



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira Bejaia

Faculté de technologie

Département de génie civil

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie
civil

Option : Structures

Mémoire de fin d'étude

*Étude d'un sol argileux traité à la chaux : cas d'une argile de la
région de Bejaia*

Encadré par :

Mr : Ahmed Laichaoui

Membre du Jury :

Mr : OURABAH A.

Mme : SEDIRA R.

Préparé par :

BENSID ATIKA.

OUSSADI YASMINE.

2023/2024

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon dieu, le tout puissant, qui nous a doté d'intelligence et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude, et surtout de nous avoir donnée la force, le courage et la patience d'achever ce modeste travail.

J'offre un sincère et chaleureux remerciement à **Mr LAICHAOUI AHMED**, pour son encadrement, son orientation et son soutien tout au long de cette période pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nous remercions aussi tous les membres de jury pour leurs présences, et pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma chère **maman** qui a été une source de soutien et d'encouragement durant toute cette année.

Merci à ma petite famille pour avoir été toujours avec moi et pour m'avoir aidé avec leurs conseils dans ce mémoire, Sans oublié mon cousin **Rayane**

Sans oublié ma très belle rencontre et ma chérie **Ouardia** pour son aide et sa présence dans les moments difficiles au court de cette année. Je remercie ainsi ma binôme **Yasmine** qui m'a partagé l'élaboration de ce mémoire.

Je souhaite remercie une personne très chère à moi : **Mayas**.

Atika & Yasmine

Dédicace

C'est avec gratitude et sincère mots que je dédie ce travail de fin d'étude :

A ma chère maman, et mon cher père paix à son âme, qui ont sacrifié leurs vies pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin avec leurs conseils judicieux. Que dieu prête à ma mère bonheur et longue vie, et que le paradis soit la récompense de mon père.

A notre chère amie **BAAR KHALISSA** paix à son âme, qui a été parmi nous pendant cette expérience.

A mes chers frères : **Lamine** et **Abdelkrim**, ma chère sœur : **Ismahane**, et mes petites anges : **Ahcene** et **Elina**. Sans oublié ma grand-mère : **Zouina**.

A la personne qui m'est très chère : **Mayas**

A mes meilleures amies : **Lydia**, **Ouardia**

A ma binôme : **Yasmine**

A toute ma famille sans exception.

ATIKA

Dédicace

Je dédie ce travail en premier lieu à ma merveilleuse maman « **Kahena** » qui est la prunelle de mes yeux, c'est la personne qui a toujours cru en moi et qui m'a toujours tiré vers le haut.

A mon défunt papa « **Farid Amirouche** » qui aurait aimé être parmi nous pour ce moment tant attendu, hélas la vie en a décidé autrement, papa je te dis merci pour tous ce que tu as faits pour moi jusqu'au jour de ton départ, j'espère que tu seras fière de ta fille là où tu es, tu seras omniprésent dans ma vie.

A mes cousins et cousines que je considère comme les frères et sœurs que je n'ai pas eus, qui ont toujours été là pour moi : « **Dahbia, Doria, Dihya, Daika, Melissa, Lyna, Ghilas, Rachid, Adem.**

A mes adorables tantes : **Djida** et **Fetta** que j'adore.

Et enfin a la personne qui m'a toujours soutenue mon fiancé « **Sofiane** ».

Je remercie ma binôme mademoiselle « **Bensid Atika** » avec qui j'ai pu réaliser ce modeste travail grâce à son sérieux et son engagement.

A « **Baar Khalissa** » une personne que j'ai connue pendant notre période d'expérimentation au laboratoire, qui s'est donnée à fond pour ce travail mais malheureusement qui a quitté ce monde très tôt sans avoir vu la fin de ce dernier paix à ton âme **Khalissa** .

Yasmine

Notations

Al^{3+} : Ion

d'aluminium ;

Si^{4+} : Ion de silicium ;

Fe^{3+} : Ion de fer ;

Mg^{2+} : Ion de

magnésium

; K^{+} : Ion de

potassium ;

Na^{+} : Ion de sodium ;

O^{-2} : Ion d'oxygène ;

SiO_2 : Oxyde de

silicone

; Ni^{2+} : Ion de nickel ;

Cu^{2+} : Ion de Cuivre ;

Zn^{2+} : Ion de Zinc ;

Cr^{3+} : Ion de Chrome

;

NH_4^{+} : Ion

d'Ammonium ;

Al_2O_3 : Oxyde

d'aluminium ;

G : Potentiel de

gonflement ;

H_2O : Eau ;

W_L : limite de

liquidité (%) ;

W_P : limite de

plasticité

(%) ;

W : Teneur en eau

(%)

W_{opt} :teneur en eau optimale.

I_p :indice de plasticité(%)

σ : Contrainte normale
(bar) ;

ϕ : Angle de frottement ;

C: Coefficient de cohésion ;

ρ_d : densité sèche
(Kg/m³) ;

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I.1: Caractéristiques de quelques minéraux argileux	9
Tableau II.1 : Analyse chimique du sol	29
Tableau II.2 : les caractéristiques chimiques de la chaux utilisée	30
Tableau II.3 : Estimation de la plasticité d'un sol	34
Tableau III.1 : Résultats de la teneur en eau initiale	44
Tableau III.2 : Résultats d'essai analyse granulométrie par tamisage.....	44
Tableau III.3 : Résultat de limite de liquidité du sol naturel	46
Tableau III.4 : Résultat de limite de plasticité du sol naturel	48
Tableau III.5 : Récapitulatif des résultats des limites d'Atterberg sur le sol traité à la Chaux	49
Tableau III.6 : Résultats d'essai de Proctor Normale sol naturel	50
Tableau III.7 : Résultats d'essai Proctor normal du sol traité	52
Tableau III.8 : Récapitulatifs des résultats de compactage sur le sol traité.....	54
Tableau III.9 : La cohésion et l'angle de frottement du sol naturel	58
Tableau III.10 : La cohésion et l'angle de frottement des différents dosages de la chaux.....	58

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Couche tétraédrique et octaédrique	6
Figure I.2 : Structure de la kaolinite	7
Figure I.3 : Structure d'illite	7
Figure I.4 : Structure de la montmorillonite	8
Figure I.5 : Schématisation des feuillets de montmorillonite, Illite et de kaolinite	9
Figure I.6 : Erosion d'un sol	13
Figure I.7 : Représentation du phénomène du retrait-gonflement	13
Figure I.8 : phénomène de glissement d'un sol	15
Figure I.9 : Schéma générale du mécanisme de fluage	15
Figure I.10 : Schéma de solifluxion	16
Figure I.11 : Affaissement d'un sol	16
Figure I.12 : Salinisation des sols	17
Figure I.13 : Les modes de compactage	19
Figure I.14 : Technique de compactage d'un sol	20
Figure I.15 : Vibro-compactage	24
Figure I.16 : La chaux aérienne	25
Figure I.17 : Cycle de fabrication de la chaux	25
Figure II.1 : Broyage de l'argile	28
Figure II.2 : graphe de diffraction de X du sol utilisé	29
Figure II.3 : la chaux utilisée	30
Figure II.4 : Pesée et étuvage pour le calcul de la teneur en eau	32
Figure II.5 : Tamiseuse et série des tamis pour l'essai d'analyse granulométrique	33
Figure II.6 : Appareillage d'essai limite d'atterberg	35
Figure II.7 : Mode opératoire d'essai limite de liquidité	36
Figure II.8 : Mode opératoire d'essai limite de plasticité	37
Figure II.9 : Appareillage de l'essai Proctor normal	38
Figure II.10 : Mode opératoire d'essai Proctor normal	39
Figure II.11 : Appareillage et mode opératoire de l'essai oedométrique	40
Figure II.12 : Appareillage de l'essai cisaillement à la boîte	42
Figure II.13 : Mode opératoire d'essai cisaillement à la boîte	43
Figure III.1 : Courbe granulométrique du sol utilisé	45
Figure III.2 : Limite de liquidité de l'argile sans ajout	46

Figure III.3 : Limite de liquidité de l'argile avec 2% d'ajout	47
Figure III.4 : Limite de liquidité de l'argile avec 4% d'ajout.....	47
Figure III.5 : Limite de liquidité de l'argile avec 10% d'ajout	48
Figure III.6 : L'abaque de casgrande relatif aux 3 essais réalisés	49
Figure III.7 : Histogramme de la limite de liquidité des différents dosages en chaux	49
Figure III.8 : Histogramme de la limite de plasticité des différents dosages en chaux	50
Figure III.9 : Courbe de compactage d'argile sans ajout	52
Figure III.10 : Courbe de compactage d'argile traité avec 2% de la chaux	53
Figure III.11 : Courbe de compactage d'argile traité avec 6% de la chaux	53
Figure III.12 : Courbe de compactage d'argile traité avec 10% de la chaux	53
Figure III.13 : Histogramme de la teneur en eau optimale en fonction des teneurs en chaux	54
Figure III.14 : Histogramme de la densité sèche en fonction des différents teneurs en chaux	54
Figure III.15 : Courbe contrainte tangentielle en fonction du temps d'argile avec 2% de la chaux	55
Figure III.16 : Courbe de cisaillement d'argile avec 2% de la chaux	55
Figure III.17 : Courbe contrainte tangentielle en fonction du temps d'argile avec 6% de la chaux	56
Figure III.18 : Courbe de cisaillement d'argile avec 6% de la chaux	56
Figure III.19 : Courbe contrainte tangentielle en fonction du temps d'argile avec 10% de la chaux	56
Figure III.20 : Courbe de cisaillement d'argile avec 10% de la chaux	57
Figure III.21 : histogramme représentant les contraintes tangentielles en fonction des différents pourcentages de chaux	57

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralité

I.1 Introduction :	3
I.2 Définition des sols	3
I.3 Définition de l'argile :	3
I.4 Processus de formation des argiles :	4
I.4.1 Héritage et altération :	4
I.4.2 Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation :	5
I.4.3 Néof ormation en milieux confiné :	5
I.4.4 Contexte de formation des argiles :	5
I.5 Structure des argiles :	6
I.6 Types d'argiles :	7
I.7 Propriétés des argiles :	9
I.7.1 Surface spécifique :	9
I.7.2 Capacité d'échanges cationiques :	10
I.7.3 Capacité d'absorption de l'eau :	10
I.8 Les principaux problèmes des sols argileux :	11
I.8.1 Tassement :	11
I.8.1.1 Types de tassement en géotechnique [23]	11
I.8.2 Erosion :	12
I.8.3 Problèmes de retrait-gonflement	13
1.8.3.1 Définition des paramètres de gonflement :	14
I.8.4 Glissements de terrain et inondations :	14
I.8.5 Le fluage :	15
I.8.6 Les solifluxions	16
I.8.7 Les affaissements :	16

I.8.8 Salinisation :	17
I.8.9 Baisse de la biodiversité :	17
I.8.10 Baisse des teneurs en matières organiques :	17
I.9 Stabilisation des sols :	18
I.9.1 Définition	18
I.9.2 Techniques de stabilisation :	18
I.9.2.1 Stabilisation mécanique :	18
I.9.2.2 Stabilisation chimique :	20
I.9.2.3 Stabilisation physique :	27
I.10 Conclusion.....	27

Chapitre II : Matériaux et méthodes

II.1 Introduction :	28
II.2 Les matériaux :	28
II.2.1 Le sol utilisé :	28
II.2.1.1 Les caractéristiques de sol utilisé :	29
II.2.2 La chaux utilisée:	30
II.3 Les essais réalisés :	31
II.3.1 Essais d'identification :	31
II.3.1.1 La teneur en eau :	31
II.3.1.1.1 Matériels utilisés :	31
II.3.1.1.2 Mode opératoire :	31
II.3.1.2 L'analyse granulométrique par tamisage : (NF P 94-040).....	32
II.3.1.2.1 Principe de l'essai :	32
II.3.1.2.2 But de l'essai :	32
II.3.1.2.3 Matériels utilisés :	32
II. 3.1.2.4 Mode opératoire :	32

II.3.1.3 Les limites d'Atterberg : (NF P 94-051)	34
II.3.1.3.1 Principe de l'essai :	34
II.3.1.3.2 But de l'essai :	34
II.3.1.3.3 Matériels utilisés :	34
II.3.1.3.4 Mode opératoire :	35
II.3.2 Essai de caractérisation :	37
II.3.2.1 Essai Proctor normal : (NF 94-093)	37
II.3.2.1.1 Principe de l'essai :	37
II.3.2.1.2 But de l'essai :	37
II.3.2.1.3 Matériels utilisés :	38
II.3.2.1.4 Mode opératoire :	38
II.3.2.2 Essai œdométrique : (XP P 94-090-1)	39
II.3.2.2.1 Principe de l'essai :	39
II.3.2.2.2 But de l'essai :	39
II.3.2.2.3 Matériels utilisés :	39
II.3.2.2.4 Mode opératoire :	40
II.3.2.3 Essai de cisaillement à la boîte : (NF P 94-071-1).....	41
II.3.2.3.1 Principe de l'essai :	41
II.3.2.3.2 But de l'essai :	41
II.3.2.3.3 Matériels utilisés :	41
II.3.2.3.4 Mode opératoire :	42
II.4. Conclusion :	43

Chapitre II : Interprétation des données

III.1 Introduction :	44
III.2 Essais d'identification :	44
III.2.1 Teneur en eau :	44

III.2.1.1 Interprétation des résultats :.....	44
III.2.2 Analyse granulométrique par tamisage :	44
III.2.3 Les limites d'Atterberg :	45
III.2.3.1 Limite de liquidité :	45
III.2.3.2 Limite de plasticité : (sol naturel).....	48
III.2.3.3 Interprétation des résultats :.....	48
III.2.3.4 Interprétation des résultats :.....	50
III.3 Essais de caractérisation :.....	50
III.3.1 Essai Proctor normal :	50
III.3.1.1 Interprétation des résultats :.....	55
III.3.1 Essai cisaillement à la boite :	55
Conclusion générale :	59

Introduction Générale

Introduction générale

Les sols constituent la couche superficielle de la croûte terrestre, formée à partir de l'altération des roches et de l'accumulation de matières organiques. Cette fine couche joue un rôle essentiel dans la construction et le génie civil, car elle fournit le support pour la plupart des infrastructures et bâtiments. Selon leur composition minérale, leur granulométrie, et leur comportement mécanique, les sols présentent des caractéristiques variées qui influencent leur aptitude à supporter des ouvrages. Parmi ces types de sols, les argiles, qui occupent une place particulière en raison de leurs propriétés physico-chimiques complexes, qui diffèrent considérablement des autres types de sols, tels que les sables et les graviers.

