduite et sa capacité de gonflement et d'érosion réduite. La quantité de sels ajoutés au sol varie en fonction du type de sol et de l'objectif du traitement. Si le sol est argileux, il nécessite une quantité plus importante de sels.

De nombreux travaux ont montré que la stabilisation par sels pouvait réduire considérablement le gonflement des argiles. Nous citerons quelques exemples de ces travaux :

- **Peele, 1937,** cité par allam, 2011 a remarqué que le carbonate de calcium augmente la résistance du sol à l'érosion. Il permet d'augmenter le potentiel floculé des argiles.
- **Haxaire, 1956,** cité par allam, 2011 a déterminé la quantité de la molécule organique pouvant se fixer sur la montmorillonite en essayant de relier cette fixation avec la structure, la nature et l'ionisation de ces molécules. Des familles de molécules organiques ont été ainsi étudiées. Il a montré aussi que certaines molécules telles que la guanidine et la benzine se fixent irréversiblement en quantités supérieures à la capacité d'échange de base sur la montmorillonite.
- **Waller et Lawler, 1976**, cité par azzouz ,2011 ont étudié l'influence des sels sur un échantillon d'argile reconstituée à partir de déblai de forage. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide des solutions qui associent le Kcl avec un polymère.
- **Iltis,1979** a étudié plusieurs types de gonflement en présence de plusieurs types de sels. Cette étude a mis en évidence deux agents stabilisants, le chlorure de potassium et le chlorhydrate de guanidine.
- **Komine et Ogata, 1992,** cité par mrad, 2005 ont étudié l'efficacité d'un sel à partir du concept de l'épaisseur de la double couche diffuse. Même si certaines recherches plus récentes, ont montré qu'il ne s'agissait que d'un aspect très partiel du phénomène. Le degré de saturation, étant fixé et la composition chimique du sol argile-silice sec ont été analysés par l'ajout d'un taux de sodium dans un échantillon et un taux du calcium dans un autre. Cette expérience a montré que le potentiel de gonflement est plus important dans des échantillons riches en sodium par rapport aux échantillons riches en calcium ; c.à.d. le sodium .est un facteur chimique favorable pour le gonflement du sol.
- **Hachichi et Fleureau, 1999** ont étudié la réduction du gonflement de plusieurs échantillons intacts par les sels (le chlorure de potassium, le chlorure de calcium, le Chlorure de sodium, le sulfate de sodium, le chlorure d'ammonium). Une réduction importante du gonflement a été obtenu avec le chlorure de potassium et le chlorure de calcium ce qui donne une structure stable même après passage de l'eau.
- **Azzouz, 2006** a étudié la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen, ils ont observé que l'effet de la diversité de concentration saline n'influe pas sur la pression de gonflement, aussi l'influence de valence sur l'amplitude de gonflement à un effet très prononcé par rapport à l'effet de la concentration saline, ils ont constaté qu'un fort pourcentage des concentrations salines peut de réduire le temps de la stabilisation. **[8]**

c. Stabilisation par ajout chaux

- **La chaux :** Le terme « chaux » désigne les produits issus de la calcination du calcaire. Ou autrement dit, il désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaitre l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium Ca(OH) 2 et Mg(OH) 2.

Le calcaire est extraits des carrières ou d'autres gisements (calcaire maritime), ces blocs sont concassés, puis criblés de façon à acquérir un calibre de pierres compatible avec le type de four utilisé. La cuisson du calcaire est appelée calcination, elle permet d'obtenir la chaux. **[13]**

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

préférée car elle fournit plus d'ions de Ca2+, elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau important (BEKKOUCHE et al, 2001)**. [15]**

Fig 26 : Aperçu de la chaux. [14]

- **Stabilisation par la chaux :** La stabilisation par ajout de chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue. De nombreuses études ont montré que la stabilisation des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité stabilise leurs volumes après gonflement et retrait. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. La consolidation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures**. [6]**

  L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol. **[15]**

- **Actions de la chaux**

1) Floculation : L'ajout de chaux à des grains fins d'argiles cause une floculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat (un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent pour former d'autres grains de grande taille.

Donc, la floculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation. **[16]**

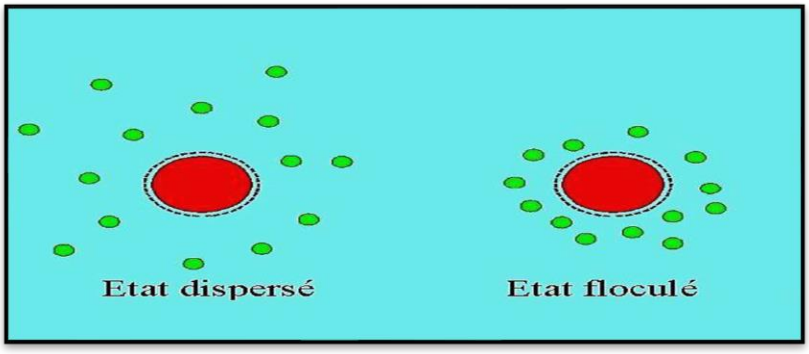


Fig 27 : Le nuage de cation autour de la micelle qui représente la dispersion et la floculation. [12]

2) Carbonatation : La chaux Ca(OH) 2 se carbonate par absorption du dioxyde de carbone de l'air (CO2) pour former du carbonate de calcium CaCO3 un faible agent de cimentation. Cette réaction n'est possible qu'en présence d'eau. Elle est représentée comme suit :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Habituellement, le compactage après une courte durée de malaxage permet de minimiser ce fait mais c'est nuisible qu'utile dans la stabilisation du sol**. [12]**

3) Réaction pouzzolanique : C'est la formation de certains types d'agents de cimentation ou de solidification comme les hydrates de silicate de calcium et les aluminates de calcium lorsque le calcium de la chaux réagit avec les aluminates et les silicates solubilisés de la surface d'argile.

Les réactions pouzzolanique peuvent s'écrire globalement comme suit :

$$CaO + SiO_2 + H_2O \rightarrow \quad CSH$$

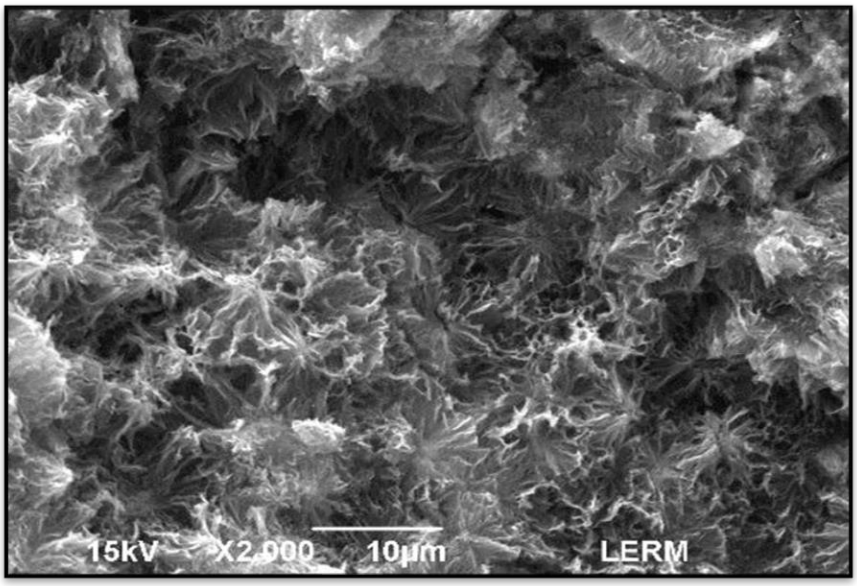


Fig 28: C-S-H à l'échelle microscopique. [12]

Cette réaction peut commencer rapidement. Toutefois, la réaction pouzzolanique à terme peut se poursuivre pendant très longtemps, voire même des années. Ainsi, certains sols peuvent produire des gains de solidité très élevés lorsqu'ils sont traités à la chaux. La clé de la réactivité pouzzolanique et de la stabilisation est un sol réactif et un bon protocole de formulation. La stabilisation peut entraîner une augmentation substantielle des valeurs des modules de résilience, des améliorations très importantes de la résistance au cisaillement, un gain de solidité qui se poursuit avec le temps, et une durabilité à long terme pour des décennies de service. Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol chaux. **. [12]**

4) Échange cationique : L'addition de chaux engendre un excès de cations de calcium divalents qui tendent à remplacer les cations monovalents (Na+ et K+). Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions, c'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules. Tout ceci se traduit par une baisse du gonflement. **[15]**

- **Action de la chaux sur les argiles :** Les argiles sont des minéraux généralement issus de l'altération des roches. On les trouve dans les sols, sédiments, roches sédimentaires, ainsi que

dans les zones d'altération hydrothermales. Ce sont principalement des phyllo silicates. C'est-à-dire qui présente sous forme de feuillets d'aluminium plus ou moins hydraté et de petite taille. Les feuillets sont constitués de couches de tétraèdres SiO4 et de couches d'octaèdres Al(OH)6, reliées par les atomes O2+ et OH- mis en commun.

L'aptitude des minéraux argileux à adsorber des molécules d'eau, dans l'espace inter foliaire varie d'un type d'argile à l'autre. Elle est à l'origine de la sensibilité des argiles à l'eau.

Lorsqu'on mélange de la chaux vive avec un sol argileux humide, elle s'hydrate rapidement en fixant une quantité d'eau. **[16]**

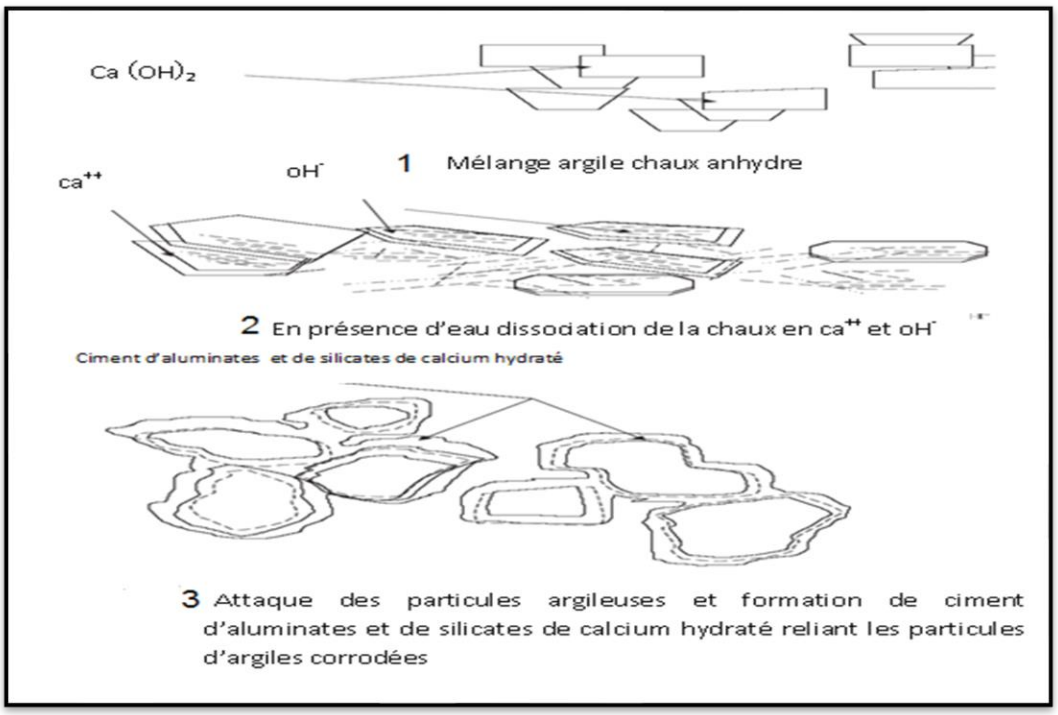


Fig29 : Schéma montrant l'action de la chaux sur l'argile. [8]

- **Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol :** Les injections ou le malaxage du sol avec de la chaux réduisent fortement le phénomène de retrait/gonflement des sols cohérents pour les voiries, parkings, bâtiments ou ouvrages d'art.
  - ✓ Malaxage sur place **:** Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement, on distingue les étapes principales suivantes : **[16]**

1) Préparation du sol : il s'agit d'une scarification dont le but est soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification. L'exécution de cette opération, qui n'est pas toujours nécessaire, s'effectue à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue.

2) Epandage : la technique de l'épandage "au sac" sur des plateformes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée (< 250 m2) ou de géométrie complexe.

Dans les autres cas, la répartition de la chaux est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule.

L'épandage de chaux doit être réalisé avec un maximum de précision et de régularité.

La chaux est chargée pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir de la citerne de transport, soit via des silos-tampons installés sur chantier.

3) Malaxage : cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'y incorporer la chaux de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixers, de rotobêches, de charrues à disques ou à socs.

Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé.

Sur sites sensibles au niveau des poussières, il est recommandé d'utiliser des malaxeurs de type pulvimixers à chambre de malaxage fermée.

4) Compactage : le compactage des matériaux traités intervient après un éventuel nivellement en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs, qu'ils soient à pneus, vibrants ou à pieds dameurs.

En cas de sol humide, il est recommandé de réaliser le compactage 2 à 4 heures après le malaxage, afin que la chaux vive eue le temps d'assécher le sol au maximum.

Lorsqu'il y a risque de pluie, il est recommandé de fermer le sol avant toute précipitation. **[16]**

Fig 30(1 ; 2) : Technique de malaxage. [16]

Fig 31(3 ; 4) : Technique de malaxage. [16]

- ✓ Technique d'injection **:** La méthode décrite en 1973 par WRIGHT permet de traiter les argiles expansives sous forme d'un système d'injection sous pression de chaux liquide. Le procédé a aussi pour but de minimiser les tassements différentiels, d'améliorer la capacité portante des argiles silteuses, de réduire le gonflement et l'érosion des argiles hautement plastiques cité par BEKKOUCHE et al, 2001.Après perforation autour de la construction,

on injecte un coulis de chaux sous pression dans le sol : la chaux pénètre dans les fissures existantes et dans celles créées par la pression elle-même.

Les différentes réactions chimiques qui se produisent donnent naissance à de nouvelles espèces de minéraux qui forment une barrière dans le sol empêchant ainsi toute circulation d'eau sous la zone de la construction. Les pressions d'injection sont de l'ordre de 350 à 1380 KPa et dépendent des conditions du sol à traiter. Le coulis sera injecté en utilisant des pipes d'injection de 38 à 41mm de diamètre et qui peuvent aller jusqu'à une profondeur de 40m. **[15]**

Fig 32: Technique d'injection. [16]

- ✓ Technique de pieux de chaux **:** La technique des pieux de chaux est la méthode la plus performante et la moins coûteuse pour le traitement des sols expansifs. Ceci est d'autant plus efficace si le sol est saturé car l'affinité de la chaux à l'absorption d'eau diminue la teneur en eau de celui-ci. Les pieux sont installés à l'aide de tubes métalliques de diamètre variant entre 250 et 500mm, de profondeur variant entre 5 et 8m et d'espacement entre axes de pieux variant entre 1.5 et 2.5m. Le tube est d'abord introduit dans le sol jusqu'à la profondeur voulue puis vidé ensuite retiré. C'est à ce stade que le vide laissé par le tube remplie de pierres de chaux cité par, BEKKOUCHE et al, 2001**. [15]**

d. Stabilisation par ajout ciment

- **Le ciment :** est généralement fabriqué en cuisant vers 1450-1550 C0 des mélanges de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnes d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland.

D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles. L'utilisation des ciments permet d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques par liaison des grains du sol. **[13]**

Fig 33 : Aperçu du ciment [14]

- **La stabilisation par ciment :** est une technique couramment utilisée dans la géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques des sols fins. Elle consiste à mélanger du ciment avec le sol fin, ce qui provoque une réaction chimique d'hydratation.

Lorsque le ciment est ajouté au sol fin, il réagit avec l'eau présente dans le sol pour former des composés chimiques solides. Cette réaction chimique d'hydratation conduit à la formation de cristaux de silicate de calcium hydraté, qui agissent comme des liants solides entre les particules du sol (Braja M. Das, Khaled Sobhan., 2017).

Les liaisons formées par cette réaction chimique améliorent la résistance et la rigidité du sol. Le sol traité devient plus cohérent et résistant à la compression, ce qui augmente sa capacité portante. Cela est particulièrement bénéfique pour les fondations et les structures qui nécessitent une résistance élevée pour supporter des charges importantes.

En plus, d'améliorer la résistance mécanique, la stabilisation par ciment peut également réduire la sensibilité du sol aux variations d'humidité. Les composés chimiques formés lors de l'hydratation du ciment réduisent la plasticité de l'argile, ce qui limite les déformations excessives du sol en réponse aux changements d'humidité (Braja M. Das, Khaled Sobhan., 2017). **[10]**

L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température (JOHSON, 1960). De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient, comme pour la chaux, de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement de sols de surface (THOMAS et al, 2002). **[15]**

- **Actions du ciment :** Le ciment portland comporte des silicates, aluminium et sulfates de calcium. Lors de l'hydratation, le ciment forme de la chaleur éteinte appelée portlandite. Les

réactions entre le sol, le ciment et l'eau commencent par un échange de cations puis la production d'agents de cimentation. **[12]**

L'essai d'Emiettage est qualitatif, basé sur l'observation à l'œil. L'effet de l'additif est remarquable car l'ajout de ciment va diminuer le taux de dispersion pour des pourcentages qui accroitent de 2% à 8%, mentionné par (Bouziane, 2014). **[12]**

Le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir :

- L'échange cationique,
- La floculation et l'agglomération de l'argile,
- L'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques**. [9]**

Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées**. [9]**

- **Méthode de stabilisation au ciment :** Il existe deux méthodes d'exécution des stabilisations des sols au ciment
  - ✓ Mixe in place **:** On répand le ciment et l'eau sur le sol auquel on les mélange au moyen de machines mobiles. Puis on compacte la couche traitée. Cette méthode s'applique pour la stabilisation du terrain naturel en place et souvent également pour celle d'une couche de matériaux d'apport.
  - ✓ Mixe in plant **:** Le mélange s'exécute dans un malaxeur à béton, fixe ou mobile. Ce procédé n'est intéressant que si les matériaux à stabiliser proviennent d'un emprunt et doivent être transportés. Le mélange est répandu mécaniquement sur les chantiers importants ou à bras s'il s'agit de petites surfaces; il est ensuite soigneusement compacté.). **[12]**

2.2.2 Stabilisation par les fibres

Depuis peu de temps, des fibres sont ajoutées dans le sol pour améliorer le comportement de la résistance des sols (Cai et al., 2006). L'utilisation de déchets de fibres comme renforcement a un énorme potentiel dans un matériau recyclable dans le domaine de la construction, (Savastano et al, 2005).

Depuis des décennies, des fibres naturelles ont été utilisées dans le domaine de la stabilisation des sols (Nilsson 1975 ; Gram, 1983). Et récemment, ce sont des fibres artificielles qui sont ajoutées dans des sols fins pour renforcer leur résistance, (Akbulut et al., 2007).

Les résultats obtenus par les auteurs montrent que des fibres de polypropylène mélangées peuvent améliorer la résistance en compression, diminuer le taux de gonflement et le taux de retrait avec la chaux dans des échantillons de sol de type argileux de Nanjing (Chine), voir la Figure. **[14]**

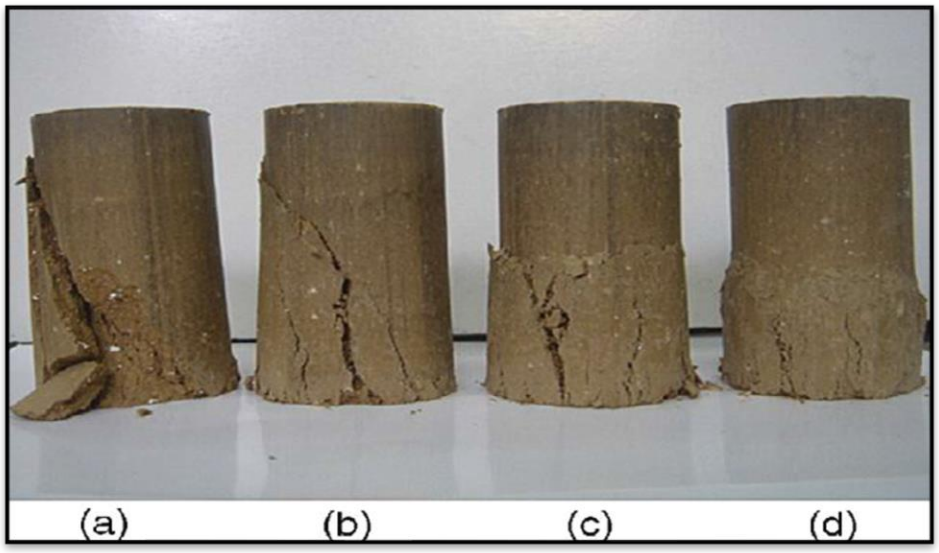


Fig 34 : Ruptures d'écrasement des éprouvettes avec 8% de chaux et différents dosages en fibres : (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15%, (d) 0.25%, après 7 jours. [14]

2.2.3 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure**. [3]**

2.2.3.1 Stabilisation par compactage

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal.

Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur optimale en eau (WOPN) permettant l'obtention la densité sèche du sol la plus élevée (γd OPN) sont utilisées lors des études de la stabilisation et aussi lors du chantier. La granulométrie, la morphologie des particules du sol et la teneur en argile, ont une influence sur le comportement du sol lors du compactage. En raison de leur petite taille (quelques microns) les particules d'argiles permettent d'augmenter la densité sèche du sol en comblant sa porosité**. [13]**
Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodromes. **[6]**

Il y a trois types de compactage :

- Une pression exercée par un rouleau compacteur (Compactage de surface).
- Une masse qui chute sur une hauteur donnée (Compactage Dynamique).
- Une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur (ou grue) (Vibro-Compactage)

2.2.3.1.1 Compactage de surface

Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. La vibration peut produire une densification additionnelle dans les sols présentant une cohésion. Le compactage provient d'un accroissement de la compacité du sol, et celui-ci est dû à un meilleur arrangement des

grains et élimination des vides. Des études expérimentales montrent qu'un compactage approprié des sols réalisé sur des remblais ne tassera pas ou tasseront très peu. Il y a donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que laboratoire se propose de déterminer. **[9]**

Fig 35 : Compactage de surface. **[6]**

Le compactage de surface est utilisé généralement pour une profondeur maximale d'environ 3m. Pour des profondeurs supérieures on utilise les types de compactage profond suivants : Compactage dynamique, Vibro compactage.

2.2.3.1.2 Compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre (Lawton, 2004). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées. **[9]**

Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau. **[6]**

Fig 36 : Chantier d'un compactage dynamique profond. **[9]**

2.2.3.1.3 Vibrocompactage

Le procédé de vibro-compactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximums de plus de 50 m. C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative. Ce procédé de Vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables Silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localise de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfie. Les grains se réarrangent en un état plus dense. **[6]**

Fig 37 : Le Vibro-Compactage. [6]

2.2.3.2 Stabilisation par drainage

Le drainage est la technique la plus simple, c'est une méthode classique et ancienne. Plusieurs achèvements sont utilisés comme les tranchées drainant, drains de carton et drains de sables verticaux. **[12]**

2.2.3.3 Stabilisation par substitution

En géotechnique consiste à remplacer les sols fins instables par des matériaux granulaires plus stables, tels que du sable ou du gravier. Cette méthode vise à renforcer la structure du sol en remplaçant les particules fines qui ont une faible capacité portante ou des propriétés mécaniques défavorables par des matériaux granulaires plus résistants, Le remplacement des sols fins par des matériaux granulaires présente plusieurs avantages. Les matériaux granulaires ont généralement une meilleure capacité de drainage, une résistance mécanique plus élevée et une moindre sensibilité aux variations d'humidité par rapport aux sols fins. Par conséquent, la substitution permet d'améliorer la stabilité du sol, sa capacité portante et sa résistance aux déformations excessives. **[10]**

2.2.3.4 Stabilisation par application de fortes pressions

Une technique utilisée pour améliorer la résistance et la capacité portante des sols fins. Cette méthode consiste à appliquer des pressions élevées sur le sol afin de favoriser sa densification et sa consolidation. **[10]**

L'application de fortes pressions peut être réalisée de différentes manières, notamment à l'aide de rouleaux vibrants, de presses hydrauliques ou de machines spéciales conçues pour exercer des charges élevées sur le sol. L'objectif principal de cette technique est d'augmenter la densité du sol, de réduire les vides entre les particules et de renforcer la structure globale du sol. **[10]**

2.2.3.5 Stabilisation pré humidification

Elle consiste à augmenter la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, nous aurons donc le maximum de gonflement, Chen (1988) [48] cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes :

- Le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction.
- Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement.
- Il fout donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée. **[13]**

2.2.3.6 Colonne ballastée

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillages réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée. Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que de la nature du sol à traiter.

Cette technique est utilisée dans les sols cohérents tels que limons et argiles. Le dispositif de forage est composé d'un tube prolongé en partie basse par un vibreur électrique ou hydraulique. Ce dispositif est foncé dans le sol à l'aide du vibreur et crée ainsi une empreinte en refoulant le terrain

jusqu'à la base du massif à consolider. L'introduction latérale du ballast à la base du vibreur est réalisée soit gravitairement soit à l'aide d'une pompe à graviers. Ce remplissage est effectué par couches successives tout en maintenant la vibration afin de compacter le ballast et de continuer à refouler le sol. Dans certains cas particuliers, il est possible de procéder à un remplissage complémentaire de coulis bentonite-ciment simultanément à la mise en place du ballast à l'aide d'un tube latéral. L'ensemble de ces opérations est réalisé par passes remontantes sur la totalité de la hauteur de terrain à consolider.

L'amélioration de sol par colonnes ballastées consiste à mettre en œuvre un « maillage » de colonnes constituées de matériaux ou graveleux, amenant une densification des couches compressibles et les rendant aptes à reprendre des charges issues de fondations. Le traitement d'un sol par colonnes ballastées conjugue les actions suivantes :

- Augmenter la capacité portante du sol.
- Diminuer les tassements totaux et différentiels.
- Diminuer le temps de consolidation par création d'éléments drainant.
- Diminuer les risques induits par les phénomènes de liquéfaction lors des séismes**. [9]**

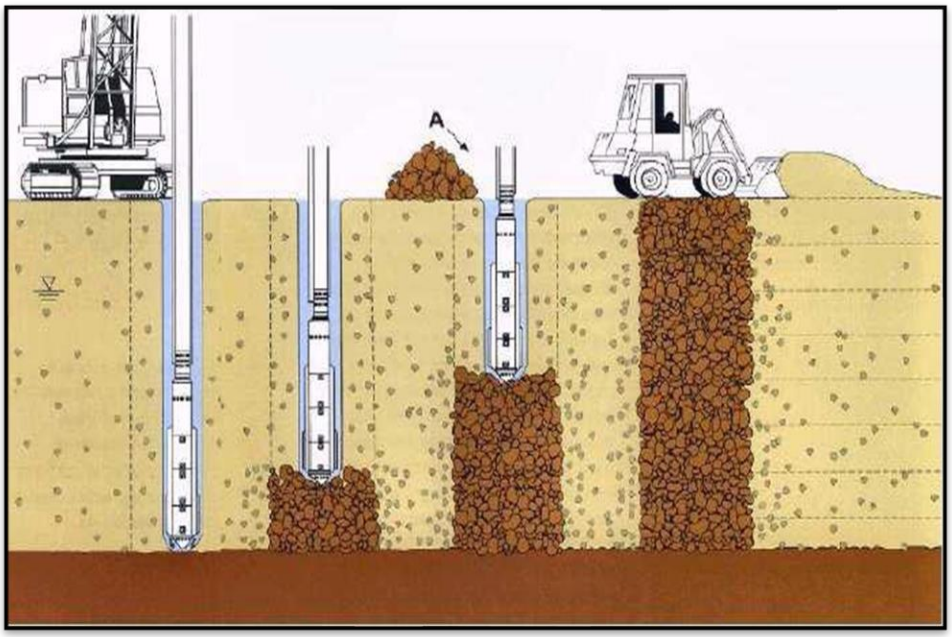


Fig 38 : Colonnes ballasté. [9]

2.2.4 Méthodes thermiques

Est une technique utilisée pour renforcer les sols fins en modifiant leurs propriétés physiques et mécaniques grâce à l'application de chaleur.