Les sols argileux se constituent essentiellement de particules très fines et de minéraux d'argile, ce qui donne aux sols une forme en feuillets et une forte aptitude à absorber l'eau. Cette composition spécifique entraîne des comportements particuliers, tels qu'une forte plasticité et une sensibilité marquée aux variations d'humidité. En effet, les sols argileux ont tendance à gonfler lorsqu'ils absorbent de l'eau et à se rétracter lors du dessèchement, créant des cycles de gonflement et de retrait. Cette réactivité aux changements de teneur en eau rend ces sols vulnérables aux variations climatiques et peut compromettre la stabilité des ouvrages construits en surface.

Ces caractéristiques posent de nombreux problèmes en génie civil, car les mouvements de gonflement et de retrait des sols argileux entraînent des déformations différentielles qui affectent la durabilité et la sécurité des ouvrages. De plus, leur faible résistance au cisaillement et leur compressibilité élevée limitent leur capacité à supporter des charges importantes. Ces faiblesses structurelles des sols argileux nécessitent souvent des solutions de stabilisation pour rendre ces sols aptes à accueillir des constructions durables.

Afin de résoudre ces problèmes, diverses techniques de stabilisation sont mises en œuvre en génie civil. Ces méthodes visent à améliorer les propriétés des sols en renforçant leur portance, en réduisant leur sensibilité à l'humidité, et en augmentant leur durabilité. Parmi les options de traitement les plus couramment utilisées, on trouve les liants chimiques, tels que le ciment, les cendres volantes et la chaux, qui modifient durablement la structure des sols et les rendent aptes à supporter des charges plus importantes.

Le traitement à la chaux est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour améliorer les propriétés des sols argileux. Ce procédé consiste à ajouter de la chaux au sol,

provoquant des réactions physico-chimiques qui modifient ses propriétés. D'abord, la chaux réduit la plasticité des argiles en flocculant et agglomérant les particules, ce qui stabilise le sol face aux variations d'humidité. Ensuite, des réactions pouzzolaniques se développent, générant des composés cimentaires qui renforcent la cohésion et augmentent la résistance mécanique du sol sur le long terme.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet du traitement d'une argile à la chaux vive.

Chapitre I

Généralité

I.1 Introduction :

Les argiles sont des minéraux d'origine naturelle qui se forment à partir de la décomposition des roches, elles sont constituées par des grains de tailles inférieures à 2µm, elles se caractérisent par leurs structures en feuillets. L'argile est utilisée dans la construction et l'ingénierie civile.

Dans ce chapitre une recherche bibliographique sur les sols argileux est présentée. En premier lieu, nous définirons les argiles, ensuite nous explorons l'origine de l'argile en examinant comment elles se forment à partir des roches mères. Puis nous aborderons la structure des argiles.

Nous passerons encore aux différents types d'argile, en mettant en évidence leurs caractéristiques. Comme nous discuterons des propriétés de l'argile telles que la surface spécifique, la capacité d'échange cationique et la capacité d'adsorption de l'eau. Nous aborderons également les problèmes liés aux sols argileux, tels que le gonflement et le tassement. Enfin nous explorerons les différentes techniques de stabilisation des sols fins afin de résoudre ces problèmes.

I.2 Définition des sols

D'après le pédologue Albert Demolon le sol c'est la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants .

Selon la norme (NF XP 94-010), un sol est défini comme étant un agglomérat constitué de particules solides séparables par trituration sous l'eau provenant soit de la désagrégation des roches par altération mécanique ou chimique sous l'effet d'agents naturels, soit de la décomposition d'organismes vivants, végétaux ou animaux, soit d'une activité industrielle.

I.3 Définition de l'argile :

Le mot argile provient du latin Argilla. Ce même mot est dérivé du grec argillos, dont la racine, argos, signifie " d'une blancheur éclatante ". Du XIIe au XVIe siècles, argile se disait "Ardille", puis ce mot est devenu "arzille", puis "arsille" pour finir en "argile". [2]

L'argile est une roche sédimentaire d'origine détritique de nature silico-alumineuse mais peut renfermer des impuretés tels que les substances ferrugineuses. Elle est une roche

tendre, friable à l'ongle, ne fait pas effervescence avec un acide. En présence des chlorures de sodium, les fines particules d'argiles qui sont en suspension dans l'eau précipitent. [3].

Selon la classification des sols, le terme argile désigne aussi un domaine granulométrique comprenant une proportion élevée des particules minérales (plus de 50%) dont le diamètre des grains est inférieur à 2 μm . D'une manière générale, lorsque la proportion des particules argileuses dépasse 30% le sol est considéré comme une argile [4].

Autrement dit l'argile est une matière très fascinante en géologie. C'est une roche sédimentaire qui se forme à partir de la décomposition des minéraux, comme le feldspath, sous l'action du temps et de l'eau.

Les argiles peuvent être classées en deux grandes catégories :

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

I.4 Processus de formation des argiles :

La formation des sols argileux est due à un processus lent d'altération sous l'influence du climat, suivi de phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation. Les minéraux argileux, représentant 90 %, sont d'origine détritique. L'altération peut être physique (désagrégation des minéraux primaires) ou chimique (transformation chimique). Il existe certains minéraux argileux qui se déplacent à partir d'une solution (minéraux néoformés). [4]

Les minéraux argileux se forment donc selon trois processus.

I.4.1 Héritage et altération :

Une des causes des minéraux argileux est associée à la transformation physique des roches. Selon les roches mères et le climat, les minéraux argileux produits seront variés. Dans un climat froid, l'altération est minime, les minéraux argileux sont similaires ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. Dans des conditions climatiques chaudes et humides, l'hydrolyse est poussée, ce qui produit de la kaolinite dans des environnements drainés et des smectites dans des environnements confinés. Dans les climats tempérés et humides, l'altération est légère, avec des interstratifiés, des illites, des chlorites dégradés et des vermiculites. [5]

I.4.2 Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation :

Le processus de transformation des minéraux argileux implique une modification du minéral argileux tout en préservant sa structure.

On distingue la transformation par dégradation (soustraction d'ions) et l'aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces modifications se produisent aussi bien lors de l'altération que lors de la sédimentation et de la diagenèse.

I.4.3 Néof ormation en milieux conf in e :

Dans ce cas, les minéraux argileux sont formés en précipitant des ions en solution (silicium, aluminium et potassium) qui peuvent réagir entre eux lorsqu'ils sont confrontés par diffusion ou mélange.

Il existe donc les différents types de néoformations :

- La formation d'argiles fibreuses se produit dans des régions où la saison sèche est intense, dans des croûtes calcaires, dans des milieux évaporitiques sur salés (comme la néoformation de sépiolite par concentration d'ions par évaporation).
- Certains minéraux argileux se créent en surface grâce aux ions en solution :
 - Néof ormation de glauconie (illite ferrifère) dans les vases littorales.
 - Néof ormation des "argiles rouges des grands fonds" (Smectites ferrifères provenant des vases calcaires et siliceuses et des cendres volcaniques).

I.4.4 Contexte de formation des argiles :

La formation de sédiments océaniques argileux est directement liée au type d'altération qui règne sur les continents environnants et est donc influencée par latitude et la nature de la roche mère, ainsi que par l'éloignement des sources et les conditions physico-chimiques qui règnent dans la zone de sédimentation.

La roche mère joue également un rôle dans la minéralogie des argiles.

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

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

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

I.5 Structure des argiles :

Les particules d'argiles sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition de couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).

Les couches structurales sont à leur tour formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte [6].

La couche tétraédrique formée par un atome central A, en principe le silicium, entouré de quatre atomes d'oxygène (o), chaque tétraèdre est lié aux autres tétraèdres voisins en partageant trois angles. L'association de six tétraèdres forme une cavité hexagonale. L'épaisseur de la couche tétraédrique est de 4,6 Å.

La couche octaédrique est formée par un atome central A, souvent l'aluminium, entouré par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyde. Chaque octaèdre est connecté aux autres octaèdres voisins en partageant uniquement les arêtes entre eux.

L'épaisseur de cette couche octaédrique est de 5,05 Å.

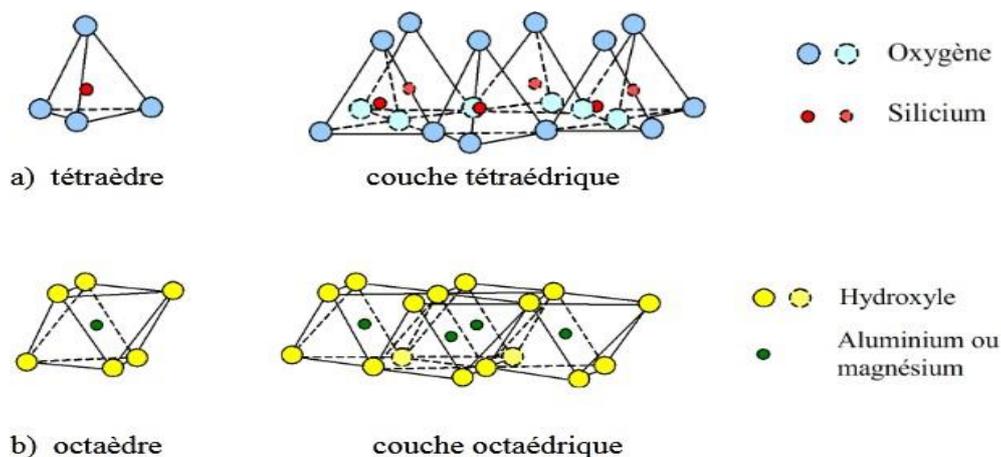


Figure I.1 représentation des couches tétraédriques et octaédriques.

I.6 Types d'argiles :

On distingue trois types différents d'argiles (minéralogique) : les kaolinites, les smectites, les illites.

a) Kaolinite :

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de silice (tétraèdre) et d'alumine (octaèdre) son nom vient de kaoliang, lieu géographique en chine. Chaque couche élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à 450°C.

la composition minéralogique d'un feuillet de la kaolinite est donnée par la formule suivantes : $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$. [7]

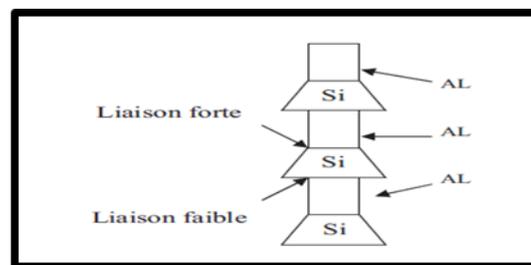


Figure I.2 Structure de la kaolinite [Lambe, 1953]

b) L'illite :

Le nom illite vient de l'état américain de l'Illinois, où l'illite a été décrite pour la première fois en 1937, le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine (octaèdre) entre deux couches silice (tétraèdre). [8]

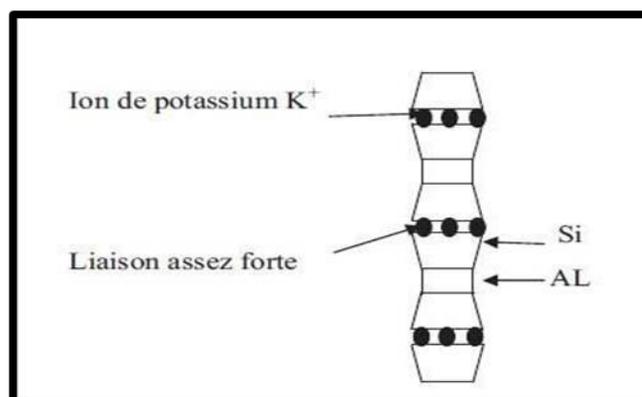


Figure I.3 Structure d'illite [Lambe, 1953]

Dans les couches tétraédriques un cation Si 4+ sur quatre est remplacé par un Cation

Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions de Potassium situés entre les feuillets compense les charges internes et bloque toute hydratation et expansion foliaire. L'illite est le minéral argileux le plus répandu dans la nature et est considéré comme une argile potentiellement gonflante. Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites [9].

La composition minéralogique d'un feuillet de l'illite est donnée par la formule suivantes : $n [(Si_{4-n} Al_n O_{10}) Al_2 K(OH)_4]$. [7]

Montmorillonite :

Les montmorillonites aussi appelés smectites sont des phyllosilicates de type 2/1, constitué de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique. [10]. Les substitutions isomorphes de Al^{3+} remplacé par Mg^{2+} à la surface des feuillets de grande extension latérale associés, les uns aux autres en nombre très variable selon l'humidité et la nature du cation échangeable (pedro, 1995)

Les smectites se caractérisent par leur capacité d'échange cationique élevée. Des molécules d'eau peuvent pénétrer entre les couches, l'argile est gonflante et l'unité structurale va varier de 10 à 21 Å. selon la concentration en eau elles absorbent donc plus d'eau que les autres. [11]

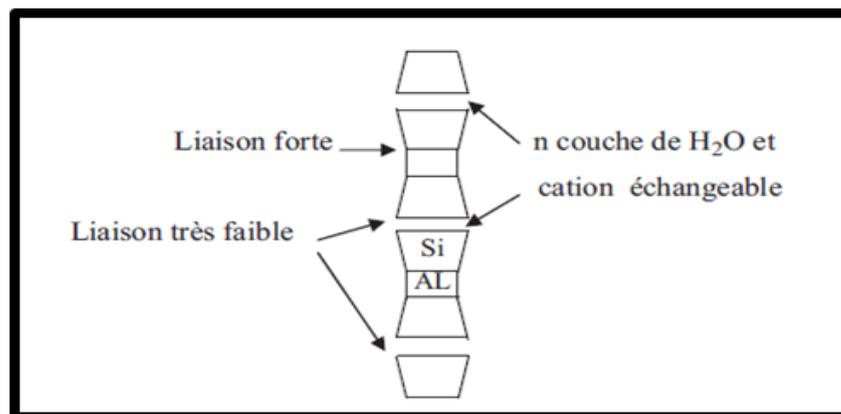


Figure I.4 Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953]

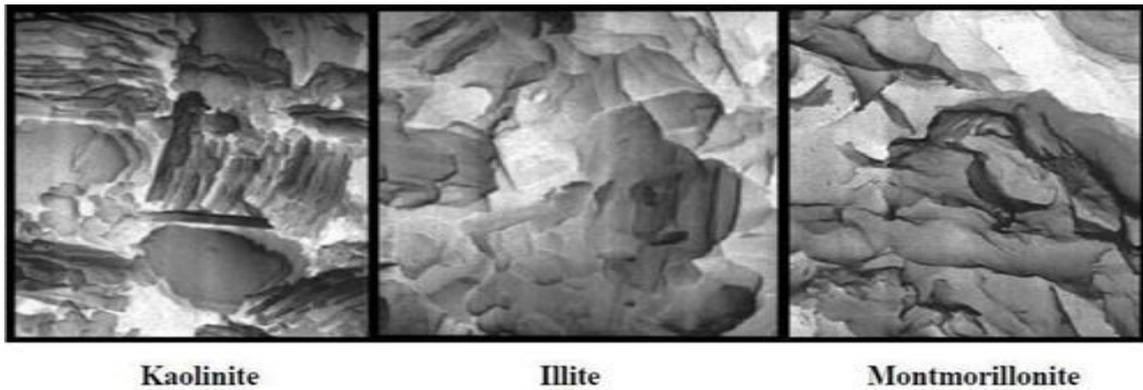


Figure I.5 : Schématisation des feuillets de montmorillonite. Illite de kaolinite (Morel R.1996)

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

Tableau I.1. Caractéristiques de quelques minéraux argileux [12]

Les minéraux argileux	kaolinite	L'illite	Montmorillonite
Charge (m.eq/100 g)	3-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m ² /g)	10-20	65-100	700-840
Gonflement	Très faible	Moyen	Fort
Nombre de feuillets par particule	100-200	1-10	1
Epaisseur d'une particule (μm)	1-10	0.003-0.01	0.001
Diamètres d'une particule (μm)	0.1-4	0.1-1	0.1
Feuillets élémentaires			

I.7 Propriétés des argiles :

I.7.1 Surface spécifique :

La surface spécifique d'un sol correspond à la proportion de l'air total des particules par rapport à sa masse sèche. [13]

$$s_s = \frac{s}{m} \quad (\text{m}^2/\text{g})$$

La fine taille des argiles leur confère une surface considérable par rapport à leur volume.

La surface spécifique totale des argiles correspondantes à la somme de la surface externe située entre les particules et la surface interne correspondant à la surface inter foliaire [14] elle peut atteindre plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de m^2/g , en raison de la consistance en feuillets des argiles [15] en raison de la consistance en feuille des argiles [16]. Plusieurs facteurs influencent la surface spécifique, tels que la nature du minéral argileux. La montmorillonite présente une surface spécifique très élevée ($800m^2/g$) par rapport à la kaolinite ($30m^2/g$). Cette différence concerne l'accessibilité ou non de l'espace inter foliaire. Si celui-ci n'est pas accessible, la surface interne ne sera pas considérée [17]

Dans l'étude des argiles, la surface spécifique revêt une grande importance car elle permet de comprendre leurs comportements en présence d'eau. Plus elle est élevée, plus la quantité d'eau pouvant être absorbée par les particules argileuses est élevée, ce qui entraîne une augmentation du pouvoir de gonflement du sol. [18]

I.7.2 Capacité d'échanges cationiques :

Afin d'établir l'électroneutralité au niveau de l'interface solide-liquide, les charges de surface seront compensées par des ions de charge opposées provenant de la solution, généralement des cations pour les argiles. La capacité d'échange cationique CEC est définie comme la quantité totale des sites superficiels accessibles aux cations [18]. Ce paramètre est exprimé en milliéquivalent par 100 grammes d'argile et varie dans le même sens que la densité de charge spécifique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surface spécifiques égales [20].

I.7.3 Capacité d'absorption de l'eau :

L'adsorption consiste à adhérer des molécules à la surface. Elle est également valable pour les liquides et les gaz. Cette fixation peut être ionique, électrostatique ou encore relative aux tensions superficielles [21].

La capacité des argiles à adsorber les molécules d'eau dépend de :

- La diminution de la charge positive due aux substitutions isomorphiques des cations Si^{4+} et Al^{3+} par certain cation de faible valence.
- La nature du cation échangeable : est-ce que le cation attire les molécules d'eau qui s'organisent de manière plus ou moins régulière autour de lui. Les cations polyvalents exercent une action plus intense que les cations monovalents, ce qui nécessite de

prendre en compte la taille de ces cations, qui leur permet ou non de se fixer dans la molécule d'eau. [22]

I.8 Les principaux problèmes des sols argileux :

Les principales menaces qui sont présentes sur les sols sont liées aux activités humaines mettent en péril les sols de notre planète. Elles font l'objet d'une surveillance particulière de la communauté scientifique et des pouvoirs publics.

I.8.1 Tassement :

Le tassement des sols s'effectue par compression due aux précipitations, au piétinement de l'homme et des animaux et à la charge des engins agricole dépassant la capacité portante du sol, provoquant une consolidation, le sol sous la structure se déplaçant verticalement et horizontalement. Les sols faibles et mal compactés sont particulièrement vulnérables.

Le tassement peut également être causé par d'autres facteurs, tels que les changements de teneur en eau (par exemple, les sols cohésifs saturés peuvent se ramollir, les sols cohésifs plus secs peuvent rétrécir), des excavations profondes et des tunnels, ainsi que l'effondrement des vides naturels ou des travaux miniers abandonnés.

Le tassement peut se produire presque immédiatement après l'application d'une charge ou prendre des années. Selon les conditions du sol sous-jacentes et la cause du mouvement. [23]

I.8.1.1 Types de tassement en géotechnique [23]

✓ Tassement uniforme

Si un tassement uniforme se produit, la structure (ou la route ou la voie ferrée) se tassera de la même quantité sur sa longueur et aucun dommage ne se produira - bien que l'ensemble de la structure soit plus bas, bien sûr.

✓ Tassement différentiel

Souvent cité dans les spécifications pour juger des performances de l'ingénierie géotechnique, le tassement différentiel se produit lorsqu'une partie d'une structure s'installe plus (ou plus rapidement) qu'une autre.

Si un bord d'une structure bouge plus qu'un autre, la structure s'inclinera - la tour penchée de Pise en est un excellent exemple - mais le tassement différentiel ne provoquera pas l'accumulation de contraintes et ne devrait donc pas causer de dommages. Cependant,

l'inclinaison peut devenir inacceptable (dans les bâtiments avec des machines sensibles, par exemple) ou peut conduire à une défaillance catastrophique, si l'inclinaison est excessive.

✓ **Tassement de courbure**

Si une structure s'incline, une ligne droite peut être tracée entre l'un de ses bords et l'autre. Si, cependant, cette ligne est en courbe, cela indique que différentes sections de la structure se déplacent à un degré plus ou moins important. Ce tassement de courbure peut provoquer des distorsions dans la structure, induisant des efforts de traction qui ne peuvent pas être supportés par les matériaux de construction (tels que la maçonnerie) ou par le revêtement routier. À terme, cela entraînera des dommages et des fissures (et dans les chemins de fer, une courbure excessive peut empêcher les trains de circuler sur des voies déformées).

La courbure peut être exprimée par le taux de déflexion : le mouvement vertical maximal, divisé par la longueur de la structure sur laquelle ce mouvement est mesuré. La courbure est donc un élément clé lors de l'évaluation de la performance de tassement des structures.

I.8.2 Erosion :

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

C'est aussi un processus d'altération de la structure du sol qui entraîne un détachement et le transport des particules du sol. Cet arrachement des particules peut être notamment lié à l'eau, au vent, ou aux outils de travail du sol.



Figure I.6 image représentant l'érosion des sols.

I.8.3 Problèmes de retrait-gonflement

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

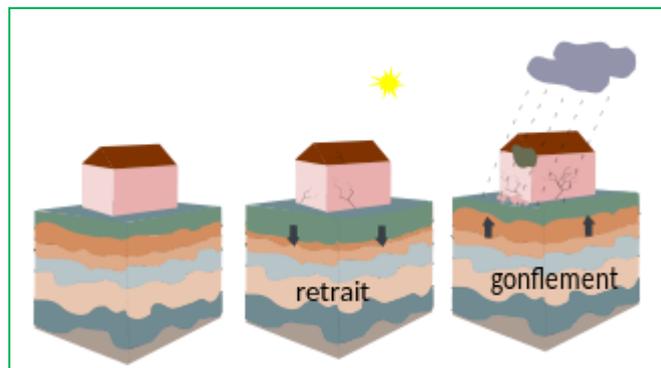


Figure I.7 Représentation du phénomène du retrait-gonflement.

Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutif à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle), et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'éléments jointifs). Les mouvements de terrain induits par le retrait et le gonflement des argiles se traduisent principalement par des fissurations en façade des habitations, souvent obliques, et passant par les points de faiblesse que constituent les ouvertures.

1.8.3.1 Définition des paramètres de gonflement :

L'approche macroscopique du gonflement est la plus adaptée en géotechnique. Elle distingue trois notions : la pression de gonflement, le potentiel de gonflement et l'indice de gonflement. Ces notions ne sont pas considérées comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent pas recevoir de définition objective, car elles dépendent des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement. Elles sont néanmoins très largement utilisées et ont largement influé sur les procédures d'essais au laboratoire. On les définit comme suit [24].

a) La pression de gonflement (σ_g) :

La pression de gonflement d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète. Cette définition de la pression de gonflement est la plus citée mais elle n'est pas la seule [24].

b) Le potentiel de gonflement (ε_g) :

Le potentiel de gonflement d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale ($\Delta h/h$) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète. [24].

c) L'indice de gonflement (C_g) :

Traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation par gonflement est obtenue au bout d'un temps d'équilibre. En principe, ces trois phénomènes sont mesurés sur des éprouvettes en compression isotrope ou œdométrique. Contrairement à la pression de gonflement et au potentiel de gonflement obtenus à la saturation du sol, l'indice de gonflement est issu d'un déchargement mécanique. [24].

1.8.4 Glissements de terrain et inondations :

Les glissements de terrain correspondent au déplacement de terrains meubles ou rocheux le long d'une surface de rupture. Ils peuvent provoquer des dommages collatéraux aux ouvrages et aux constructions, avec un impact économique sensible, et parfois causer des victimes.

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins

continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques), ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes. On distingue trois types de glissements :

- Glissement plan ;
- Glissement rotationnels simples ;
- Glissement rotationnels complexes (composés).



Figure I.8 image représentant le phénomène de glissement et inondation de terrain

I.8.5 Le fluage :

Le fluage est un mouvement de terrain très sournois. Il se fait très lentement, sans surface de rupture nette (sauf au stade ultime, à la rupture du sol) et sans variation apparente de sollicitation mécanique ou hydraulique.

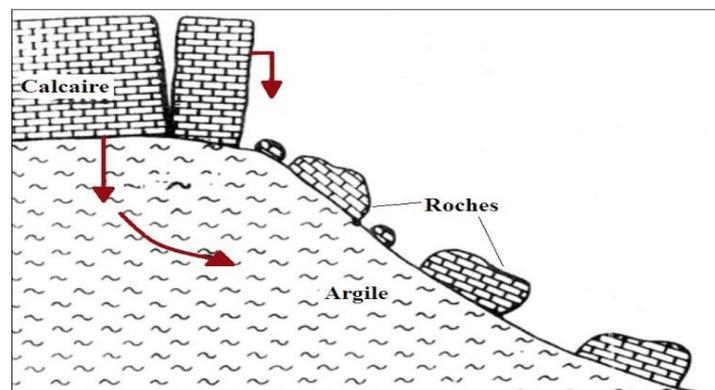


Figure I.9 Schéma général du mécanisme de fluage.

I.8.6 Les solifluxions

La solifluxion est un cas spécial de fluage. Ce phénomène est la conséquence des climats préglaciaires. Il est dû à l'alternance gel/dégel, de la teneur en eau du matériau superficiellement et les mouvements s'accroissent, ce phénomène peut présenter deux aspects :

- Glissement superficiel du manteau d'altération.
- Reptation, à haute altitude, du manteau de terre végétale.
- Un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement.

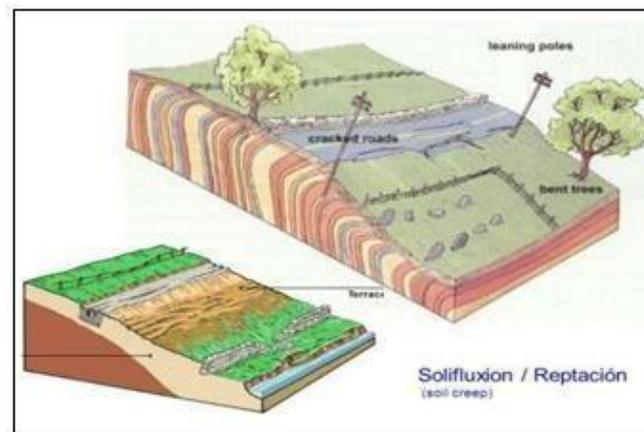


Figure I.10 Schéma de la solifluxion.