Cette méthode vise à réduire la sensibilité des sols fins aux changements d'humidité et à améliorer leur stabilité et leur résistance (Mitchell, J.K. and Santamarina, J.C., 2005).

L'application de la chaleur peut être réalisée de différentes manières, telles que l'utilisation de la vapeur, des injections d'air chaud ou l'application de courants électriques. En chauffant le sol fin, on induit une série de transformations physiques, notamment la réduction de la plasticité, la

2.3 Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation

Dans le tableau suivant, on donne les principaux avantages et inconvénients de chaque technique :

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation Mécanique	Compactage	-Le compactage est le plus économique. -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une wn élevée).
	Substitution		-L'épaisseur de la couche. -Disponibilité du matériau.
	Préhumidéfication		-Le temps de l'opération. -La distribution uniforme de wn.
	Méthode de contrôle	-Minimiser l'humidification ou dessèchement.	-La sensibilité à la variation de la teneur en eau.
Stabilisation Thermique		-Réduire la répulsion électrique entre les particules.	Très coûteuse
Stabilisation chimique (par l'ajout des matériaux)	Les sels	-Augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -Réduire le phénomène d'échange.	-Le choix du type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).
	Ciment	-Augmenter la résistance. -Diminuer la plasticité. -Réduire le potentiel de variation de volume. - Augmenter la limite de retrait.	-Utilisation d'un dosage important.
	Chaux	-Diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement. -Augmenter la résistance et wopm. -Utilisation d'un faible dosage.	-Carbonatation de la chaux.

Tableau 05 : Avantages et Inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées. [8]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discutés des types de techniques de stabilisation les plus répandues, telles que la stabilisation mécanique, thermique et chimique.

Le choix de la technique de stabilisation appropriée dépend de plusieurs facteurs à prendre en compte, tels que : La nature du sol à stabiliser, la durée du processus de stabilisation, les considérations économiques, la taille du projet et les exigences environnementales.

Il est important d'étudier les impacts négatifs sur l'environnement, en particulier dans le cas de la stabilisation par l'ajout de produits chimiques au sol.

Les techniques de stabilisation des sols fins sont essentielles pour garantir la stabilité des structures et des projets divers, et il est important de choisir la technique appropriée avec soin après avoir pris en compte tous les facteurs influents.

Et dans notre projet de recherche on a choisi la stabilisation chimique d’argile avec un taux de ciment, puis déterminer l’effet de cet ajout sur les caractéristiques du sol objet d’étude.

Chapitre III :

Essais réalisés et procédures expérimentales

Introduction

Ce travail de recherche vise à identifier une solution durable au problème des sols argileux dans l'Algérie. L'utilisation du ciment comme agent de traitement est étudiée en profondeur. L'objectif principal est de réduire ces problèmes à des niveaux acceptables pour la sécurité des structures, tout en améliorant les propriétés physico-mécaniques de ces sols.

Ce chapitre se focalise sur l'étude géotechnique approfondie des matériaux constitutifs (argile et ciment) au niveau de laboratoire LTPO. Un programme d'essais complet est établi pour caractériser les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques des échantillons d'argile de Bordj Bounaama.

3.1 Situation géographique des sols étudies

L'argile choisi a été prélevés d'un site de Bordj Bounaâma est située dans la wilaya de Tissemsilte ; Nord-ouest de la wilaya de Tiaret ; Située à environ 48 km au nord de la circonscription de Tissemsilte.

Fig39 : Situation géographique des sols étudie.

3.2 Caractéristiques de ciment ajouté

On a utilisé un ciment portland composé (CPJ - CEMII/ A 42,5) qui est constitué de 80 % à 94% de clinker, en plus d'autres composants comme le calcaire. leur caractéristique illustré dans le tableau 06 :

Caractéristique physico-mécaniques			Caractéristique chimique	
Désignations	Unité	Garantie NA.442	Eléments	Garantie NA.442
Début de prise	Min	> 1h :00	SO3	< 3.5%
Expansion à chaud	Mm	< 10	Cl	<0.1%
Retrait (28 jours)	µm/m	< 1000		
Résistance à la compression (2 jours)	Mpa	≥ 12.5		
Résistance à la compression (28 jours)	Mpa	≥ 42.5 ≤ 62.5		

Tableau 06 : Caractéristique physico-mécaniques et chimique de ciment utilisé.

3.3 Caractéristiques d'argile (Les essais réalisés au laboratoire)

Du point de vue de la géotechnique, les essais préliminaires sont essentiels et d'une importance capitale. Ces essais permettent de déterminer les propriétés du sol, qu'elles que soient physiques, mécaniques et chimiques.

Fig 40 : l'argile utilisée dans cette étude.

Dans le cadre de ce travail, les essais suivants ont été effectués au niveau de Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest -Tiaret- (LTPO) :

- Détermination de la teneur en eau.
- Analyse granulométrique.
- Analyse Sédimentométrie.
- Essai des limites d'Atterbeg.
- Essais Bleu de méthylène.
- Essai Proctor normal.
- Essai de cisaillement.
- Essai oedomètrique.
- Essai chimique.

3.3.1 Les essais chimiques

L'objectif des analyses chimiques est de déterminer la nature et les proportions des substances chimiques dans le sol étudié. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire des travaux publics de l'Ouest -Tiaret- (LTPO).

3.3.1.1 Essais Bleu de méthylène

- **But de l'essai**

Déterminer la quantité de bleu de méthylène requise pour saturer un sol. Cette quantité est proportionnelle à la surface spécifique du sol, elle-même étroitement liée à son activité biologique et chimique.

- **Principe de l'essai**

L'objectif de cet essai est de déterminer la capacité d'absorption d'un échantillon de granulats de fraction 0/2 mm. Pour cela, on met en place un dispositif où l'échantillon est immergé dans un bain aqueux et on injecte progressivement des doses croissantes d'une solution de bleu de méthylène. La quantité maximale de bleu de méthylène absorbée par les granulats avant que la solution ne commence à surnager correspond à la capacité d'absorption du matériau.

- **Matériel nécessaire**
  - Agitateur à ailettes.
  - Papier filtre.
  - Balance.
  - Chronomètre.
  - L'eau distillée.
  - Bleu de méthylène.
- **Mode opératoire**
  - Prélever 80 grammes de sol sec préalablement tamisé à 5 mm.
  - Immerger la prise d'essai dans un bécher contenant 100 cm^3 d'eau distillée.
  - Disperser la suspension à l'aide d'un agitateur réglé à 700 tours par minute pendant 5 minutes.
  - Ajouter 5 cm^3 de bleu de méthylène à l'aide d'une pipette et mélanger la suspension à 400 tours par minute pendant 1 minute.
  - Test de la tâche : Déposer une goutte de la suspension sur du papier filtre à l'aide d'une baguette.
    - ✓ Si le test est négatif (absence d'auréole autour de la goutte), ajouter 5 cm^3 de solution de bleu de méthylène et renouveler le test de la tâche après une minute. Répéter cette opération jusqu'à l'obtention d'un test positif (présence d'une auréole autour de la goutte).
    - ✓ Si le test positif (l'observation de la tâche révèle la présence d'une auréole), noter la quantité totale de solution de bleu de méthylène ajoutée.

Fig 41 : Essais Bleu de méthylène.

- **La classification de sol selon la valeur VBS**

Valeur de VBS	Classification
VBS<0.1	Sol insensible à l'eau
0.2≤VBS<1.5	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
1.5≤ VBS<2.5	Sol argileux, peu plastiques
2.5≤ VBS<6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6≤ VBS<8	Sol argileux
VBS>8	Sol très argileux

Tableau 07 : Classification de sol selon la valeur VBS.

3.3.2 Les essais physiques

3.3.2.1 Détermination de la teneur en eau [NF P94-050]

La teneur en eau du sol est le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides du sol dans un volume donné de sol. Au laboratoire, on prélève un échantillon de sol dans un récipient et on le pèse. Ensuite, on le place dans l'étuve à une température de 105 degrés Celsius pendant 24 heures.

$$\mathbf{W} = \frac{\boldsymbol{Mw}}{\boldsymbol{Ms}} * \mathbf{100}$$

- ✓ **Mw**: la masse de l'eau dans l'échantillon.
- ✓ **Ms**: la masse sèche mesurée après le passage à l'étuve.

3.3.2.2 Essai d'analyse granulométrique [Norme NF P 94-056]

L'analyse granulométrique du sol est l'un des tests les plus importants effectués sur le sol pour mieux comprendre ses propriétés physiques du sol telles que la perméabilité et la capacité de rétention d'eau et classification du sol.

- **Mode opératoire**

Séchage de l'échantillon à étuve (105°C) pour éliminer l'humidité. Après, en placé le matériau étudié en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis (Figure 43).

Fig 42 : Colonne des tamis.

Pesée de la quantité de sol qui traverse chaque tamis et calcul du pourcentage en poids pour chaque classe granulométrique et dessinée la courbe de distribution granulométrique qui montre la répartition des particules du sol en fonction de leur taille.

3.3.2.3 Analyse Granulométrique par Sédimentométrie

L'essai de sédimentation par la loi de Stokes complète l'analyse granulométrique en s'attaquant aux particules fines inférieures à 0,08 mm.

- **Mode opératoire**
  - Dans un liquide au repos, les grains de tailles différentes s'enfoncent à des vitesses distinctes, une relation décrite par la loi de Stokes qui lie le diamètre des grains à leur vitesse de sédimentation.
  - Étant donné que la loi de Stokes a été conçue pour des grains sphériques, son application aux particules du sol ne fournit que des "diamètres équivalents".
- **Matériel nécessaire**
  - Eprouvettes graduées en verre (1 ou 2,5 L)
  - Densimètre en verre
  - Thermomètre sur tige
  - Agitateur manuel
  - Défloculant (solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium)

Fig 43 : Matériels utilisés d'essai sédimentométrie. [3]

3.3.2.4 Limites d'Atterberg [Norme NF P 94-051]

Les limites d'Atterberg sont définies comme la quantité d'eau qui peut passer à travers une quantité donnée de sol. Elles représentent des comportements spécifiques du sol sous l'effet des changements de teneur en eau. Le principe de limites d'Atterberg est :

- Détermination la limite de liquidité à la coupelle.
- Détermination la limite de plasticité au rouleau.
  - ✓ **Limite de liquidité (WL) :** Teneur en eau du sol remanié qui caractérise le passage entre l'état liquide (sol humide et déformable) et l'état plastique.
  - ✓ **Limite de plasticité (WP) :** Teneur en eau du sol remanié qui caractérise le passage entre l'état plastique (sol malléable mais ne s'écoulant pas) et l'état solide (sol perdant sa capacité à se déformer).
  - ✓ **Indice de plasticité (IP) :** définit l'étude du domaine plastique du sol, cet indice et la différence entre les limites de liquidité et de plasticité: **IP = WL – WP.**

A) Limite de liquidité

- **Matériel nécessaire**

Appareil de Casagrande : Un outil pour mesurer le comportement du sol l'appareil de Casagrande est un outil essentiel pour déterminer la limite de liquidité d'un sol, c'est-à-dire le point où le sol devient liquide. Il se dans la figure suivant :

Fig 44: Appareil de Casagrande.

➢ **Mode opératoire**

- Une masse "m" de sol est immergée dans un récipient d'eau à température ambiante pendant au moins 24 heures.
- On met l'échantillon dans une coupelle de casa grand et Tracer la rainure au milieu. Appliquer des chocs répétés au couple pour mesurer le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure 1cm.
- On mesure la teneur en eau du matériau à l'endroit où la rainure a été fermée.

B) Limite de plasticité

➢ **Mode opératoire**

- Façonnage d'un rouleau à partir de la pâte préparée et Rouler le rouleau sur une surface lisse, à la main ou à l'aide d'une planche.
- Amincir le rouleau jusqu'à obtenir une longueur de 10 à 15 cm, un diamètre de 3 mm et une absence de creux.
- Atteindre la limite de plasticité lorsque le rouleau obtenir de diamètre 3mm se fissure sur 1 cm en son centre.

➢ **Le degré de plasticité selon l'indice de plasticité IP**

Indice de plasticité IP (%)	degré de plasticité
12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	Plastique
40	Très plastique

Tableau 08 : Degré de plasticité de sol selon l'indice de plasticité.

3.3.3 Les essais mécaniques

3.3.3.1 Essai Proctor normal [NF P 94-093]

➢ **Principe de l'essai**

L'essai Proctor est une méthode utilisée pour déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol. Le principe de l'essai est simple:

- Humidifier le sol à différentes teneurs en eau.
- Compacter le sol selon un procédé et une énergie standardisés.
- Déterminer la masse volumique sèche du sol pour chaque teneur en eau.
- Tracer une courbe représentant les variations de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau. Cette courbe est appelée courbe Proctor.

La courbe Proctor présente généralement une valeur maximale de la masse volumique sèche. Cette valeur est obtenue pour une teneur en eau optimale. Les deux valeurs, la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale, sont appelées caractéristiques de compactage. Elles permettent de déterminer la meilleure façon de compacter un sol pour obtenir une densité maximale.

- **Matériel nécessaire**
  - Moule Proctor Normal
  - Dame Proctor normal
  - Tamis
  - Outils de mélange
  - Instruments de mesure
  - Balance
  - Étuve

Fig 45 : Moule Proctor Normal.