I.8.7 Les affaissements :

Les affaissements se caractérisent par une dépression topographique sans rupture apparente. On rencontre les affaissements dans des régions minières où il y a rupture en profondeur des galeries de mines. L'évolution de cavités souterraines dont l'effondrement est amorti par le comportement souple des terrains superficiels. Ces cavités peuvent être :

- Des vides naturels par dissolution de roches solubles, calcaires, gypses ;
- Des ouvrages souterrains exécutés sans précaution ;
- Des carrières souterraines (calcaire, craie, mines de sel, de charbon...).



Figure I.11 Image d'un affaissement de sol.

I.8.8 Salinisation :

La salinisation est le processus par lequel les sels solubles s'accumulent dans le sol et elle a été identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres. Les causes techniques les plus importantes à l'origine de la diminution de la production sur de nombreux périmètres irrigués, particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Il est estimé, à partir de diverses données disponibles que : Le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à cause de la salinité du sol.



Figure I.12 image représentant le phénomène de salinisation

I.8.9 Baisse de la biodiversité :

La biodiversité des sols comprend la faune (micro, méso et macrofaune) et la microflore (bactéries, champignons, algues). Moins de 10 % de la microflore du sol sont actuellement connus. On estime qu'un sol de prairie permanente recèle des millions d'individus par m², soit 1,5 tonne par hectare et plusieurs milliers d'espèces

I.8.10 Baisse des teneurs en matières organiques :

La matière organique provient de la transformation des débris végétaux par les organismes vivants du sol. La diminution de la teneur en matière organique dans les sols agricoles a été mise en évidence au niveau français

I.9 Stabilisation des sols :

I.9.1 Définition

Stabiliser un sol, au sens large du terme, consiste à modifier une des propriétés de ce sol en vue d'améliorer ces performances techniques [25]. Ou encore, selon Doat (1979) on appelle stabilisation des sols, l'ensemble des procédés permettant d'améliorer leurs caractéristiques. [25]

La stabilisation des sols est employée pour [25] :

- Augmenter la résistance, ou réduire sa sensibilité aux variations du milieu ambiant et plus spécialement aux variations de la teneur en eau ;
- Augmenter ou diminuer la perméabilité ;
- Réduire la compressibilité ;
- Réduire le gonflement.

I.9.2 Techniques de stabilisation :

Les sols peuvent être stabilisés par plusieurs méthodes, parmi ces méthodes on peut citer :

- Stabilisation mécanique
- Stabilisation chimique
- Stabilisation physique

I.9.2.1 Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique comprend deux méthodes :

a) Stabilisation par compactage (densification) :

Le compactage des sols est l'une des techniques utilisée en génie civil visant à améliorer la qualité des sols pour la construction. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, mais il reste très sensible à l'eau. En contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la texture de la terre [26].

Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal, les caractéristiques mesurées (la teneur en eau optimale (WOPN), et la densité sèche du sol la plus élevée (POPON) sont utilisées lors des études de la stabilisation et aussi lors d'exécution de travaux sur chantier. [27]

✓ **Mode de compactage :**

Il existe quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre [28]. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de 50% par rapport à la vibro-compression et de 20% par rapport à la compression statique [29]

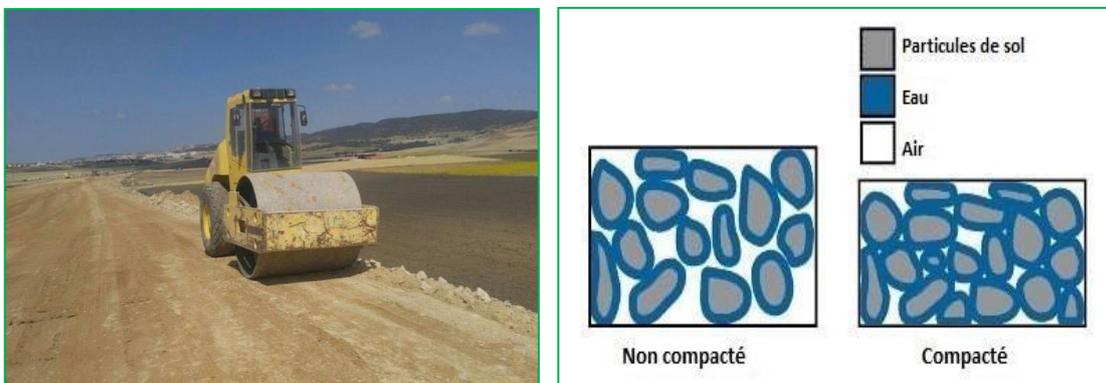


Figure I.13 images représentant les modes de compactages.

a) **Stabilisation par Vibro-compactage :**

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.



Figure I.14 image représentant le Vibro compactage.

La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative (Fig.I.14).

Ce procédé de vibro compactage est appelé aussi la vibro flottation. 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 localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.[30]

b) Stabilisation par dessiccation :

C'est une technique très ancienne, qui consiste à mouler la terre avec une teneur en eau élevée, sans compactage et à laisser les briques séchées au soleil. Cette méthode permet d'augmenter la cohésion du matériau grâce à l'élimination de l'humidité. Il est souhaitable de limiter les dimensions des éléments pour réduire les risques nuisibles de fissuration et de retrait. [31]

Stabilisation par pré-humidification : On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue, le volume restera sensiblement constant par la suite. Pour cela deux techniques sont utilisées :[32]

- Simple arrosage par jet
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant

I.9.2.2 Stabilisation chimique :

La stabilisation chimique consiste à ajouter des additifs au sol d'origine afin de former

de nouveaux matériaux cimentaires, améliorant ainsi les propriétés de sol. [33]

Cette technique est principalement utilisée avec les sols à texture fins comme les limons et les argiles. De nombreuses substances chimiques telles que la chaux, le ciment, le chlorure de calcium, le chlorure de sodium et divers matériaux silicatés ont été utilisés dans le passé pour stabiliser chimiquement le sol.

a. Stabilisation par des liants organiques

Les matériaux organiques sont utilisés depuis toujours dans la construction mais sont assez mal connus et surtout mal reconnus. Les bitumes, les matériaux composites, le bois, les liants routiers, les produits de réparation et de protection des bétons et des aciers, les peintures, les géo membranes et les géotextiles utilisés en géotechnique, les équipements des ouvrages d'art (appareils d'appui, corniches, gaines de haubanage, etc.) ou de la route (murs anti-bruit, glissières de sécurité en bois, etc.), les adjuvants pour bétons spéciaux... tous ces matériaux ont en commun une origine chimique qu'on appelle «organique» pour signifier qu'ils sont constitués de carbone et d'hydrogène avec un peu d'oxygène, d'azote et quelquefois de soufre, voire d'oligoéléments.

On utilise des produits organiques pour augmenter la résistance des matériaux fins en réduisant leur dépendance à l'eau en enrobant leurs particules d'un film tensioactif. Il s'agit de dérivés aminés tensioactifs, de résines liées à des agents durcisseurs ou d'extraits végétaux. On peut trouver ces additifs sous différentes formes : liquides, pâte ou poudre. Ils ont un effet d'imperméabilisation et/ou d'hydrophobisations qui diminue l'infiltration par capillarité et par succion, mais qui ne renforce pas les caractéristiques mécaniques des sols qui sont intrinsèquement faibles.

b. Stabilisation au ciment

La stabilisation au ciment s'utilise aussi bien pour la superstructure que pour l'infrastructure et autres travaux de terrassement, en particulier là où la pièce est censée être placée et soumise à des fortes contraintes. [34]. Elle convient plus particulièrement aux sols à faible plasticité qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux en raison de leur faible teneur en argile.

L'action de stabilisation par le ciment, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et de conditions de températures (Johnson, 1960). Ce traitement augmente la cohésion, la résistance mécanique et améliore la stabilité à l'eau et au gel [35].

c. Stabilisation par ajout des cendres volantes

Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons sub bitumineux,

présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme d'applications de stabilisation. Le traitement de cendres volantes peut efficacement réduire le potentiel de gonflement des argiles fortement plastiques et empêcher le gonflement sous les pressions plus petites de base. [36]

À l'étude de la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes, on a constaté que ces dernières sont efficaces pour l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement. La réduction des valeurs de la pression de gonflement des deux sols indique que le gonflement des sols est empêché pour de petites valeurs de pression.

Dans la même étude, des valeurs de CEC de capacité d'échange cationique ont été mesurées pour indiquer les changements de la minéralogie des cendres volantes des sols traités et ce pour expliquer la réduction du potentiel de plasticité et d'absorption de l'eau.

Les faibles valeurs de CEC indiquent que le traitement par les cendres volantes change la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires.

L'utilisation des cendres volantes comme matériaux de stabilisation pour le sol semble être une solution intéressante. Cette utilisation aurait des avantages, en plus de la stabilisation, environnementaux [37].

d. Stabilisation par solutions salines

Les sels sont des corps résultant de l'action d'un acide sur une base. Dans le domaine du génie civil, ils sont généralement utilisés pour lutter contre le gonflement de la formation argileuse, ils agissent sur l'équilibre de la pression osmotique et assurent une stabilisation des sols gonflants.

Des études ont été faites pour analyser l'effet des sels sur le gonflement libre des sols étudiés ; les échantillons ont été saturés dans une cellule œdométrique par des solutions salines à différentes concentrations. Ensuite le gonflement a été mesuré en fonction du temps jusqu'à stabilisation. Le gonflement final est comparé au gonflement final de l'argile saturée à l'eau. La réduction du gonflement final exprimée en pourcents est la différence entre les gonflements à l'eau et avec les solutions salines, rapportée au gonflement final en présence d'eau.

La réduction du gonflement est donnée par la relation :

$$DG = G_{\text{eau}} \% - G_{\text{sel}} \% \quad G = G_{\text{eau}} \%$$

Les paramètres qui déterminent le comportement gonflant des argiles sont déterminés par les essais d'identification soient : l'indice de plasticité, le pourcentage des particules argileuses, la valeur de l'essai au bleu de méthylène et la limite de retrait

- **Action de différents types des sels sur les caractéristiques des sols**

Différentes études [38], ont permis de conclure que :

- Les sels augmentent la résistance du sol à l'érosion comme le carbonate de calcium ;
- Les sels déshydratent les argiles comme le chlorure de sodium et le chlorure de calcium mais le chlorure de calcium est plus efficace.
- Les meilleurs résultats peuvent être obtenus par l'association d'un sel de potassium (KCl) et d'un polymère ;

Des travaux dans le but d'étudier l'influence des cations de Na^+ et Ca^{2+} sur la compressibilité du sol argile-silice sec et saturé permettent de dire que l'indice des vides est plus important dans l'échantillon riche en sodium qu'à celui riche en calcium ;

Les déformations dues au gonflement et au retrait sont influencées par la nature et la concentration en sel dissout dans l'eau déminéralisée. Il a été observé que le gonflement libre est plus élevé pour une solution de NaCl, plus faible pour une solution de KCl et intermédiaire pour une solution de CaCl_2 .

- e. **Stabilisation par ajout des mélanges**

(Ciment + cendres volantes ou chaux + cendres volantes)

Dernièrement, un certain nombre d'auteurs ont étudié l'influence de mélanges de (Chaux- cendres volantes), mélanges (ciment-cendres volantes) ou carrément le mélange de ces trois constituants, sur les sols gonflants. Les résultats obtenus étaient encourageants [39]

- f. **Stabilisation mixte (chaux-ciment) :**

Le traitement des sols humides et plastiques convient mieux avec un produit mixte (chaux- ciment). A cet effet, la chaux est utilisée en premier lieu à faible teneur dans le mélange et ensuite le ciment est ajouté. L'ajout de la chaux à l'argile provoque l'assèchement du sol trop humide. Le complément de ciment dans le mélange permet d'apporter une grande résistance

dès les premiers jours de traitement. Les deux liants minéraux sont complémentaires. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment s'ajoutent à ceux provenant du ciment dissout.

Pour le traitement mixte chaux-ciment, la résistance finale est atteinte en plusieurs phases comme pour le cas de la chaux. Pour un début, la stabilisation avec un liant mixte donne des résultats plus performants que les matériaux stabilisés uniquement par la chaux ou le ciment. Un dosage en chaux est suffisant pour corriger la plasticité du sol mais il donne des résultats mécaniques limités comme pour le cas des sols stabilisés par le ciment. Par ailleurs, pour des dosages élevés en chaux, l'évolution de la résistance continue pendant une période assez longue. En utilisant un dosage faible en chaux, avec un écart de trois heures d'additions des liants, les résistances mécaniques évoluent à court et à long terme.

g. Stabilisation des sols à la chaux :

- **Définition de la chaux :**

Selon la norme française la chaux est un terme général qui englobe des formes physiques et chimiques de divers types dans lesquels apparaissent l'oxyde de calcium CaO et de magnésium MgO et/ou l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

La chaux est une poudre fine obtenue par la calcination d'un calcaire pur, et selon la nature de celui-ci on peut obtenir plusieurs types de chaux qui diffèrent dans leurs compositions chimiques et leurs modes de prise [40].

Une chaux est caractérisée par divers paramètres tels que : sa concentration en chaux libre, exprimée en CaO , sa teneur en MgO , sa granulométrie et enfin sa réactivité, qui est évaluée à l'aide de l'essai de « réactivité à l'eau » défini par la norme NF P 98-102.

- **Type de la chaux :**

- **La chaux aérienne :**

Les chaux aériennes sont issues de pierre calcaire très pure de l'ordre de 95 à 99.5% de calcium (calcaire).