- **Mode opératoire**
  - Utilisez un tamis à ouvertures de 5 mm.et assurez-vous d'éliminer tous les graviers et les gros matériaux.
  - Ajoutez une quantité d'eau au sol et assurez-vous de bien mélanger l'eau et le sol jusqu'à ce que le mélange soit homogène.
  - Placez le sol humide dans le moule Proctor Normal.et assurez-vous de répartir le sol uniformément dans tout le moule.et Placez la rehausse sur le moule.
  - Utilisez la dame pour appliquer 25 coups sur chaque couche.et assurez-vous d'appliquer les coups uniformément sur la surface du sol.

- Répétez l'opération avec 3 couches de sol. Et assurez-vous que la dernière couche déborde légèrement du haut du moule.
- Retirez la rehausse du moule. Et Pesez le moule avec le sol à l'aide d'une balance précise.
- Prélevez des échantillons de sol du haut et du bas du moule. Et assurez-vous que les échantillons représentent le sol dans tout le moule.
- Placez les échantillons de sol dans un four à une température de 105-110 degrés Celsius pendant 24 heures.
- Utilisez la formule suivante pour calculer la teneur en eau:

Teneur en eau = **(Poids du sol humide - Poids du sol sec)** / **Poids du sol sec * 100%**

- Répétez l'opération avec différentes quantités d'eau (19 %, 21 %, 23%) pour créer la courbe de Proctor.

3.3.3.2 Essai de cisaillement

L'essai de cisaillement direct est un test mécanique effectué en laboratoire pour mesurer la résistance au cisaillement d'un sol et déterminer ses propriétés mécaniques:

- ✓ **L'angle de frottement interne (ϕ):** Il représente la résistance des particules du sol à glisser les unes sur les autres.
- ✓ **La force de cohésion (C):** Elle représente la force qui lie les particules du sol entre elles.

On peut calculer la résistance au cisaillement à l'aide de l'équation de Coulomb-Mohr:

$$\tau = \sigma' \tan(\phi) + c$$

Où:

τ: Résistance au cisaillement
σ': Contrainte effective
ϕ: Angle de frottement interne
c: Cohésion

- ➢ **Principe de l'essai**
  - Un échantillon de sol est placé dans un moule composé de deux demi parties séparées par une surface horizontale permettant à chacune de glisser par rapport à l'autre.
  - Une pression verticale constante (N) est appliquée sur la moitié supérieure du moule.
  - Une force de cisaillement (T) est appliquée progressivement à l'échantillon de sol jusqu'à la rupture.
  - La force de cisaillement (T) provoquant la rupture de l'échantillon de sol est mesurée.
  - Déplacement horizontal (δ): Le déplacement de la moitié supérieure du moule par rapport à la moitié inférieure est mesuré.
  - Déplacement vertical (ΔH): La compression de l'échantillon de sol pendant le cisaillement est mesuré.

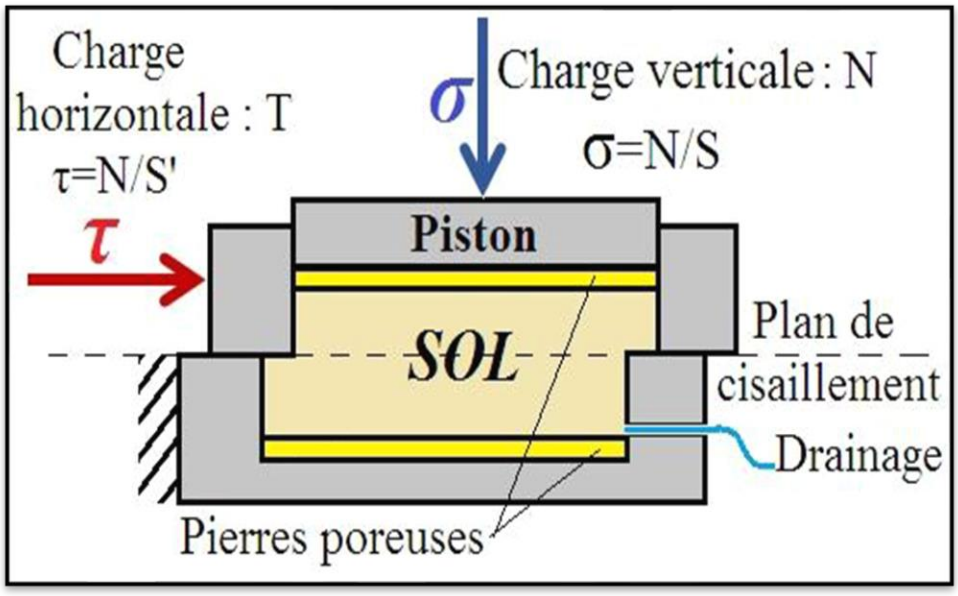


Fig 46 : Schéma de la boîte de cisaillement.

- **Mode opératoire**
  - Un échantillon de sol est placé dans un appareil de cisaillement constitué de deux boîtes séparées et pierres poreuses et piston. Le plan de jointure entre ces deux boîtes sert de surface de glissement privilégiée, définissant ainsi la zone de cisaillement de l'échantillon.
  - Lors de la première étape du processus, l'échantillon de section est consolidé en appliquant une force verticale constante sur sa face supérieure. Cette force est maintenue tout au long de l'essai et génère une contrainte de **σ =N/s**.
  - La vitesse de cisaillement de l'échantillon est déterminée en se basant sur les résultats de la phase de consolidation.
  - Un cisaillement uniforme est ensuite appliqué à l'échantillon en faisant glisser les deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre à une vitesse constante le long de leur plan de séparation.
  - Mesuré la force de cisaillement horizontale appliquée à l'échantillon (T). La contrainte de cisaillement (τ) est ensuite calculée en divisant la force de cisaillement (T) par la section transversale de l'échantillon (s).
  - L'essai est réalisé sur au minimum 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée.
  - on obtient des courbes qui relient la contrainte de cisaillement (l'effort appliqué) à la déformation de cisaillement (la déformation du matériau). Ces courbes, appelées "courbes de cisaillement effort-déformation", En analysant ces courbes, il est déterminé deux paramètres clés : l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c).

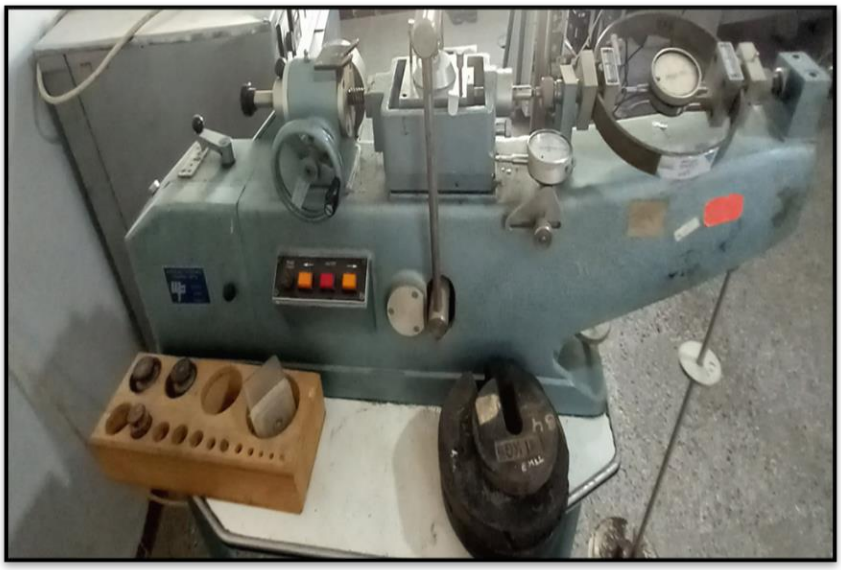


Fig 47 : appareille de cisaillement.

3.3.3.3 Essais CBR

- **But d'essais**

On détermine la portance du sol en la mettant en regard de la portance d'un sol de référence californien.

- **Matériel nécessaire**
  - Moule Proctor.
  - Dame de Proctor.
  - Un bac.
  - Une balance.
  - Papier filtre.
  - Chronomètre.
- **Mode opératoire**

L'éprouvette est placée au centre de la presse, sous le piston de poinçonnement. Le poinçonnement s'effectue ensuite selon les étapes suivantes :

- Rapprocher l'éprouvette du piston en utilisant les dispositifs de la presse, jusqu'à ce que le piston soit en contact avec la face supérieure de l'éprouvette.
- Initialiser le dispositif dynamométrique et le comparateur de mesure de l'enfoncement du poinçon à zéro.
- Enregistrer les valeurs de force de poinçonnement pour chaque profondeur d'enfoncement spécifiée : 1,25 mm, 2 mm, 2,5 mm, 5 mm, 7,5 mm et 10 mm.

Fig 48 : Appareille de CBR.

3.4 Traitement du sol étudié

Dans le cadre du traitement des sols, des mélanges de ciment à différents pourcentages ont été employés :

- 4% ciment
- 7% ciment
- 10% ciment

3.4.1 Préparation du mélange

La préparation des mélanges de ciment, d'argile suit une procédure simple. Pour chaque essai, une quantité d'argile tamisée à différentes granulométries est prélevée, en fonction des spécificités de l'essai. Ensuite, des quantités croissantes de ciment sont ajoutées, conformément aux pourcentages prédéfinis (4%, 7% et 10 %).

Fig 49 : mélange argile- ciment.

Conclusion

Selon l'étude géologique et stratigraphique, les sols argileux de la région de Bordj Bounaâma, situés en zone semi-aride sont soumis au phénomène de retrait-gonflement dont l'effet a été de grande ampleur sur le bâti provoquant des désordres de catastrophe naturelle.

L'objectif principal de notre étude dans ce chapitre était de se pencher sur la stabilisation des argiles dans la région de Téssemsilt en Algérie.

L'étude a englobé l'analyse des propriétés physiques, mécaniques et chimiques des argiles par le biais d'expériences en laboratoire, ainsi que les d'essais mécaniques pour évaluer la relation entre la densité du sol et sa teneur en eau, et déterminer les caractéristiques de cisaillement et la capacité à supporter les charges de l'argile pure et de l'argile améliorée avec un taux de ciment (4%,7% et 10%). Ces performances mettent en évidence la détermination des différentes couches des routes.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des essais réalisés au laboratoire LTPO et leurs interprétations. Nous avons discutés et comparés les propriétés mécaniques de l'échantillon d'argile pure et des mélanges argile-ciment avec des proportions de ciment de 4%, 7% et 10%.

4.1 Essai chimique

Dans le but de se prononcer sur l'agressivité ou non du sol, une analyse chimique a été réalisée sur un échantillon de sol, dont les résultats sont donnés au tableau suivant :

Composition chimique	Quantité
Carbonates	22 %
Sulfates	Nul
MO	//
VBS	3.27

Tableau 09 : Analyse chimique de sol étudie.

D'après la composition chimique donnée par le tableau ci-dessus, notamment la teneur nul en sulfates, nous pouvons conclure que le sol du site est faiblement agressif, en plus, la teneur en **Ca CO3** indique que le sol contient un grand pourcentage du " Calcaire ".

4.2 Essais physiques

Les résultats ont été résumés dans le tableau (10).

Propriétés physiques	Valeur	Norme
Limite de liquidité (%)	40.88	NF P94-051
Limite de plasticité (%)	24.27	NF P94-051
Indice de plasticité (%)	16.61	NF P94-051
L'indice de consistance	1.2	NF P94-051
Teneur en eau (%)	21	NF P94-050
Granulométrie		
Passant au tamis 80 µm (%)	29	NF P94-056
Particules argileuses (<2 µm) (%)	8	NF P94-056

Tableau 10 : Les caractéristiques physiques.

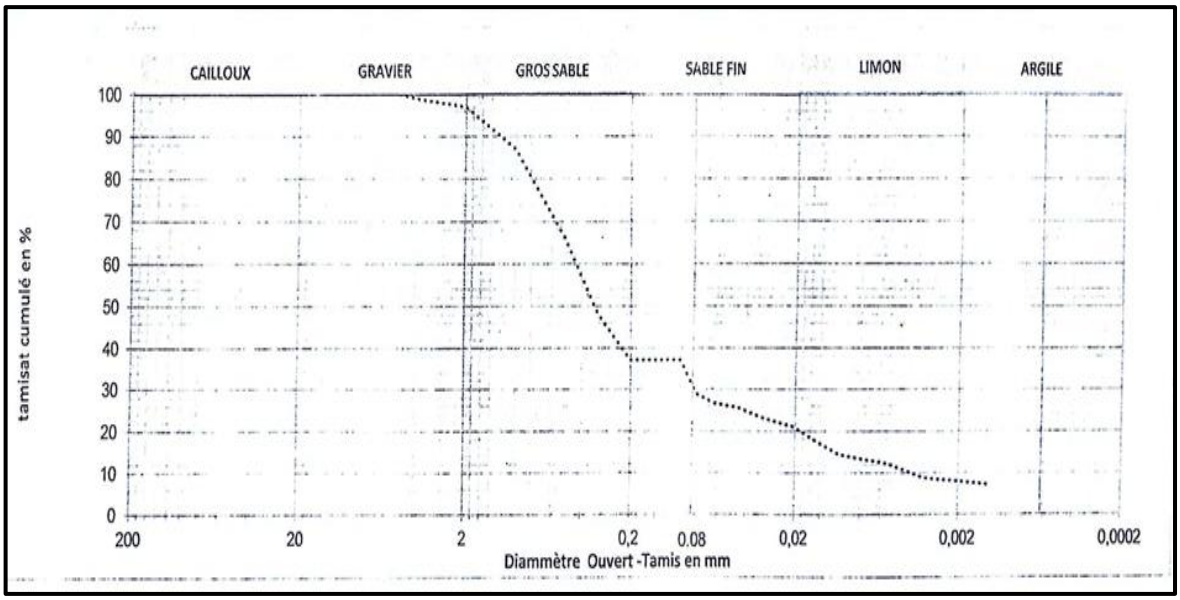


Fig 50 : Courbe granulométrique.

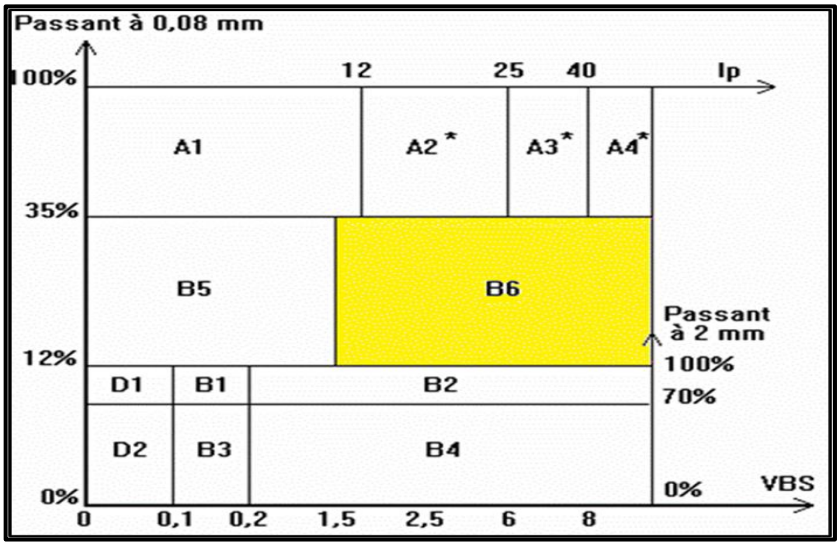


Fig 51 : Synoptique de classification de sol selon la norme NF P 11-300.

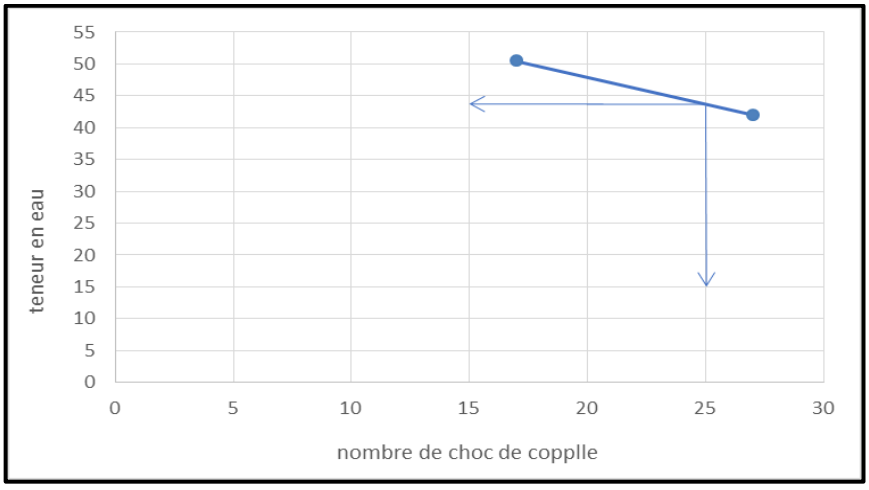


Fig 52: Courbe de limite de liquidité à la coupelle de casagrande.

4.2.1 Interprétations des essais physiques

- **Granulométrie**

D'après la courbe granulométrique du sol illustrée dans la figure (51), on a observé que le sol retenu est une argile de classe B6 (sables et graves argileux à très argileux), cette classe est obtient d'après la classification GTR norme NF P 11 300.

- **Limites d'Atterberg**

D'après la courbe 53, la limite de liquidité Wl =40.88 % et limite de plasticité Wp = 24.27 %

Donc : IP = Wl –Wp = 40.88- 24.27

IP = 16.61%.

Cette valeur de l'indice de plasticité classe notre sol étudié : une argile peu plastique d'après le tableau (08).

4.3 Essais mécaniques

4.3.1 Essai Proctor

On résume les résultats obtenus de l'essai de Proctor normale dans le tableau suivant :

	Essais de Proctor simple NFP 94- 093											
(%) ciment	**0%**			**4%**			**7%**			**10%**		
L'eau addictive (%)	19%	21%	23%	19%	21%	23%	19%	21%	23%	19%	21%	23%
W opt (%)	20,85			22,58			20.50			20.42		
Densité sèche (t/m³)	1,65			1,67			1,69			1.72		

Tableau 11: les résultats de l'essai Proctor normale.

- **A l'état naturel (0% ciment)**

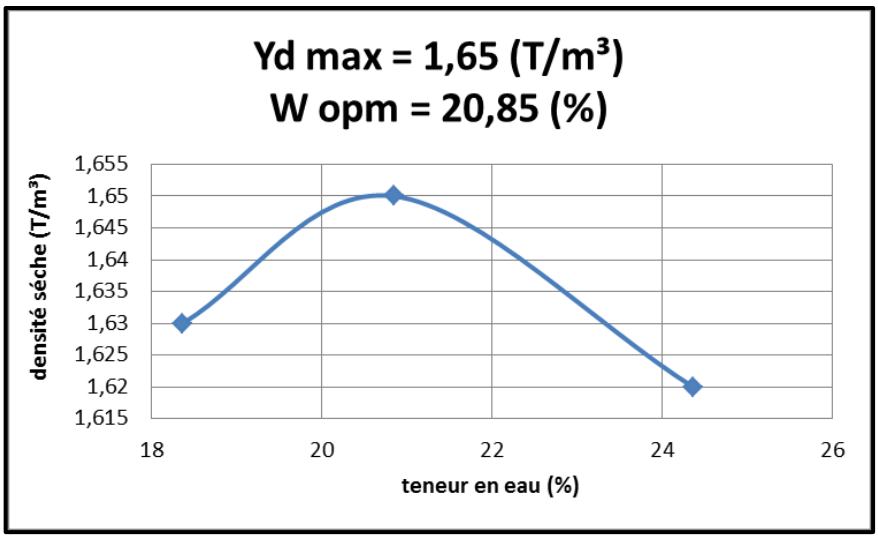


Fig 53 : Courbe de compactage d'argile non traitée (0%).

➢ **Avec l'ajout de ciment**

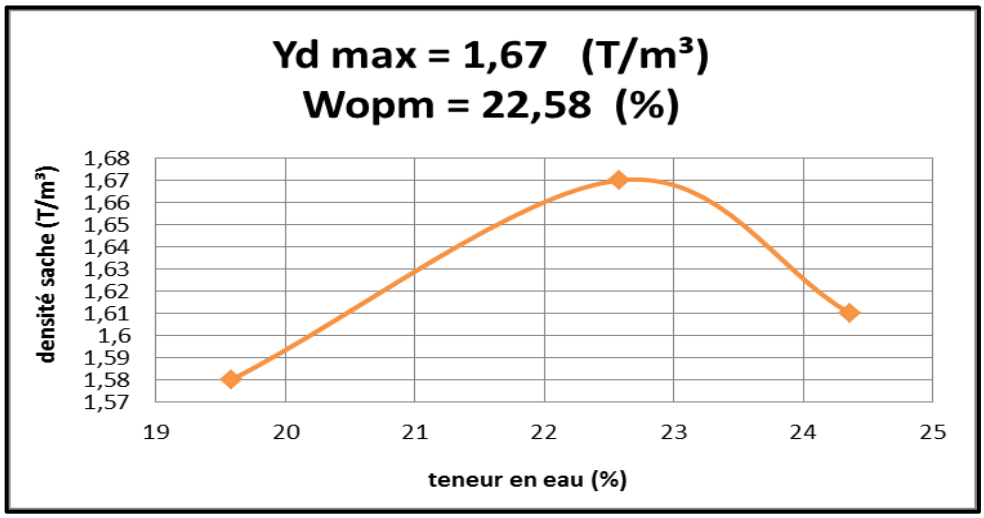


Fig 54: Courbe de compactage d'argile traité à 4% de ciment.

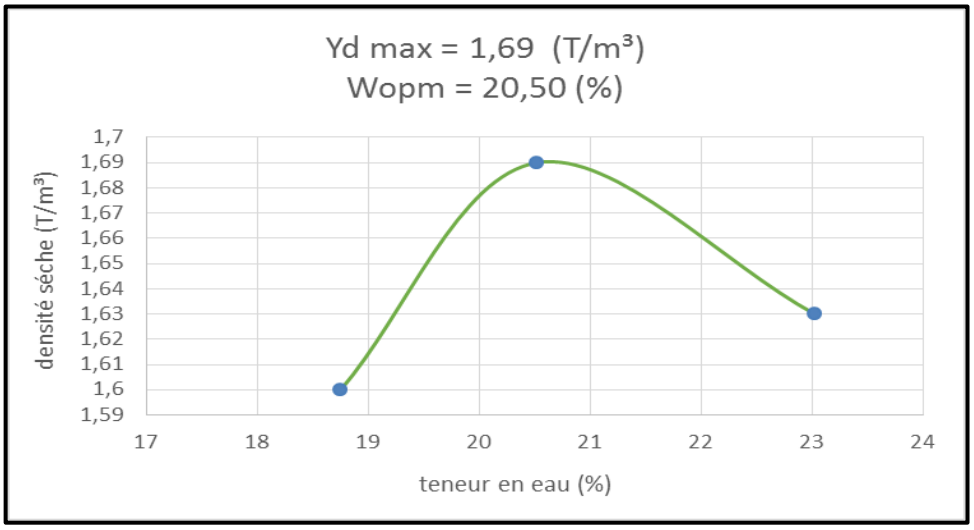


Fig55 : Courbe de compactage d'argile traité à 7% de ciment.

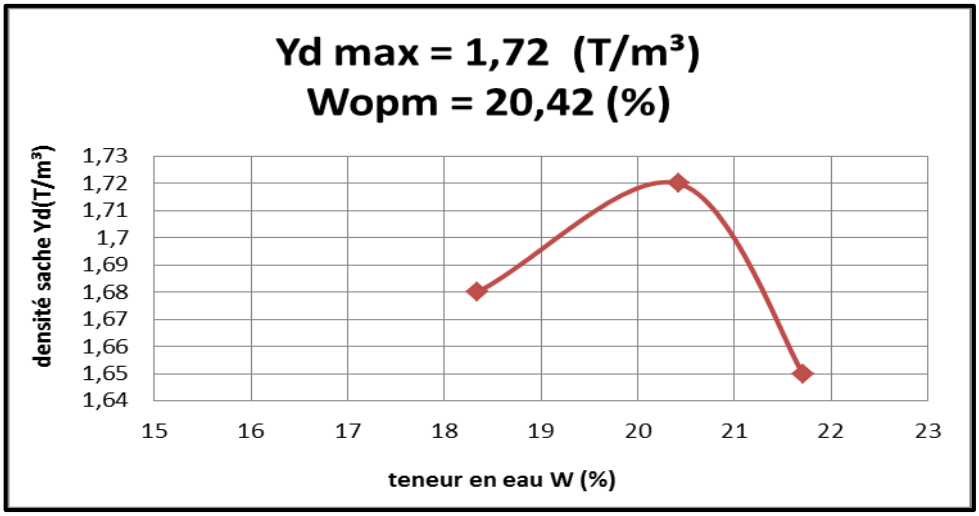


Fig56 : Courbe de compactage d'argile traité à 10% de ciment.

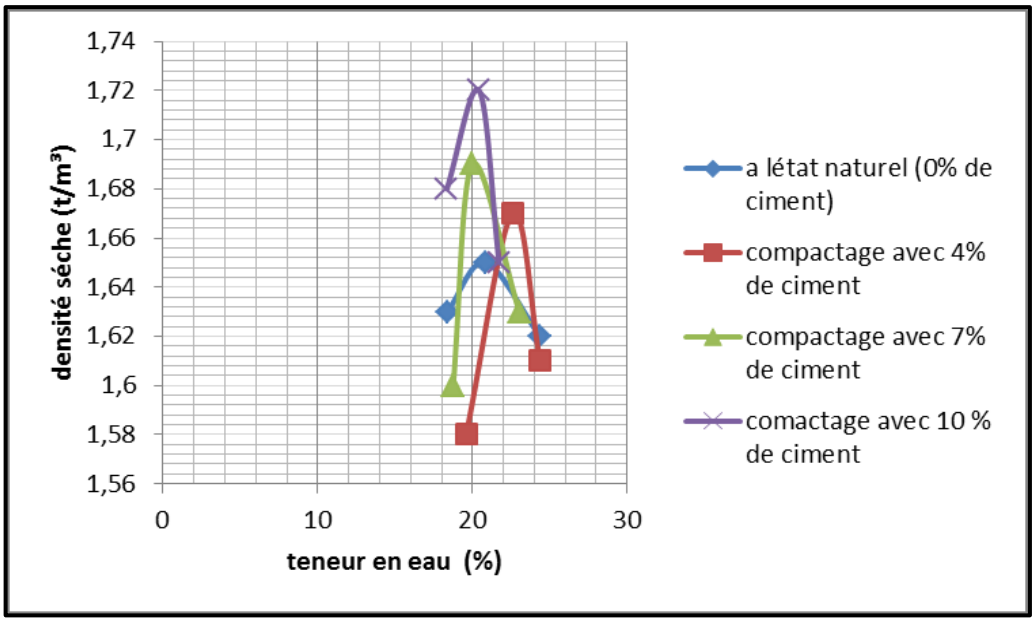


Fig 57 : Courbes de compactage d'une argile naturelle et traites.

4.3.2 Essai de cisaillement

On résume les résultats obtenus de l'essai de cisaillement dans le tableau suivant :

Essai de cisaillement				
L'eau additive	21%			
Ciment (%)	0%	4%	7%	10%
la cohésion (c) en bars	3.260	2.263	3.41	4.74
Angle de frottement (ϕ)	10.76	42.01	24.23	11.3

Tableau 12 : les résultats de cisaillement.