Figure I.15 la chaux aérienne

➤ **La chaux vive :**

Constitué principalement d'oxyde de calcium CaO et de magnésium, formé par la calcination de calcaire [41]. Elle est utilisée dans le traitement des matériaux humide. La chaux vive est caractérisée par son degré de calcination, qui détermine la quantité de dioxyde de carbone extraite du calcaire. Dans le contrôle de la production, on le mesurera généralement en tant que CO₂ résiduel. [42]

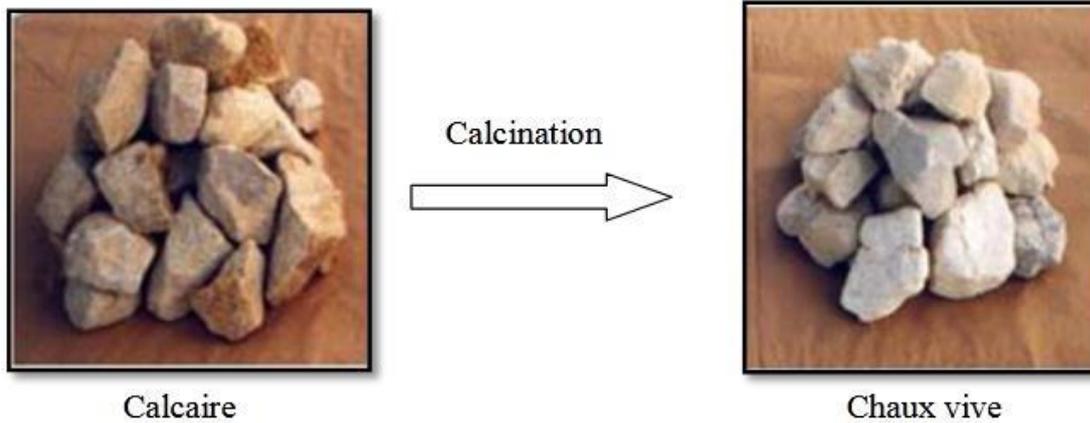
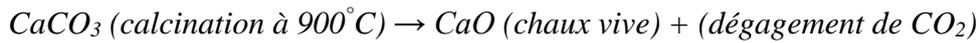
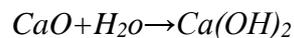


Figure I.16 chaux vive.

➤ **La chaux éteinte :**

La chaux éteinte est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Constitué essentiellement d'hydroxyde de calcium [43]. Ce type de chaux est utilisés pour le traitement de matériaux à faible teneur en eau. [43].

La réaction chimique peut être notée comme suit :



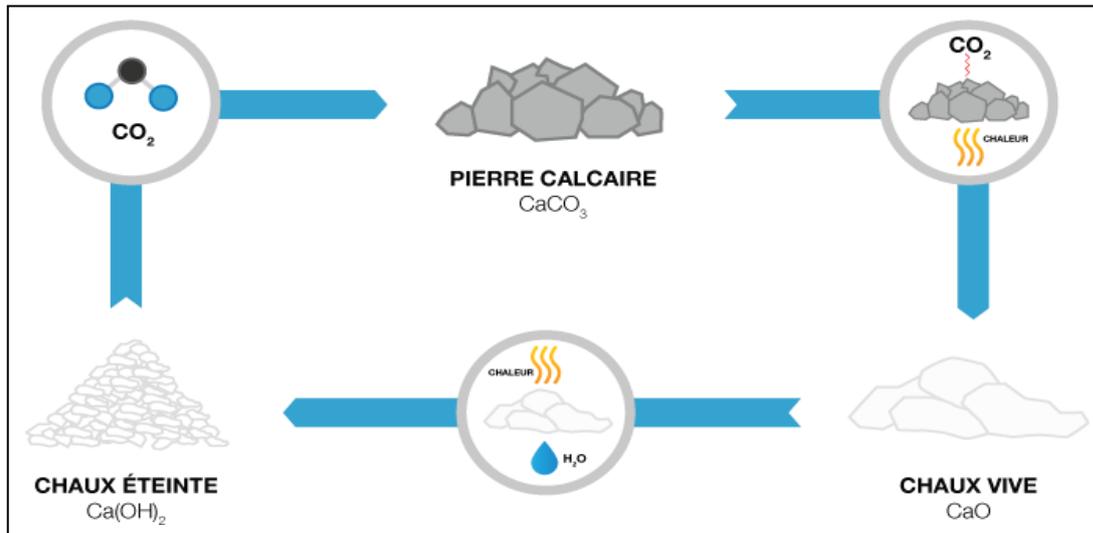


Figure I.17 cycle de fabrication de la chaux

➤ **La chaux hydraulique :**

La chaux hydraulique est obtenue par calcination d'un calcaire riche en silice et oxyde de fer. Les chaux hydrauliques sont constituées de silicate de calcium, d'aluminate de calcium, et d'hydroxyde de calcium.

• **Stabilisation à la chaux :**

Depuis plusieurs années, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a été largement réussie. En effet plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente [44]. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement entre 1 et 3%. Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux [45]. L'ajout de chaux aux sols fins contenant une fraction argileuse et en présence d'eau produit plusieurs réactions. À court terme, l'utilisation de la chaux entraîne une déshydratation du sol, une interaction cationique, une floculation du sol et une carbonatation du sol. Ces réactions entraînent des changements dans les caractéristiques physiques du sol. À long terme, la réaction pouzzolanique se produit, ce qui génère des agents de cimentation qui ont un impact sur la résistance du sol. [46]

Avantages de la stabilisation à la chaux :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres
- D'augmenter la résistance à la compression parfois aussi élevée que 60 fois

- De donner bonne consistance aux sols argileux pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé. [47].

Les inconvénients de la stabilisation à la chaux :

- La chaux est produite par la combustion de la pierre à chaux dans les fours, donc elle peut avoir des effets dangereux sur l'environnement ;
- Il a besoin de plus frais pour la pierre de chaux vive ;
- Il n'est pas efficace pour les sols sableux ;
- Il y a pourcentage limite de la quantité de chaux nécessaire environ 2 à 10% du sol ;

I.9.2.3 Stabilisation physique :

Pour stabiliser un sol, il est important de prendre en considération les caractéristiques physiques telles que la plasticité, la cohésion, la perméabilité et la compressibilité du sol. En comprenant ces propriétés, on peut choisir les méthodes de stabilisations les plus adaptées pour renforcer la solidité du sol.

La chaux peut être utilisée pour améliorer la plasticité, la cohésion et la perméabilité et la compressibilité du sol. En ajustant correctement la quantité de chaux en fonction de ces caractéristiques, on peut renforcer le sol et le rendre plus stable.

I.10 Conclusion

Il a été entrepris dans ce chapitre quelques notions générales sur les sols fins, notamment les argiles. Les différents problèmes d'instabilité liés aux argiles et les différentes techniques de stabilisation et d'amélioration des propriétés de ces sols.

Finalement des notions sur les ajouts utilisés dans le traitement des sols argileux.

Chapitre II

Matériaux et méthodes

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre on exposera les matériaux utilisés dans notre recherche, à savoir le sol (l'argile) et le matériau stabilisant (la chaux), ainsi qu'une description détaillée des essais réalisés. Les essais au laboratoire sont une procédure couramment utilisée pour évaluer les caractéristiques physiques, mécaniques ou chimiques d'un matériau selon des normes préconisées.

II.2 Les matériaux :

II.2.1 Le sol utilisé :

Le sol utilisé dans notre étude est une argile prélevée de la wilaya de Bejaia, une région connue par sa diversité et sa richesse de formations géologiques.

Cette argile a été soumise à une série de préparations avant son utilisation dans les essais de laboratoire. Ces préparations comprenaient l'étuvage, le broyage et le tamisage du matériau. L'étuvage a permis d'éliminer l'eau et l'humidité présentent dans l'échantillon, assurant une consistance homogène et évitant ainsi les variations des propriétés mécaniques dues à la présence d'eau. Le broyage a permis de réduire la taille des particules, améliorant ainsi la réactivité du sol dans les différents essais. Enfin, Le tamisage a été réalisé avec un tamis de maille 0.4mm, afin d'obtenir une granulométrie plus ou moins uniforme, éliminant les particules indésirables et garantissant que le sol utilisé soit représentatif de la fraction fine de l'argile.



Figure II.1 : broyage de l'argile

II.2.1.1 Les caractéristiques de sol utilisé :

Fraction des rayons X (FRX) :

C'est une technique utilisée pour analyser la composition élémentaire d'un échantillon. Les résultats donnés par le FRX sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : analyse chimique du sol

Composant	Symbole	Valeurs (%)
Aluminium	Al	6.79
Fer	Fe	3.45
Silice	Si	25.0
Calcium	Ca	13.46
Potassium	K	1.43
Magnésium	Mg	2.03
Sulfure	S	1.17

Donc le tableau II.1, indique que cette argile est riche en silice et en calcium, avec des teneurs considérable en aluminium et fer.

Diffractions des rayons X (DRX) :

La DRX est principalement utilisée pour déterminer les différentes phases cristallines présentes dans un matériau. Cette technique a donné le graphe ci-dessous :

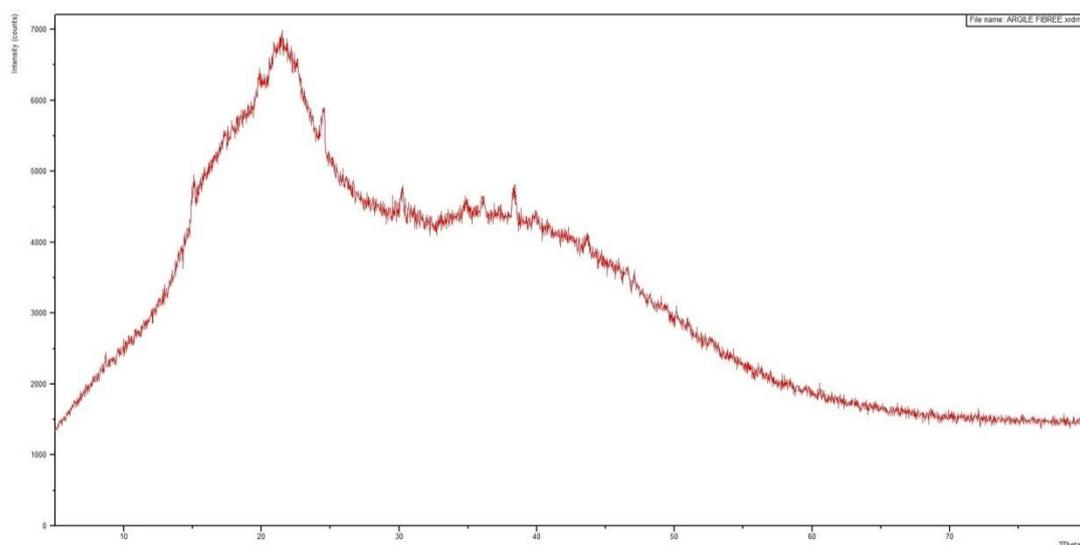


FIGURE II.2 : graphe de diffraction de X

Voyant la **figure II.2**, Axe des abscisses représente l'angle de diffraction souvent noté (2θ), mesuré en degrés, et l'axe des ordonnées c'est l'intensité de rayon X détectés, exprimé en unités de "comptes". Le graphique montre un pic principal aux alentours de 20° avec une intensité

maximale d'environ 6500 comptes. Ce pic principal est typiques des argiles et indique la présence d'une phase cristalline spécifique. Et d'autres pics secondaires après le pic principal qui indiquent la présence d'autres phases cristallines ou des impuretés dans l'échantillon.

II.2.2 La chaux utilisée:

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société SARL BMSD situé dans la ville de Saida. Les propriétés chimiques de la chaux sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : les caractéristiques chimiques de la chaux utilisée

Paramètres	Valeurs (%)
CaO	>70
MgO	<0.4
Fe ₂ O ₃	<2
SiO ₂	<2.2
So ₃	<1
Na ₂ O+K ₂ O	<0.4
Co ₂	<5
CaCo ₃	<10
Ca(OH) ₂	>90
Insoluble dans HCL	<0.35

Ce tableau indique que la chaux utilisée est riche en silice et en calcium.



Figure III.3 : La chaux utilisée

II.3 Les essais réalisés :

Les essais réalisés ont été effectués au laboratoire de mécanique des sols du département Génie Civil de l'université de Bejaia.

- **Essais d'identification :**

- La teneur en eau
- La granulométrie
- Les limites d'Atterberg

- **Essai de caractérisation :**

- Essai Proctor
- Essai Œdométrique
- Essai cisaillement direct à la boîte de Casagrande

II.3.1 Essais d'identification :

II.3.1.1 La teneur en eau :

La teneur en eau d'un sol est le paramètre d'état fondamental de son comportement. La détermination de cette teneur en eau est le premier essai à effectuer, permettant de connaître le pourcentage d'eau présent dans l'échantillon et classer le sol selon sa plasticité.

Elle définit le rapport en pourcentage du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs. L'obtention des éléments secs s'obtient par séchage du sol pendant 24 heures en étuve à 105°C.

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_d} \times 100$$

M_w : Masse d'eau évaporée (g).

M_d : Masse du matériau sec (g).

II.3.1.1.1 Matériels utilisés :

- Une balance ;
- Une étuve ;
- Une tare.

II.3.1.1.2 Mode opératoire :

On Prélève un échantillon d'argile, on le met dans la tare puis le peser afin d'obtenir la masse à l'état humide. Par la suite on place la tare dans l'étuve préchauffée à 105°C pendant 24 heures. Après 24 heures on pèse la tare contenant l'argile et on calcule la teneur en eau.



Figure II.4 : pesée et étuvage pour le calcul de la teneur en eau

II.3.1.2 L'analyse granulométrique par tamisage : (NF P 94-040)

II.3.1.2.1 Principe de l'essai :

Cet essai consiste à faire passer un l'échantillon de sol à travers une colonne de tamis de différentes ouvertures, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le classement des grains (suite à leur passage à travers les ouvertures) s'obtient par vibration de la colonne de tamis à l'aide d'une tamiseuse.

II.3.1.2.2 But de l'essai :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol, par la mesure de la quantité des particules retenues (le refus) ou passantes (le tamisât), afin de tracer la courbe granulométrique, ainsi caractériser le sol à étudier.