- **A l'état naturel (0% ciment)**

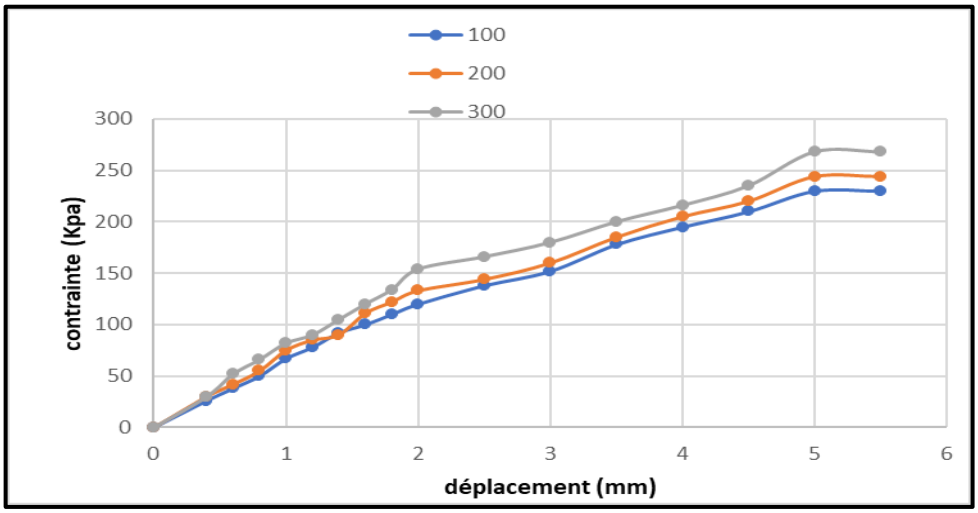


Fig 58 : Courbe contrainte de cisaillement (0% ciment).

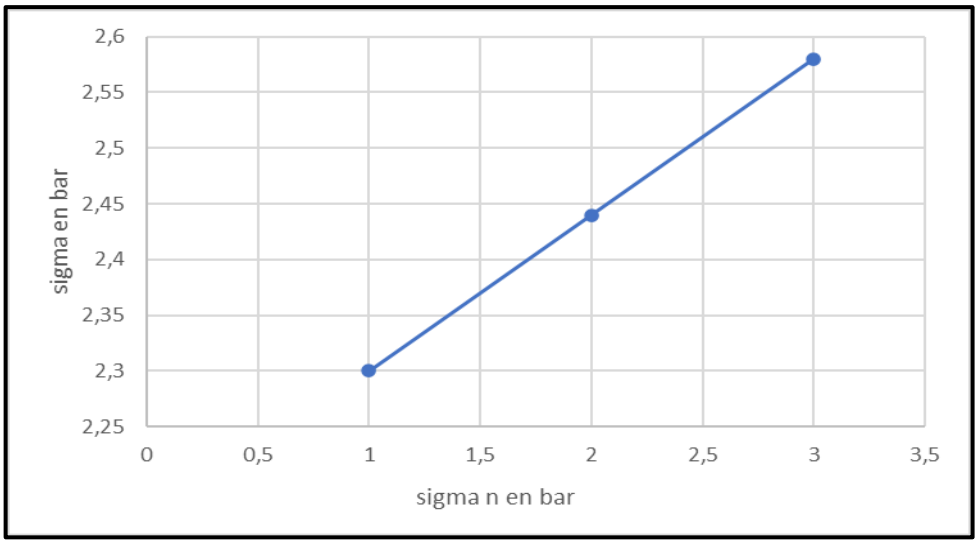


Fig 59: Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (0% ciment).

- **Avec l'ajout de ciment**

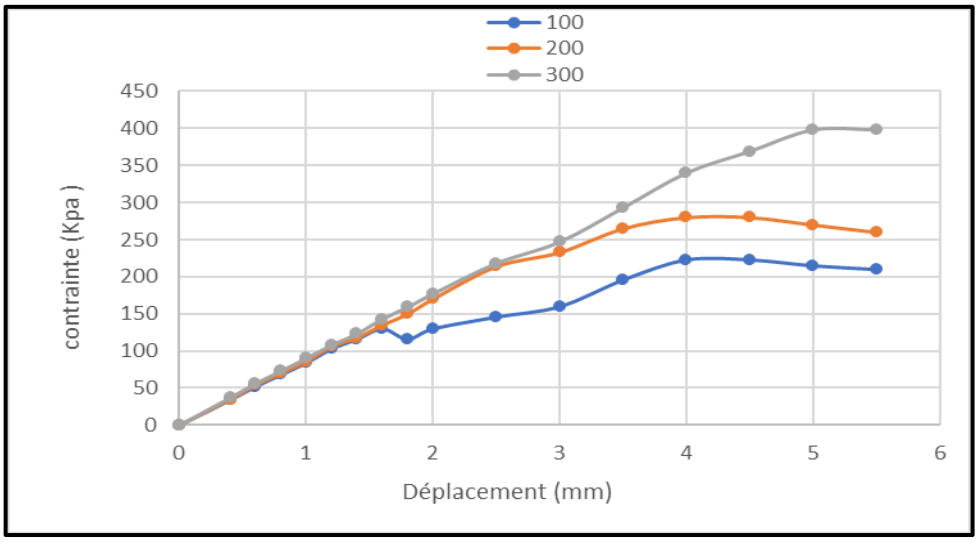


Fig 60 : Courbe contrainte de cisaillement (4% ciment).

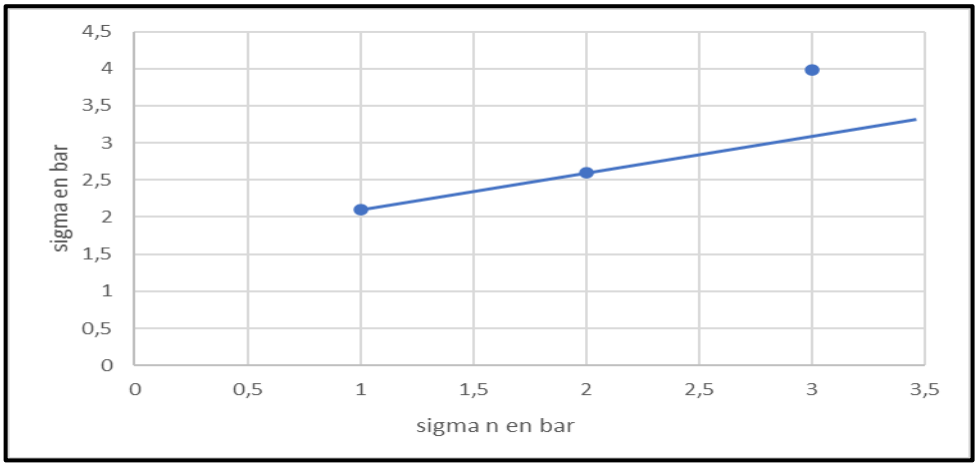


Fig 61 : Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (4% ciment).

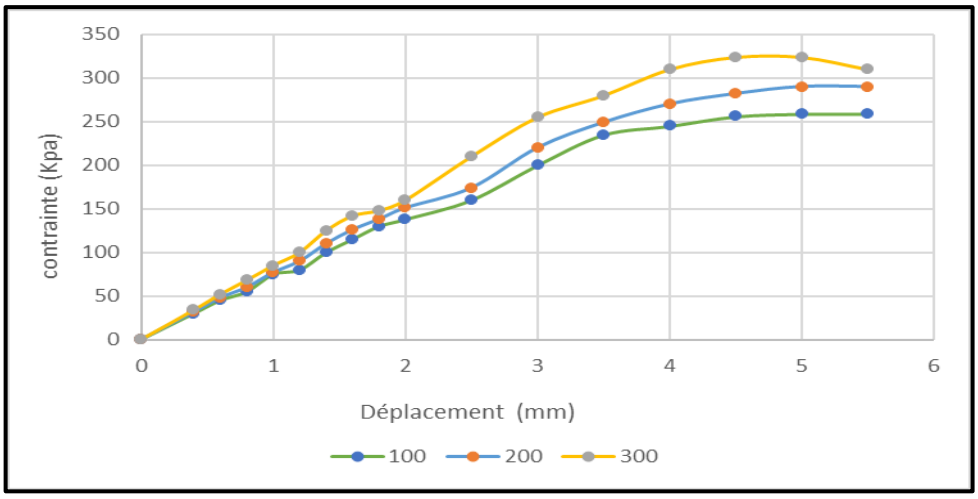


Fig 62 : Courbe contrainte de cisaillement (7% ciment).

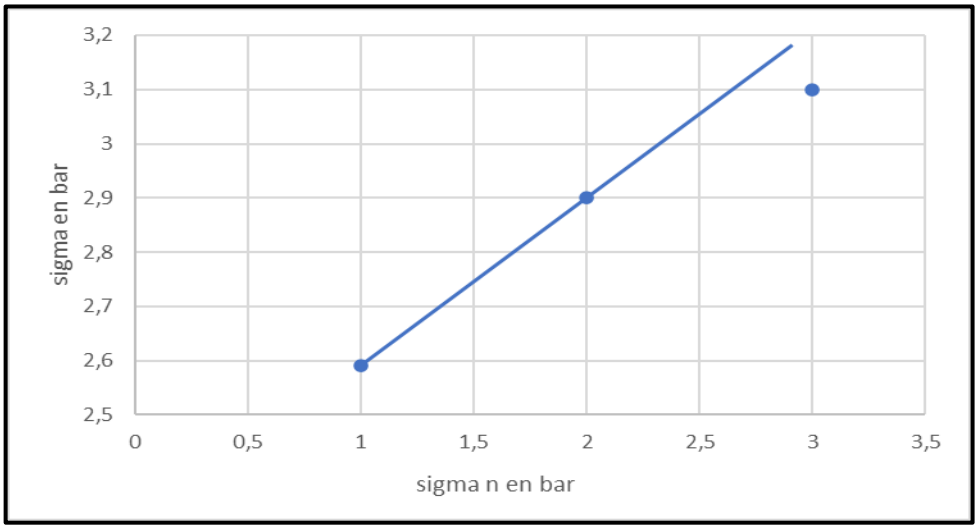


Fig 63 : Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (7% ciment).

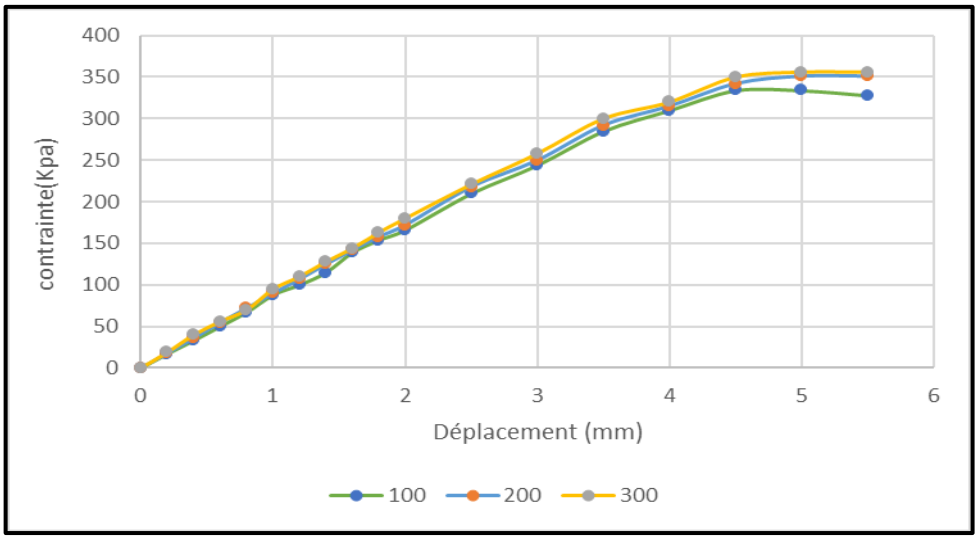


Fig 64 : Courbe contrainte de cisaillement (10% ciment).

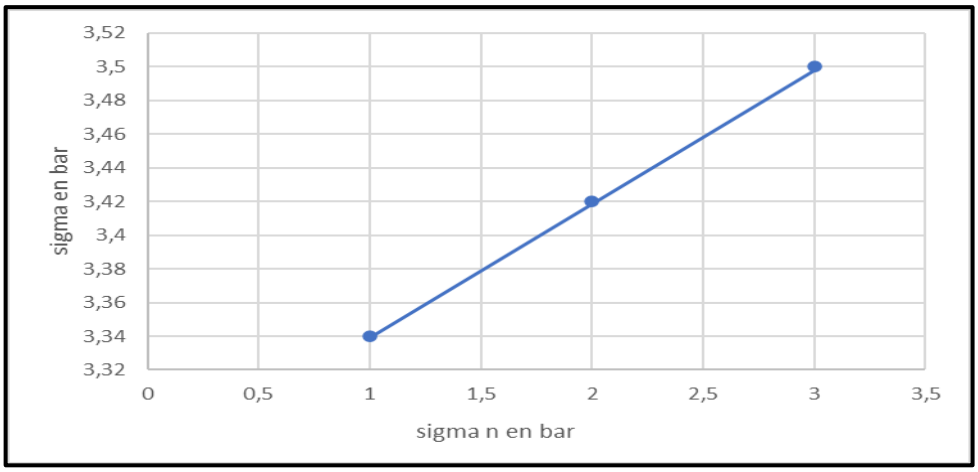


Fig 65 : Courbe contrainte de cisaillement-contrainte normal (10% ciment).

4.3.3 Essais Proctor modifie

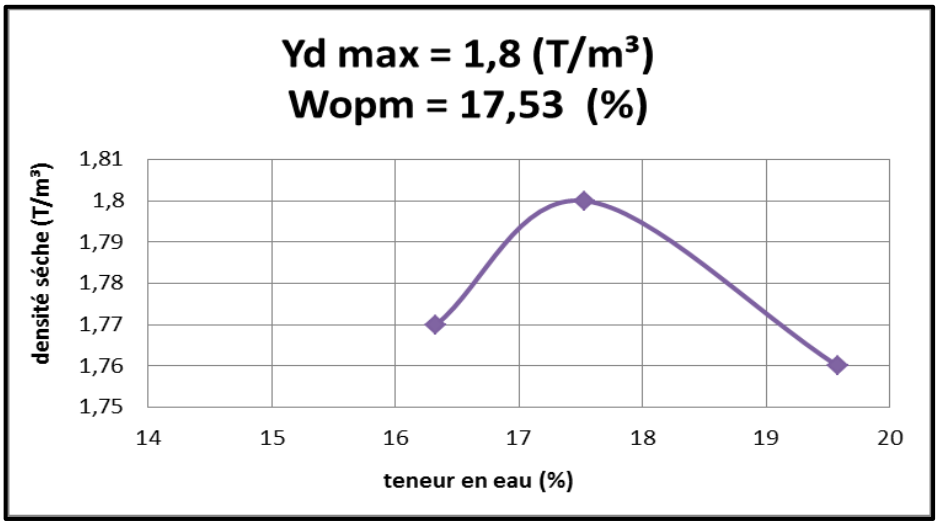


Fig 66 : Courbe de Proctor modifie d'argile non traité.