II.3.1.2.3 Matériels utilisés :

- Série de tamis avec différentes mailles ;
- Une balance ;
- Un fond de tamis ;
- Un couvercle ;
- Une tamiseuse ;
- Récipient.

II. 3.1.2.4 Mode opératoire :

On pose les différents tamis sur la tamiseuse. Commenant d'abord de la partie inférieure

en déposant le fond, puis la série de tamis de 0.08mm, 0.1mm, 0.125mm, 0.4mm, 0.63mm, 1.00mm, finalement le tamis avec 2.00mm d'ouverture, et le couvercle est également déposé en haut de la colonne, afin d'empêcher toute perte de matériau pendant le tamisage. Après on pèse 2,5 kg d'argile, et la déverser en haut de la colonne des tamis. Par la suite on démarre la tamiseuse et la laisser vibrer pendant 30 min. une fois l'opération est terminée on pèse le refus sur chaque tamis.



Figure II.5 : Essai d'analyse granulométrique

II.3.1.3 Les limites d'Atterberg : (NF P 94-051)

II.3.1.3.1 Principe de l'essai :

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau qui expriment les limites de consistance d'un sol. La limite de plasticité (W_p) est la teneur d'eau pour laquelle le sol commence à montrer un comportement plastique après avoir été solide. Alors que la limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau à partir de laquelle le sol change son comportement plastique en liquide.

L'essai s'effectue en deux phases :

- Mesurer la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande ;
- Mesurer la limite de plasticité par formation de rouleaux de 3mm de diamètre.

Afin de calculer l'indice de plasticité (I_p): est la différence entre W_L et W_p .

Tableau II.2 : Estimation de la plasticité d'un sol

l'indice de plasticité I_p	Degré de plasticité du sol
0 à 5	Sol non plastique
5 à 15	Sol peu plastique
15 à 40	Sol plastique
>40	Sol très plastique

II.3.1.3.2 But de l'essai :

Le but de cet essai est de déterminer les limites de consistance qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre l'état solide, plastique et liquide du sol.

II.3.1.3.3 Matériels utilisés :

Limite de liquidité :

- Appareil de Casagrande
- Plaque en verre
- Spatules
- Outil de rainure
- Pissette
- Balance
- Tares

Limites de plasticité :

- Plaque en verre
- Spatules
- Pissette
- Balance
- Tares



Figure II.6 : Appareillage d'essai limite d'Atterberg

II.3.1.3.4 Mode opératoire :

Limite de liquidité :

On prend 200 grammes d'argile tamisée à l'aide d'un tamis de $400\mu\text{m}$ est mélangée à une quantité d'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte molle, on l'étale sur la coupelle de manière à avoir une épaisseur à peu près constante, de 1cm. La pâte est rainurée à l'aide d'un outil à rainure dans la coupelle, de manière à la partager en deux parties égales. On soumet la coupelle à un certain nombre de chocs jusqu'à la fermeture de la rainure sur 1cm. Le nombre de chocs nécessaire à la fermeture est noté et on échantillonne environ 10 g dans la zone où la rainure s'est fermée pour mesurer la teneur en eau de la pâte. L'opération est répétée plusieurs fois avec des teneurs en eau différentes.



Figure II.7 : Mode opératoire de l'essai de la limite de liquidité

Limite de plasticité :

Former une petite boulette avec environ 70 grammes d'argile, rouler à la main sur la plaque en verre de telle sorte à obtenir un bâtonnet ; plusieurs cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Donc faut l'humidifier un peu.
- Le sol est fluide, le bâtonnet ne peut pas être fabriqué, on doit ajouter de l'argile.
- Le bâtonnet confectionner commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 10cm et 3mm d'épaisseur. Dans ce cas, le sol est à sa limite de plasticité, on pèse le bâtonnet fissuré et on l'introduit dans l'étuve à 105°C. On fait au moins 4 essais pour pouvoir calculer W_p .



Figure II.8 : Mode opératoire d'essai limite de plasticité

II.3.2 Essai de caractérisation :

II.3.2.1 Essai Proctor normal : (NF 94-093)

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, dont on peut citer

- La résistance des talus à l'érosion ;
- La stabilité des talus ;
- Le compactage et le tassement. ;
- Et la faible portance.

Le compactage est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides. L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de « l'essai Proctor ». Le compactage est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol (γ_d).

II.3.2.1.1 Principe de l'essai :

D'après la norme française (NF P 94-093), Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau, et le compacter dans un moule, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneurs en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

II.3.2.1.2 But de l'essai :

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore d'avoir une capacité portante maximale.

II.3.2.1.3 Matériels utilisés :

- Moule Proctor : C'est un cylindre métallique, ouvrable en deux demi-coquilles, que l'on peut fixer sur une plaque de base, et muni d'une hausse
- Dame Proctor
- Eprouvette graduée
- Bassine en plastique
- Des tares
- Petite truelle, pinceau
- Règle à araser



Figure II.9 : Appareillage de l'essai Proctor normal

II.3.2.1.4 Mode opératoire :

On prend 2 kg de sol préalablement préparé qu'on verse dans une bassine, on ajoute une certaine quantité d'eau, équivalente à la teneur souhaitée et proportionnelle au poids de l'argile utilisé, et on mélange. On divise le mélange en 3 quantités pratiquement égales. Peser le moule Proctor vide, introduire ensuite la première quantité dans le moule et la compacter à l'aide de la dame, quatre coups dans chacun cadran et le cinquième au milieu jusqu'à 25 coups, en respectant la hauteur de chute. Refaire le même processus pour les autres quantités. On enlève la hausse, puis on arase soigneusement le moule et on le nettoie puis on le pèse. Prélever deux prises sur l'échantillon, l'une en haut du moule et l'autre en bas, les mettre dans des tares pour peser puis les placer à l'étuver à 105°C pendant 24h. Après 24h à l'étuve peser les tares avec le sol sec. On augmente à chaque fois la teneur en eau de 2% puis on recommence l'essai ; faut avoir au moins 5 points.



Figure II.10 : Mode opératoire d'essai Proctor normal

II.3.2.2 Essai œdométrique : (XP P 94-090-1)

Les propriétés de consolidation et de compressibilité des sols jouent un rôle essentiel dans la compréhension de leur comportement face aux charges appliquées en particulier, dans le domaine de la géotechnique et de l'ingénierie de la construction.

Lors de l'application des charges à un sol, il se produit des déformations permanentes et les sollicitations résultantes par ces forces (verticales) sont appelées : le tassement. Donc le tassement représente la réduction de volume du sol sous l'effet d'une charge appliquée, ce qui entraîne un affaissement de la surface du sol.

II.3.2.2.1 Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la variation de hauteur, en fonction du temps, de l'échantillon de sol soumis à une contrainte σ . En général, ces mesures s'effectuent pendant une durée de 24 h pour un chargement donné. Au bout de 24 h on considère que la consolidation primaire est terminée. On procède alors au chargement suivant sur le même échantillon avec une contrainte en général deux fois supérieure à la contrainte précédente.

II.3.2.2.2 But de l'essai :

L'essai a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permettent d'estimer le tassement (ou le gonflement) d'un massif de sol.

II.3.2.2.3 Matériels utilisés :

- Moule œdométrique cylindrique ;
- Bâti de consolidation ;
- Pierres poreuses ;
- Plaque en verre ;
- Une Balance ;
- Pissette d'eau ;

- Fil métallique ;
- Papier filtre ;
- Règle à niveau ;
- Des charges à différents poids ;
- Un chronomètre ;
- Des tares.

II.3.2.2.4 Mode opératoire :



Figure II.11 : Appareillage et mode opératoire de l'essai œdométrique

On prépare l'échantillon avec une teneur en eau, on fait une carotte avec le moule cylindrique, l'araser avec le fil métallique. Ensuite le placer entre deux pierres poreuses et les papiers filtres dans le support du moule, puis on le met sur le bâti. Une fois le bras de levier de

l'appareil est mis à niveau, on place le comparateur et on le met à zéro. En fin, on sature l'éprouvette en remplissant la cellule de consolidation avec de l'eau. 24h après la saturation, on applique la première charge sur le plateau de charge et on note le tassement suivant les variations du temps indiqué sur la norme française (XP P 94-090-1). On augmente progressivement les charges toutes les 24h jusqu'à atteindre 4kg sans jamais enlever un poids, 24h après avoir appliqué la dernière charge, on commence à décharger progressivement, en effectuant les mêmes lectures que pour le chargement.

II.3.2.3 Essai de cisaillement à la boîte : (NF P 94-071-1)

La résistance au cisaillement d'un sol dépend de nombreux facteurs, tels que la nature et l'état du sol ainsi ses caractéristiques intrinsèques (C et ϕ), mais aussi de l'intensité des efforts exercés et la manière dont ces efforts sont appliqués.

II.3.2.3.1 Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placé dans une boîte de cisaillement constitué de deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. L'échantillon du sol à étudier est introduit dans la boîte sur laquelle on exerce une force. Un piston permet d'exercer un effort normal (N) constant pendant toute la durée de l'essai (pendant l'essai lui-même et la phase de consolidation éventuellement). On répète l'essai avec différentes valeurs de contraintes normales.

Les différents types d'essais sont classés en 03 familles suivant le comportement du sol :

- Essai non consolidé non drainé (U.U)
- Essai consolidé non drainé (C.U)
- Essai consolidé drainé (C.D)

II.3.2.3.2 But de l'essai :

Le but de l'essai de cisaillement direct est d'évaluer la résistance au cisaillement en présence d'une contrainte normale, et d'en déduire la valeur de l'angle de frottement (ϕ) et la cohésion (C), qui sont des caractéristiques mécaniques du sol.

II.3.2.3.3 Matériels utilisés :

- L'appareil de cisaillement à la boîte de Casagrande
- Un moule carré de section $6 \times 6 \text{ cm}^2$
- Une boîte de cisaillement carré
- Deux comparateurs (l'un horizontal l'autre vertical)
- Des plaques pour assurer un essai drainé ou non drainé

- Un outil de compactage
- Des charges
- Un piston



Figure II.12 : Appareillage de l'essai cisaillement à la boîte

II.3.2.3.4 Mode opératoire :

Une quantité du sol tamisé à $400\mu\text{m}$ est préparée avec l'optimum Proctor, divisée en trois échantillons afin de les consolider avec les différentes contraintes (50, 100 et 150 MPA). Noter le tassement pendant une heure. Après 24 heures de consolidation, on fait une carotte avec le moule carré, puis on place la plaque drainante au fond de la demi-boîte inférieure, ensuite on met l'échantillon carotté avec la plaque drainante tout en fixant les deux demi boîtes avec les boulons, on pose le piston, on fait rentrer la boîte dans son support. Une fois la boîte est placée on maintient avec une main l'étrier de chargement en contact avec le piston de la boîte, puis on met à niveau le bras de levier ; charger ensuite le plateau des masses avec les charges nécessaires calculées d'après la relation ($\sigma = \frac{F}{S}$), on met à zéro les deux comparateurs, et on lance l'essai en notant toutes les 15 seconds le déplacement horizontal et l'effort de cisaillement ainsi le déplacement vertical. On recommence les mêmes étapes pour les 02 autres échantillons.

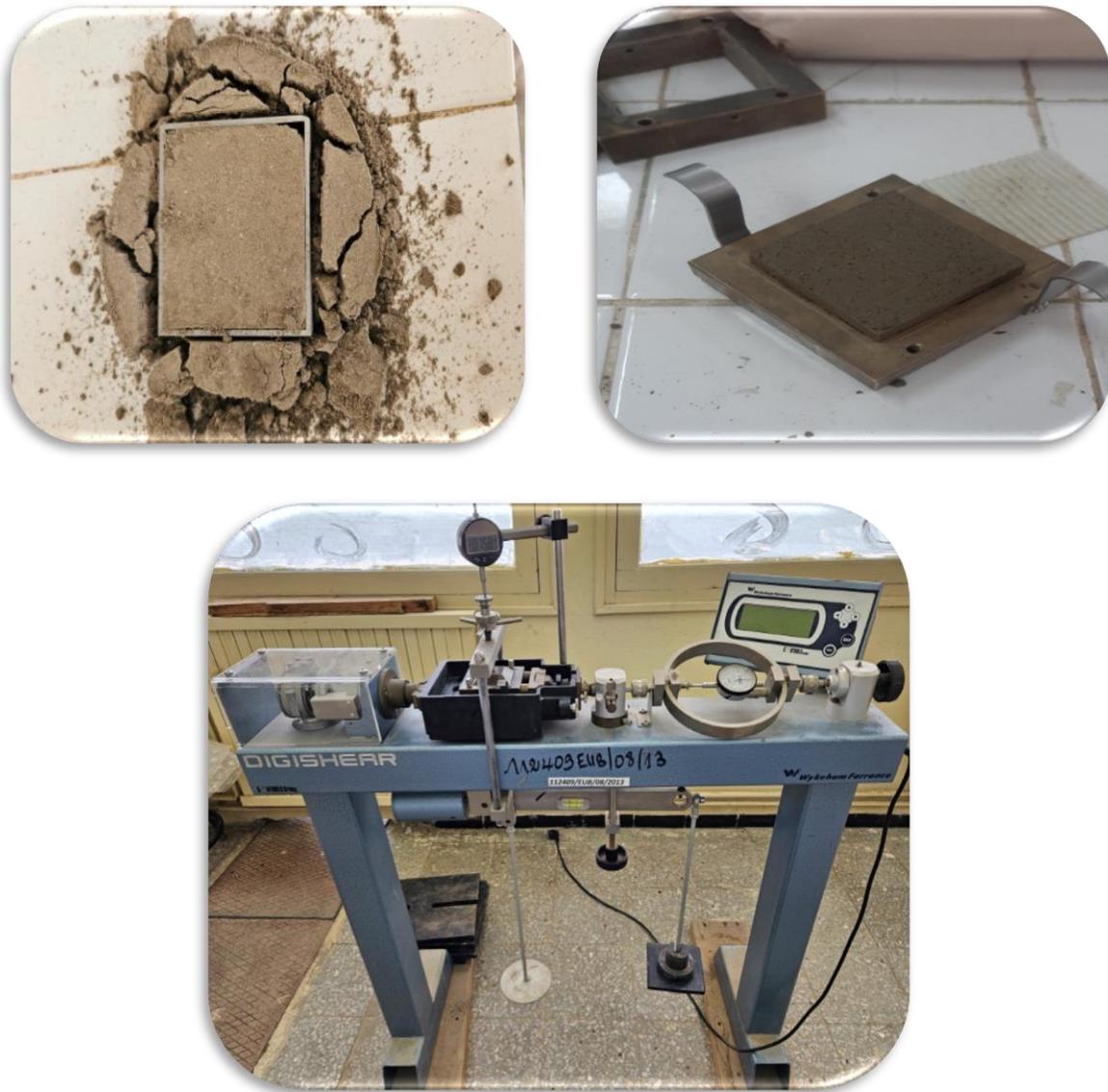


Figure II.13 : Mode opératoire d'essai cisaillement à la boîte

II.4. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre nous a permis de déterminer le matériau qui fait notre étude, ainsi que d'identifier l'ensemble des équipements utilisés en exposant le principe et le but de chaque essai, afin de comprendre clairement les procédures suivies. Dans le but de caractériser notre matériau.

Chapitre III

Interprétation des résultats

III.1 Introduction :

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'une synthèse des résultats expérimentaux obtenus lors des essais (d'identifications et de caractérisations), conduits au laboratoire sur notre argile naturelle et celle traitée avec les différents pourcentages de la chaux (2%, 6% et 10%).

III.2 Essais d'identification :

III.2.1 Teneur en eau :

Le calcul de la teneur en eau initiale de notre argile est présenté dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : résultats de la teneur en eau initiale

N° de la tare	Masse du sol humide + la tare (g)	Masse du sol sec + la tare (g)	Masse de la tare (g)	Masse du sol sec (g)	Masse d'eau évaporée (g)	Teneur en eau W (%)
21	108.9	105.2	31.2	74	3.7	5

III.2.1.1 Interprétation des résultats :

D'après les résultats présentés au tableau III.1 on déduit que notre argile a une faible teneur en eau. Il est à noter que ce calcul a été fait le jour où on a ramené l'argile de la briqueterie.

III.2.2 Analyse granulométrique par tamisage :

Cet essai est réalisé afin de déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. L'analyse est faite sur des échantillons d'argile après broyage (sans tamisage préalable) à sec à l'aide d'une tamiseuse. L'échantillon est mis dans une série de tamis soumise à des vibrations pendant 30 mn.

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 : résultats d'essai analyse granulométrique par tamisage

Ouvertures des tamis (mm)	Masse des refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
2.00	0	0	0	100
1.00	86	86	3.44	96.56
0.63	744	830	33.2	66.8
0.4	360	1190	47.6	52.4

0.125	926	2116	84.64	15.36
0.1	166	2282	91.28	8.27
0.08	124	2406	96.28	3.76
Fond	91	2497	99.88	0.12

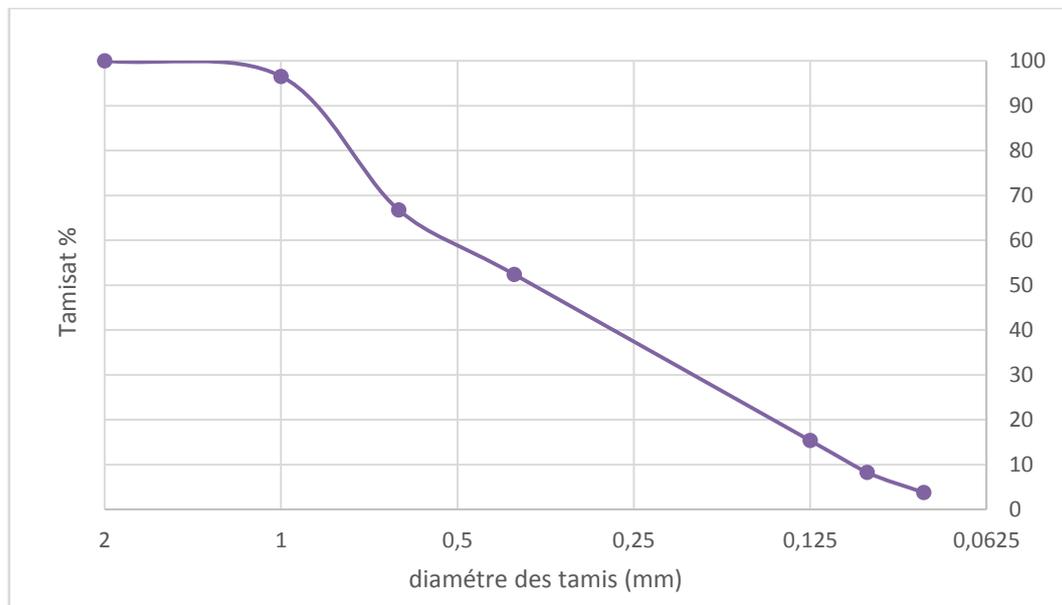


Figure III.1 : courbe granulométrique du sol utilisé

D'après la figure III.1 on déduit que c'est une granulométrie étalée.

III.2.3 Les limites d'Atterberg :

Les résultats des essais des limites d'Atterberg réalisés sur le sol naturel (sans ajout) ou avec ajout de la chaux, selon la norme NF P 94-051, marquent les seuils de passage entre l'état liquide à l'état plastique pour (w_l) et le passage de l'état plastique à l'état solide pour (w_p). Ils sont exposés dans ce qui suit.

Ainsi les valeurs de ces valeurs de transition d'état à un autre état du sol. La différence entre la limite de liquidité et de plasticité

III.2.3.1 Limite de liquidité :

La limite de liquidité du sol est la teneur en eau qui se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande, les valeurs expérimentales obtenues sont exposées dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : résultats de la limite de liquidité du sol naturel.

Ouvertures des tamis (mm)	Masse des refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
2.00	0	0	0	100
1.00	86	86	3.44	96.56
0.63	744	830	33.2	66.8
0.4	360	1190	47.6	52.4
0.125	926	2116	84.64	15.36
0.1	166	2282	91.28	8.27
0.08	124	2406	96.28	3.76
Fond	91	2497	99.88	0.12

On trace la droite qui passe par le maximum de points expérimentaux, correspondant à la teneur en eau en fonction de nombre des coups. La limite de liquidité est déterminée par projection sur l'axe des ordonnées du point qui correspond à 25 coups (figure III.2).

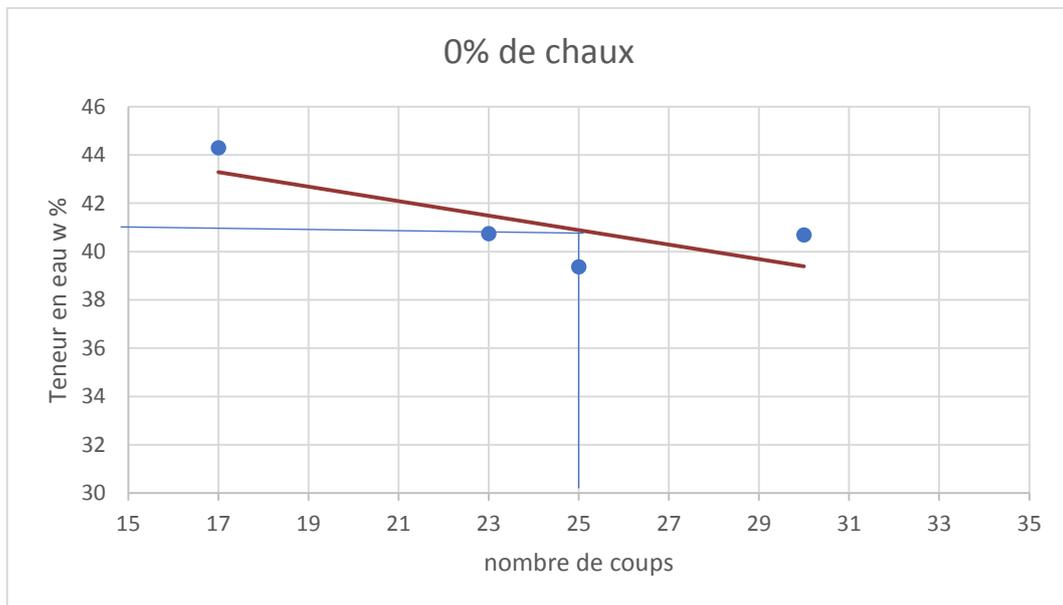


Figure III.2 : limite de liquidité de l'argile sans ajout

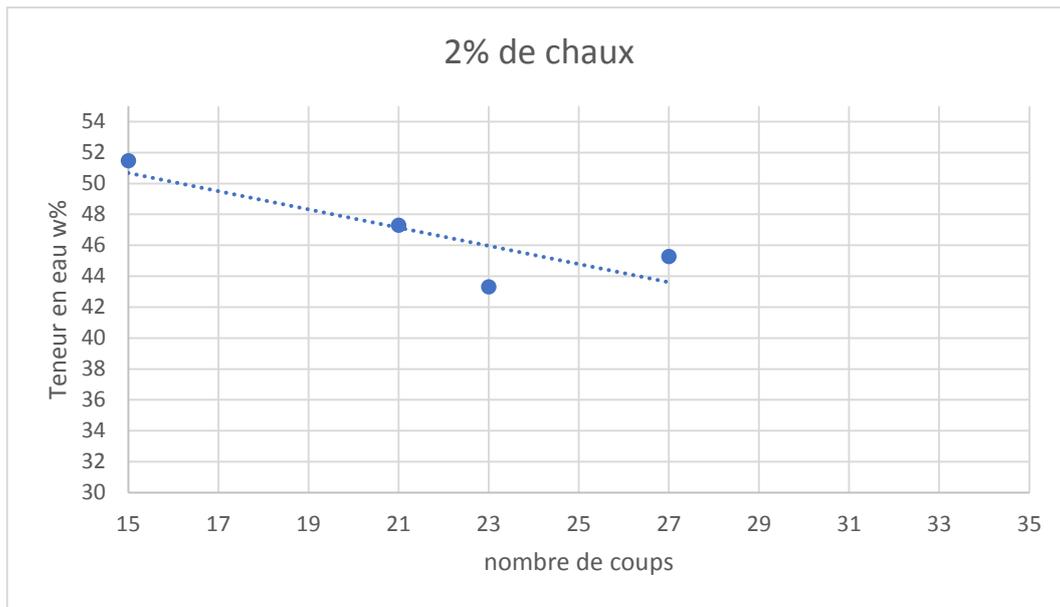


Figure III.3 : limite de liquidité de l'argile avec 2% de chaux

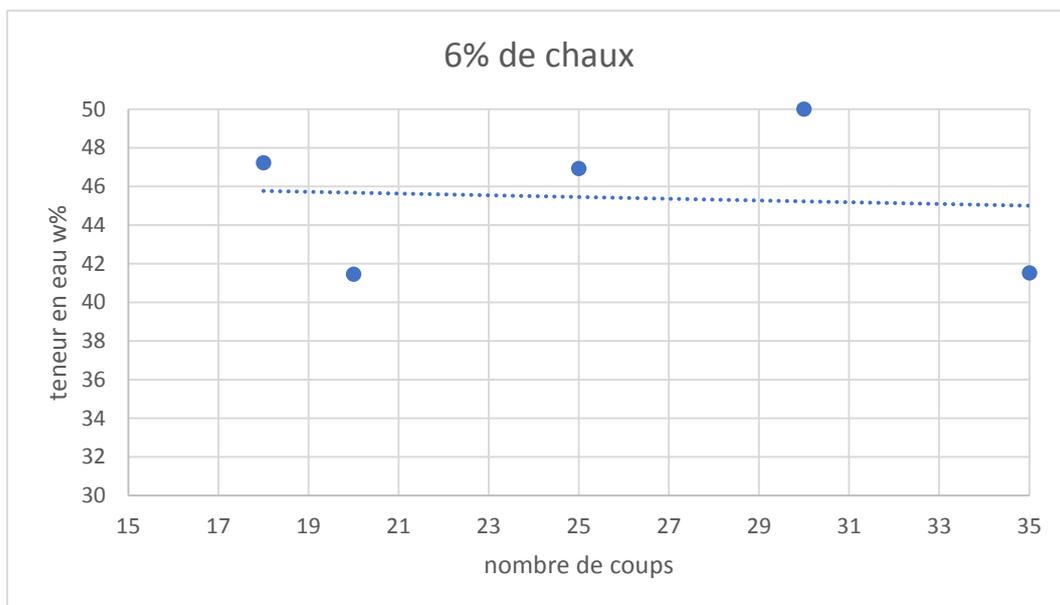


Figure III.4 : limite de liquidité de l'argile avec 6% de chaux

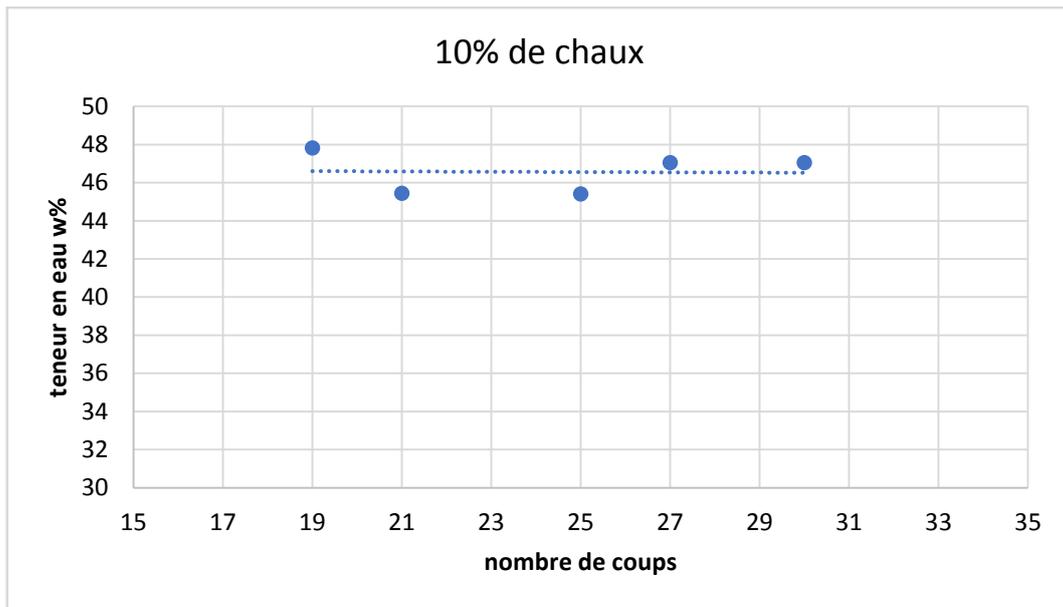


Figure III.5 : limite de liquidité de l'argile avec 10% de chaux

III.2.3.2 Limite de plasticité : (sol naturel)

Tableau III.4 : limite de plasticité du sol naturel

N° de la tare	66	3'	12'	8'
Masse du Sol humide + la tare (g)	9.2	19.2	19.5	19.3
Masse du sol sec + la tare (g)	8.8	18.9	19.2	19
Masse de la tare (g)	7.4	17.7	18.4	18.1
Masse du sol sec (g)	1.4	1.2	0.8	0.9
Masse d'eau évaporée (g)	0.4	0.3	0.3	0.3
Teneur en eau W (%)	28.57	25	37.5	33.33
Limite de plasticité $W_P(\%)$	31.1			
Indice de plasticité	10.9			

III.2.3.3 Interprétation des résultats :

On constate d'après les résultats du tableau III.4 que notre argile, est une argile peu plastique ($5 < I_p = 10.9 < 15$).