4.3.4 Essai CBR Immédiat

Les tests de CBR ont été exécutés sur des échantillons traités au ciment avec les pourcentages de 4, 7 et 10%.

Essai CBR Immédiat				
Taux de ciment				
Ciment %	0 %	4 %	7 %	10 %
L'eau additive %	17 %	17 %	17 %	17 %
Indice de CBR	0.88 %	20.25 %	25.50 %	35.20 %
Densité sèche(t/m3)	1.68	1.69	1.68	1.70

Tableau 13 : les résultats de l'essai CBR.

4.3.4.1 A l'état naturel (0% ciment)

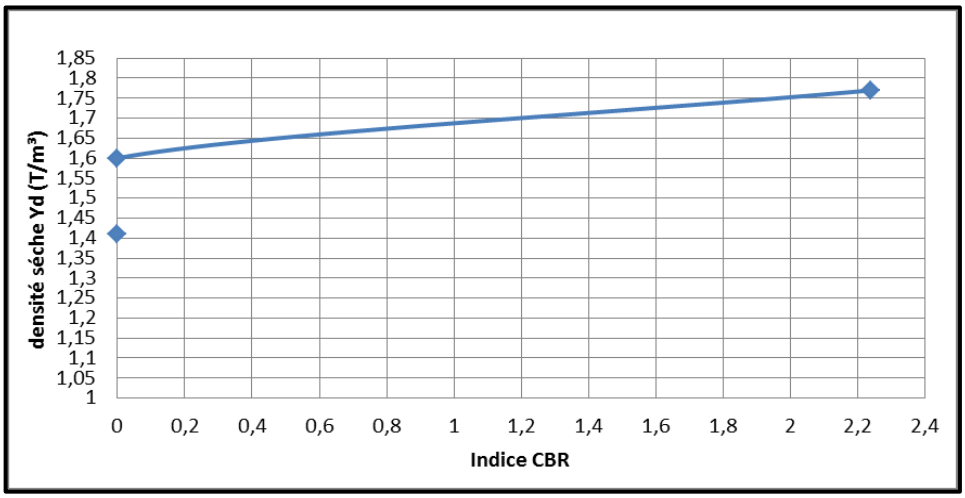


Fig 67 : Courbe de CBR (0% ciment).

4.3.4.2 Avec l'ajout de ciment

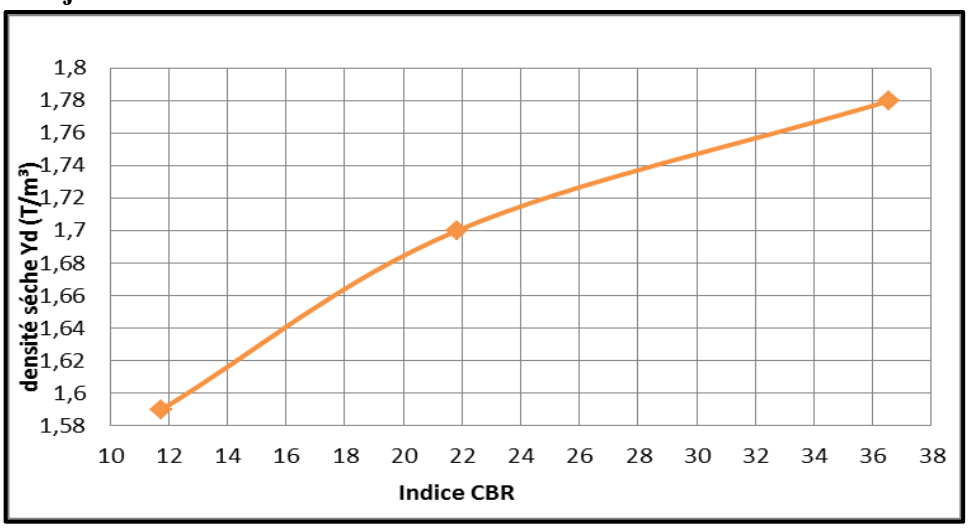


Fig 68 : Courbe de CBR (4% ciment).

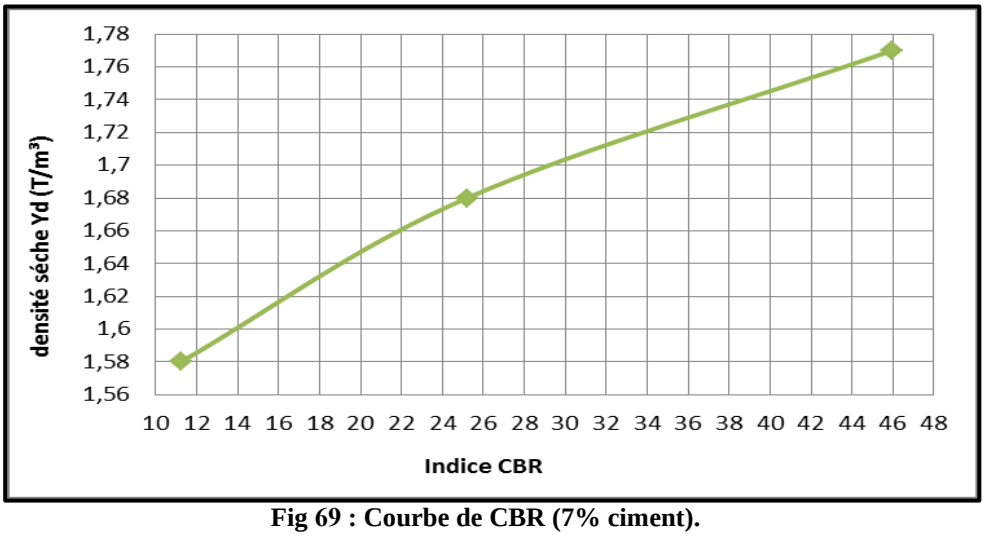


Fig 69 : Courbe de CBR (7% ciment).

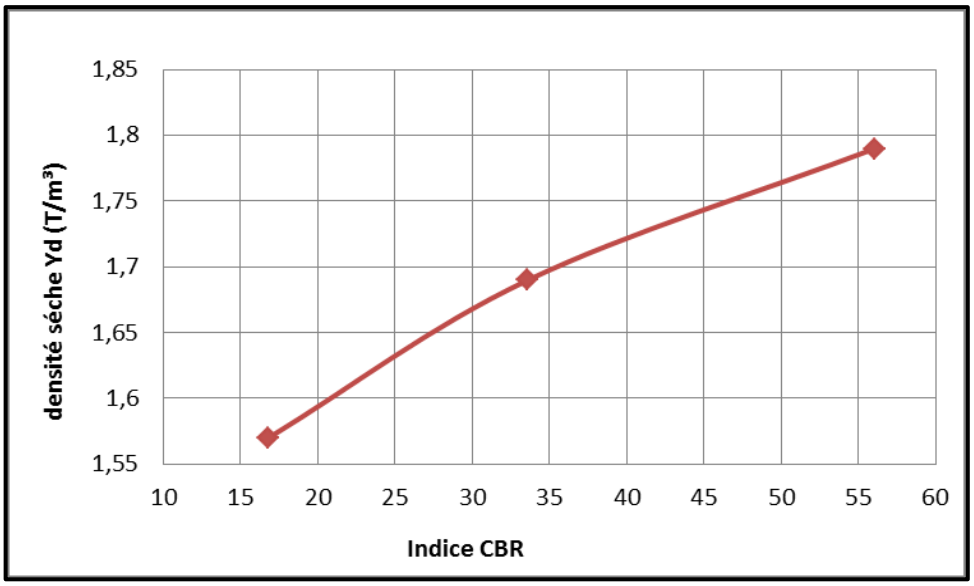


Fig 70: Courbe de CBR (10% ciment)

4.3.1 Interprétation des essais mécaniques

- **Proctor simple**

La figure 58 des courbes de l'essai Proctor normal illustre la relation entre la densité sèche du sol (γd) et la teneur en eau (w), l'augmentation de γd est proportionnelle avec l'augmentation de W est due à l'amélioration de la cohésion des particules du sol jusqu'à atteindre sa valeur maximale à W opm, où le sol est le plus dense et le moins poreux. Au-delà de cette valeur, γd commence à diminuer en raison de la séparation des particules du sol et de l'augmentation de la porosité.

On observe une relation de proportionnalité directe entre la valeur de la densité sèche (γd) et le pourcentage de ciment ajouté. En effet, plus on augmente la proportion de ciment, plus la valeur de la densité sèche augmente, jusqu'à atteindre sa valeur maximale (γd max =1.72 t/m³) pour un ajout de 10% de ciment.

En parallèle à l'augmentation de la densité sèche, on observe une diminution de la valeur de la teneur en eau (Wopt = 20.42%) au fur et à mesure que la proportion de ciment augmente. Cette diminution atteint son minimum (W min) pour un ajout de 10% de ciment.

Donc, lors de la stabilisation de l'argile avec un taux ciment, on observe une augmentation de la valeur de la densité sèche (γd) et une diminution de la valeur de la teneur en eau (w).

Cela est dû à plusieurs facteurs:

- ✓ **Remplissage des vides:** Le ciment comble les espaces entre les particules d'argile, ce qui réduit le volume des pores et augmente la densité du sol.
- ✓ **Liaison des particules:** Le ciment crée des liaisons fortes entre les particules d'argile, ce qui renforce la cohésion du sol et le rend plus résistant à la déformation.
- ✓ **Réaction chimique:** Le ciment réagit avec l'eau de l'argile pour former de nouveaux composés hydratés, qui contribuent à augmenter la densité et la résistance du sol.

- **Essai de cisaillement**

Les figures 58- 65 montrent les courbes de l'essai cisaillement.

D'après ces courbes, le diagramme de cisaillement présenté met en évidence la relation entre la contrainte de cisaillement (τ) et la déformation de cisaillement (γ) d'un sol argilo-sableux soumis à des pressions croissantes (1 bar, 2 bars et 3 bars).

Les résultats indiquent que la résistance au cisaillement du sol étudié augmente avec la pression appliquée jusqu'à atteindre une valeur maximale de 400 kpa lors de l'ajout de 4% de ciment .On remarque ainsi qu'au-delà d'une teneur en ciment de 4%, la variation du déviateur n'est que peu significative.

D'après les résultats obtenus, la combinaison de 4% de ciment avec l'argile offre la meilleure résistance au cisaillement parmi toutes les proportions testées, et ce sous toutes les trois pressions axiales.

Les résultats ont confirmés que l'ajout de ciment à l'argile améliore sa résistance au cisaillement et réduit sa déformation. Le ciment agit comme un liant, renforçant la structure interne du sol et améliorant sa cohésion. Cela se traduit par une résistance accrue du sol à l'effondrement sous des charges de cisaillement.

- **Essai de CBR**

Les courbes 67 -70 montrent la variation de la densité sèche en fonction de l'indice CBR.

A l'état naturel de sol, l'indice CBR= 0.88% ; indique que la portance de sol est faible et ne convient à la construction d'aucun type de route ou de bâtiment.

Après le traitement avec un taux de ciment, on observe une augmentation du pourcentage de l'indice CBR :

Pour 4% de ciment l'indice CBR = 20.25%, indique que le sol a une capacité portante élevée, cela nous permet de l'utiliser pour le remblai des routes.

Pour 7% de ciment l'indice CBR = 25.50 %, indique que le sol a une capacité portante très élevée, donc ; nous pouvons l'utiliser comme couche de fondation ou couche de forme pour les routes à condition que la compacité 99%.

Pour 10% de ciment l'indice CBR = 35.20 %, le sol a une résistance hyper élevée, ce qui nous permet de l'utiliser comme couche de fondation pour les routes à condition que la compacité supérieure à 95%.

Et enfin, nous concluons que l'augmentation de la proportion de ciment, l'indice CBR augmente, c'est une relation proportionnelle ; ce qui rend le sol plus résistant aux charges.

Conclusion

L'étude expérimentale menée dans ce chapitre a permis d'analyser l'effet de l'ajout de ciment sur les propriétés géotechniques d'un sol argileux. Les résultats obtenus ont montrés que l'ajout de ciment améliore significativement les caractéristiques mécaniques du sol, notamment sa résistance à la compression, sa résistance au cisaillement et son module de déformation.

L'analyse des résultats a révélé que l'effet du ciment sur les propriétés du sol dépend de la quantité de ciment ajoutée. En effet, une augmentation progressive des caractéristiques mécaniques du sol a été observée avec l'augmentation du pourcentage 7% et 10 % de ciment, sauf que dans le cisaillement la meilleure résistance atteint dans l'ajout de 4%.

Sur la base de ces résultats, il peut être conclu que l'ajout de ciment est une technique efficace pour stabiliser les sols fins. Cette technique peut être utilisée pour améliorer les propriétés géotechniques des sols fins et les rendre plus adaptés à une utilisation dans les applications de construction et surtout la construction des routes comme notre cas objet d'étude.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La stabilisation des sols argileux a fait l'objet d'une attention croissante de la part de nombreux scientifiques et chercheurs, ce qui a conduit au développement de méthodes et d'équipements de stabilisation physiques, mécaniques et chimiques afin de fournir des solutions efficaces aux problèmes de cisaillement, de glissement de sol et d'amélioration de sa capacité portante. Parmi les techniques les plus courantes, on trouve la stabilisation par ajout de ciment.

Ce projet vise à étudier et à évaluer l'effet de l'ajout de ciment à des pourcentages de 4%, 7% et 10 % à l'argile. L'étude s'est concentrée sur l'analyse des propriétés du sol avant et après le traitement, y compris les propriétés mécaniques, afin d'évaluer l'efficacité du processus de stabilisation.

Les résultats des essais ont montrés que ; une amélioration significative des propriétés mécaniques du sol argileux est atteint avec l'augmentation du taux de ciment.

On résume les résultats obtenus dans cette étude dans les étapes suivants :

- L'ajout de 10 % de ciment à l'argile permet d'obtenir une densité sèche maximale de $\gamma d\ max = 1.72\ t/m^3$, associée à une teneur en eau optimale de Wopt = 20.42 %.
- L'ajout de 4% de ciment à l'argile, nous donne la meilleure résistance au cisaillement.
- Pour l'essai CBR, nous avons constaté que l'ajout de taux de ciment augmente l'indice CBR, la valeur la plus élevée étant obtenue pour 10% de ciment, qui est indice CBR = 35.20 %.

L'augmentation associe ont à plusieurs facteurs tel que :

- Le ciment comble les vides entre les particules d'argile, ce qui augmente la densité du sol ; cela se traduit par une meilleure capacité à supporter les charges et à prévenir les fissures.
- Le ciment lie les particules d'argile entre elles, augmentant leur cohésion et leur résistance ; le sol devient plus résistant à la déformation et à l'effondrement sous charge.
- Le ciment diminue la capacité du sol à absorber l'eau, ce qui entraîne une réduction de sa teneur en eau naturelle ; cela contribue à améliorer la stabilité du sol et à prévenir les glissements de terrain.
- La liaison des particules d'argile par le ciment augmente le module de Young, une mesure de la rigidité du sol ; le sol devient plus rigide et plus résistant à la déformation.

En raison de ces effets, les sols argileux traités au ciment deviennent plus appropriés pour une utilisation dans divers projets de construction, tels que les fondations, les routes et les murs de soutènement.

Perspectives et recommandations

En plus de l'utilisation du ciment, il existe de nombreuses autres méthodes chimiques qui peuvent être employées pour stabiliser les sols argileux, y compris:

- Il est préférable d'utiliser la chaux pour la stabilisation des sols à forte teneur en argile ou en sable, dans des projets d'infrastructure tels que l'amélioration de la stabilité des pentes, le renforcement des fondations et la prévention de la pollution des eaux souterraines. **[20]** C'est où des études, telles que celles de Kim et al. (2016) et Baharuddin et al. (2014), ont montré que l'ajout de chaux aux sols à forte teneur en argile améliore considérablement les propriétés du sol, notamment la résistance au cisaillement, la densité et la perméabilité**. [18]** De même, l'étude de Zornberg et al. (2008) a démontré l'efficacité de l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols sableux dans les projets d'infrastructure. **[19]**
- Ont démontré des études, telles que celles de Bui et al. (2021) et Lee et al. (2016), que les mélange chaux-ciment ou cendres volantes-ciment procure une amélioration notable des propriétés du sol, notamment la résistance au cisaillement, la densité du sol et la résistance à l'érosion, par rapport à l'utilisation de la chaux ou du ciment séparément**. [21]**
- L'étude "Effet de l'ajout de fibres sur la stabilisation des sols au ciment" a montré que l'ajout de fibres au mélange de ciment améliore les propriétés des sols stabilisés, telles que la résistance à la traction, la flexibilité et la résistance à la fissuration. **[17]**

Annexes

- **Analyse Granulométrie du Sol : Granulométrie par Tamisage**

Tamis (mm)	Poids refus partiels	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Passant (%)
5	0	0	0	0
4	0.5	0.5	0.24	99.76
2	5.21	5.71	2.79	97.21
1	20.64	26.35	12.88	87.12
0.5	43	69.35	33.90	66.10
0.4	16.68	86.03	42.05	57.95
0.315	20.17	106.20	51.91	48.09
0.2	43	149.20	72.92	27.08
0.1	47.77	196.97	96.27	37.30
0.08	1.51	198.48	97.01	29.90

- **Proctor normal**
  - **Etat Naturel**

Poids total humide (g)	5367	5413	5480	5494
Poids du moule(g)	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide	1784	1830	1897	1911
Poids de sol sec (g)	1517.70	1546.15	1569.74	1536.67
Volume du moul	948.56	948.56	948.56	948.56
Densité s éche	1.60	1.63	1.65	1.62
N de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	349	348	341	333
Poids de la tare	58	65	58	58
Poids de l'eau	51	52	59	67

Poids du sol sac	291	283	283	275
Teneur en eau%	17.53	18.37	20.85	24.36

- **Ajoute 10%de ciment**

Poids total humide (g)	5375	5525	5482	5455
Poids du moule(g)	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide	1792	1942	1899	1872
Poids de sol sec (g)	1489.72	1584.10	1527.18	1489.24
Volume du moul	948.56	948.56	948.56	948.56
Densité s éche	1.58	1.67	1.61	1.57
N de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	344	337	333	330
Poids de la tare	58	58	58	58
Poids de l'eau	56	63	67	70
Poids du sol sac	286	279	275	272
Teneur en eau%	19.58	22.58	24.36	25.74

- **Ajoute 7 %de ciment**

Poids total humide (g)	**5385**	**5507**	**5485**	**5466**
[2]Poids du moule(g)	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide	1802	1924	1902	1883
Poids de sol sec (g)	1517.70	1603.07	1546.15	1508.21
Volume du moul	948.56	948.56	948.56	948.56
Densité s éche	1.60	1.69	1.63	1.59
N de la tare	1	2	3	4

Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	346	343	336	332
Poids de la tare	58	58	58	58
Poids de l'eau	54	57	64	68
Poids du sol sac	288	285	278	274
Teneur en eau%	18.75	20	23.02	24.82
Poids total humide (g)	5469	5548	5488	5478
Poids du moule(g)	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide	1886	1965	1905	1895
Poids de sol sec (g)	1593.58	1631.52	1565.12	1546.15
Volume du moul	948.56	948.56	948.56	948.56
Densité séche	1.68	1.72	1.65	1.63
N de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	347	342	339	337
Poids de la tare	58	58	58	58
Poids de l'eau	53	58	61	63
Poids du sol sac	289	284	281	279
Teneur en eau%	18.34	20.42	21.71	22.58

- **Ajoute 10% de ciment**

Poids total humide (g)	5469	5548	5488	5478
Poids du moule(g)	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide	1886	1965	1905	1895
Poids de sol sec (g)	1593.58	1631.52	1565.12	1546.15
Volume du moule	948.56	948.56	948.56	948.56

Densité sèche	1.68	1.72	1.65	1.63
N de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	347	342	339	337
Poids de la tare	58	58	58	58
Poids de l'eau	53	58	61	63
Poids du sol sac	289	284	281	279
Teneur en eau%	18.34	20.42	21.71	22.58

➢ Essai de cisaillement

- **Etat Naturel**

Déformation (mm)	Lecture anneau (100 kpa)	Lecture anneau (200 kpa)	Lecture anneau (300 kpa)
0.2	17	16	18
0.4	26	30	30
0.6	38	42	52
0.8	50	55	66
1.0	67	75	82
1.2	78	85	90
1.4	92	98	105
1.6	100	111	120
1.8	110	122	134
2.0	120	133	154
2.5	138	144	166
3.0	152	160	180
3.5	178	185	200
4.0	105	205	216

4.5	210	220	235
5.0	230	244	258

- **Ajoute 4 %de ciment**

Déformation (mm)	Lecture anneau (100 kpa)	Lecture anneau (200 kpa)	Lecture anneau (300 kpa)
0.2	16	17	19
0.4	34	35	37
0.6	52	54	56
0.8	68	70	73
1.0	84	86	90
1.2	103	106	108
1.4	116	118	123
1.6	130	135	143
1.8	146	150	159
2.0	160	170	177
2.5	196	214	218
3.0	223	233	247
3.5	223	265	293
4.0	215	280	340
4.5	210	270	369
5.0	-	260	398

- **Ajoute 7 %de ciment**

Déformation (mm)	Lecture anneau (100 kpa)	Lecture anneau (200 kpa)	Lecture anneau (300 kpa)
0.2	16	17	18
0.4	30	32	34

0.6	45	48	52
0.8	55	60	68
1.0	75	77	85
1.2	80	90	100
1.4	100	110	125
1.6	115	126	142
1.8	130	138	148
2.0	138	151	166
2.5	160	174	210
3.0	200	220	255
3.5	235	249	280
4.0	245	270	310
4.5	256	282	324
5.0	259	290	310

- **Ajoute 10%de ciment**

Déformation (mm)	**Lecture anneau (100 kpa)**	**Lecture anneau (200 kpa)**	**Lecture anneau (300 kpa)**
0.2	17	18	19
0.4	33	36	40
0.6	50	55	56
0.8	67	72	70
1.0	88	90	95
1.2	100	107	110
1.4	115	125	128
1.6	139	142	144
1.8	154	158	163

2.0	166	172	180
2.5	210	218	221
3.0	244	250	258
3.5	285	292	300
4.0	310	315	320
4.5	334	342	350
5.0	328	251	356

➢ Essais de CBR

- **État naturel**

Energie de compactage	10c/c	25c/c	56c/c	Indice CBR à95% Yd OPM
W%	17.47	17.12	16.72	0.88
Yd (t/m³)	1.41	1.6	1.77	
Imbibition a 4 jour	//	//	//	
W final (%)	//	//	//	
Gonflement	//	//	//	
Indice CBR	0.00	0.00	2.24	

- **Ajoute 4%de ciment**

Energie de compactage	10c/c	25c/c	56c/c	Indice CBR à95% Yd OPM
W%	19.50	18.79	18.34	20.25
Yd (t/m³)	1.59	1.7	1.78	
Imbibition a 4 jour	//	//	//	
W final (%)	//	//	//	
Gonflement	//	//	//	
Indice CBR	11.76	21.83	36.95	

- **Ajoute 7%de ciment**

Energie de compactage	10c/c	25c/c	56c/c	Indice CBR à95% Yd OPM
W%	19.13	18.43	17.93	25.50
Yd (t/m³)	1.59	1.7	1.78	
Imbibition a 4 jour	//	//	//	
W final (%)	//	//	//	
Gonflement	//	//	//	
Indice CBR	11.21	25.19	45.96	

- **Ajoute 10% de ciment**

Energie de compactage	10c/c	25c/c	56c/c	Indice CBR à95% Yd OPM
W%	18.83	18.08	17.53	35.20
Yd (t/m³)	1.59	1.7	1.78	
Imbibition a 4 jour	//	//	//	
W final (%)	//	//	//	
Gonflement	//	//	//	
Indice CBR	16.80	33.59	56.05	

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] Boumzaout Nada & Benamara Meryem & Noureddine Khaoula ; Mémoire de Master Amélioration D'un Sol Argileux Par Le Laitier De Haut Fourneau Activé Par La Poudre De Dolomie ; université 8 Mai 1945 De Guelma ; Juillet 2019.

[2] Guefaifia Lamia & Benrdjem Hiba ; Mémoire De Master Traitement Et Renforcement D'un Sol Fin Par Differentes Techniques D'amelioration : Etude Experimentale Et Numerique ; Université 8 Mai 1945 De Guelma ; Septembre 2020.

[3] Bouziane Rahil Et Nessaib Sara ; Master Académique RENFORCEMENT DES ARGILES DE DOUKANE (Tébessa) ; Université Larbi Tébessi Tébess ; 2022/2023.

[4] Messaoudi Meriem ; Mémoire De Fin D'étude effet Du Traitement Des Sols Limoneux Par Le Ciment Sur Les Caractéristiques De Compactage ; UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI ; 2017/2018.

[5] Riheb Hadji ; livre du Cours Mécanique des Sols (MDS) ; Université Ferhat Abbas de setif ; March 2020.

[6] Boudjabi. Issam ; Mémoire De Fin D'étude Stabilisation Des Sols Fin Par Ajout De Sable ; Universite L'arbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi ; 2019/2020.

[7] Beghou Hanifa Et Hamaizia Kanza ; Mémoire De Fin D'étude Adsorption De Cuivre En Milieu Aqueux Par Le Kaolin Dd ;Universite Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi) ; 2020.

[8] Belabbaci Zeyneb ; THESE DE DOCTORAT STABILISATION DES SOLS GONFLANTS ; université aboubekr belkiad Tlemcen ; 2014.

[9] Walid Zoubir ; Mémoire De Magister Effet Des Résidus Minéraux Sur L'amélioration Des Sols Fins Argileux ; Université Hassiba Ben Bouali De Chlef ; 11/2012.

[10] Bouhlassa Chaith Et Achi Ziad ; Memoire De Master Sols Fins Et Stabilité Des Ouvrages En Terre : Erosion, Dispersion, Typologie Et Pathologie (Recherche Bibliographique) ; Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa - ; 2022/2023.

[11] http//www.researchgate.net/publication .

[12] Nardjes DRAOU et Fadela NEBATI ; Mémoire de Master en Génie civil STABILISATION DES SOLS FINS ; université aboubekr belkiad Tlemcen ; 13/06/2016.

[13] Lahreche Fatima Zahra et Souilem Marwa ; Mémoire de Master Stabilisation des mélange optimaux sable de dune et des argiles marne par ciment et géotextiles sur les paramètres de gonflement de gonflement de la région de Ghardaïa ; Université de Ghardaïa ; 2022.

[14] Daniel LEVACHER ; DOCTORAT Co-valorisation de sédiments et de sols fins par apport de liants et de fibres ; Université de CAEN ; 07 août 2006.

[15] bekhouche hizia ; DOCTORAT traitement par des sols gonflants non saturés (cas de la région des aurès) ; Université batna 2 ; 2018 .

[16] Massinissa Koussaila SAADI ; Mémoire de fin d'étude Stabilisation des sols gonflants avec la chaux. Cas de la région de MILA ; UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI ; 2016/2017.

[17] (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520301571).

[18] https://link.springer.com/journal/10706.

[19] https://www.jiban.or.jp/e/soils-foundations/about-this-journal/.

[20] https://journals.sagepub.com/home/trr.

[21] https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production.