Les résultats du sol traité avec différents pourcentages d'ajout sont résumés dans le tableau qui suit :

Tableau III.5 : limite de plasticité et de liquidité des différents dosages de la chaux

Dosage de la chaux	2%	6%	10%
Limite de liquidité W_L (%)	44.9	45.7	46.5
Limite de plasticité W_p (%)	31.25	31.38	32.22
Indice de plasticité	13.65	14.32	14.28

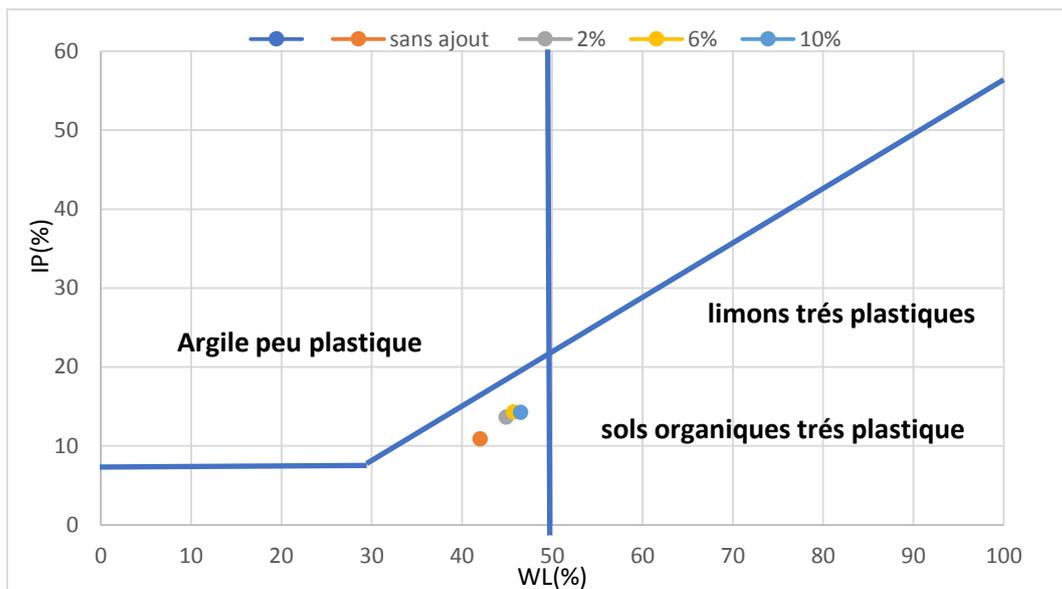


Figure III.6 : l’abaque de Casagrande relatif aux quatre essais réalisés.

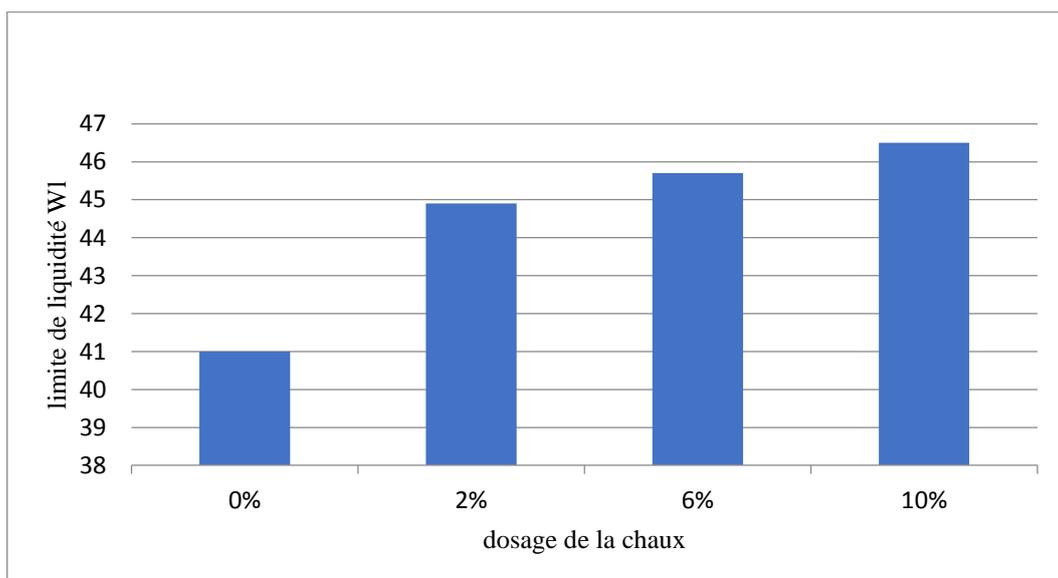


Figure III.7 : Histogramme de limite de liquidité des différents dosages en chaux

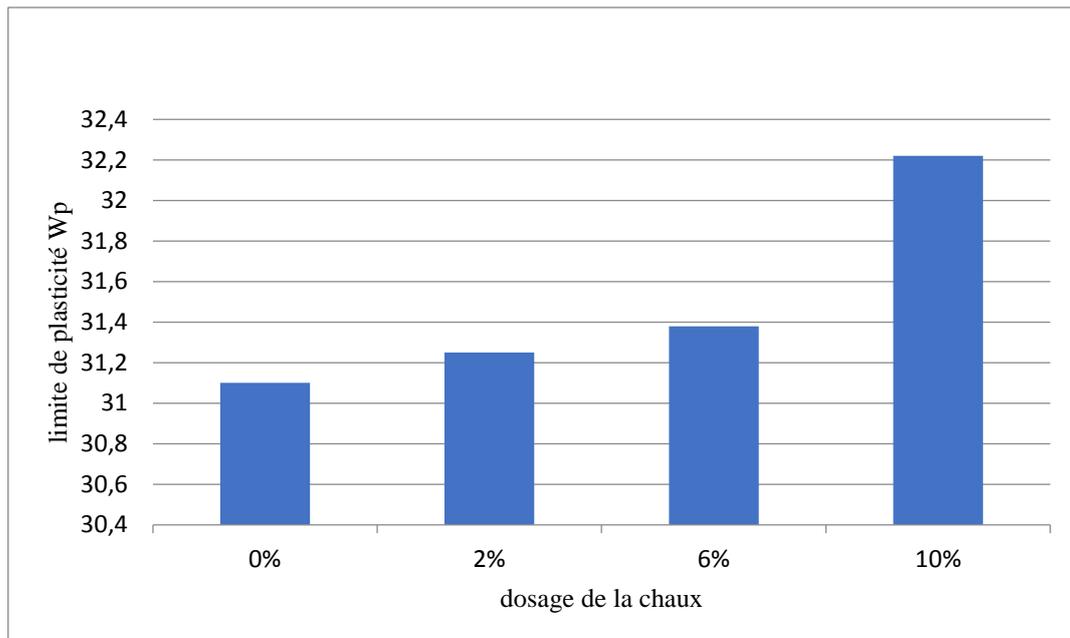


Figure III.8 : Histogramme de limite de plasticité des différents dosages en chaux

III.2.3.4 Interprétation des résultats :

Les tableaux III.3, III.5 et les figures III.7 représentée l'évolution de la limite de liquidité suivant la fonction des pourcentages de la chaux ajoutée. On observe l'augmentation de la limite de liquidité par rapport à celle de sans ajout.

Regardant la figure III.8, et le tableau III.5 on voit l'augmentation de la limite de plasticité Des sols traités.

L'augmentation de la limite de plasticité et de plasticité, est due à la floculation des particules du sol.

III.3 Essais de caractérisation :

III.3.1 Essai Proctor normal :

Les tableaux qui suivent résumant les résultats obtenus de l'essai Proctor normale pour le sol sans ajout et avec ajout :

Tableau III.6 : Résultats d'essai Proctor Normale pour un sol naturel.

Sol naturel										
Teneur en eau approximative (%)	12%		14%		16%		18%		20%	
Masse du moule vide (g)	3.416		3.416		3.416		3.416		3.416	
Volume du moule (cm ³)	943.69		943.69		943.69		943.69		943.69	
Masse du sol humide + le moule	5.162		5.286		5.324		5.334		5.282	
Masse du sol humide (g)	1.746		1.87		1.908		1.918		1.866	
Masse volumique humide (kg/m ³)	1850.183		1981.582		2021.850		2032.447		1977.344	
N° tare	90'	59'	11'	84'	7	33'	53'	40'	4	82'
Masse de la tare (g)	18.5	17.4	18.6	17.7	21.8	18.4	17.2	18.4	22.2	17.8
Masse du sol humide + la tare (g)	36.5	38	42	45.9	34.2	30.2	40.5	42.3	43.1	38.2
Masse du sol sec + la tare (g)	34.7	35.8	39.1	42.6	32.5	28.7	37.1	39	39.9	35.1
Masse du sol sec (g)	16.2	18.4	20.5	24.9	10.7	10.3	19.9	20.6	17.7	17.3
Masse d'eau évaporée (g)	18	20.6	23.4	28.2	12.4	11.8	23.3	23.9	20.9	20.4
Teneur en eau W (%)	11.11	11.956	14.146	13.225	15.887	14.56	17.085	16.019	18.079	17.919
Teneur en eau moyenne W _{moy} (%)	11.533		13.7005		15.224		16.552		18	
Masse volumique sèche (kg/m ³)	1658.865		1742.808		1754.712		1743.811		1675.715	
W _{opt} (%)	15.224									
Y _d max (kg/m ³)	1754.712									

Tableau III.7 : résultats d'essai Proctor normal du sol traité

		Teneur en eau approximative	14%	16%	18%	20%	22%
Dosage de la chaux	2%	W_{moy}	14.321	16.424	18.53	21.35	22.46
		γ_d	1512.078	1538.207	1609.218	1641.680	1567.958
	6%	W_{moy}	12.515	13.975	15.4005	16.763	18.59
		γ_d	1599.16	1674.28	1713.59	1742.56	1689.49
	10%	W_{moy}	12.969	14.856	15.972	16.965	18.634
		γ_d	1386.931	1409.744	1518.888	1500.289	1441.667

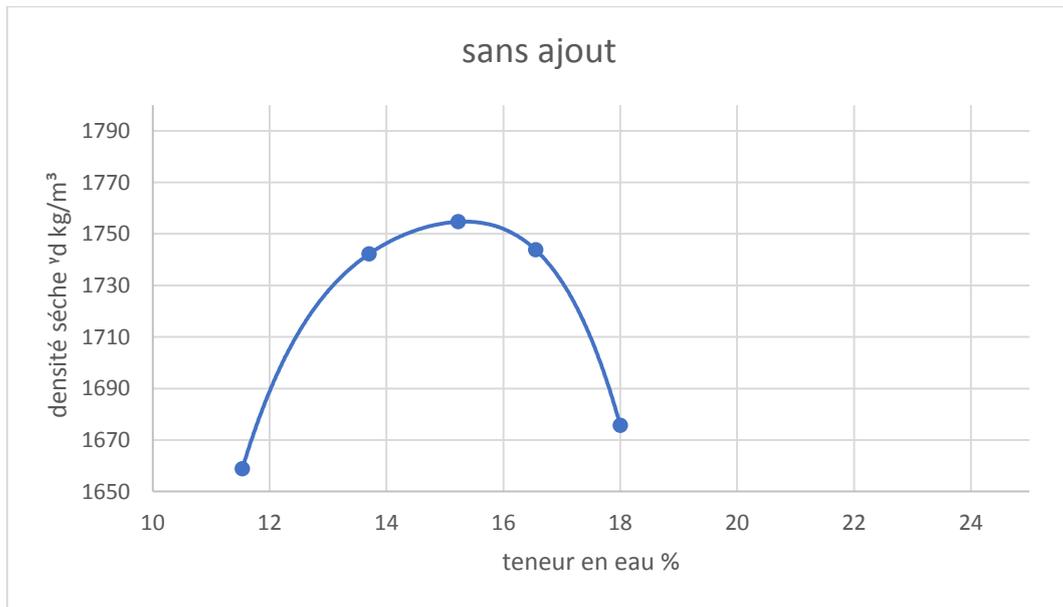


Figure III.9 : courbe de compactage pour l'argile sans ajout

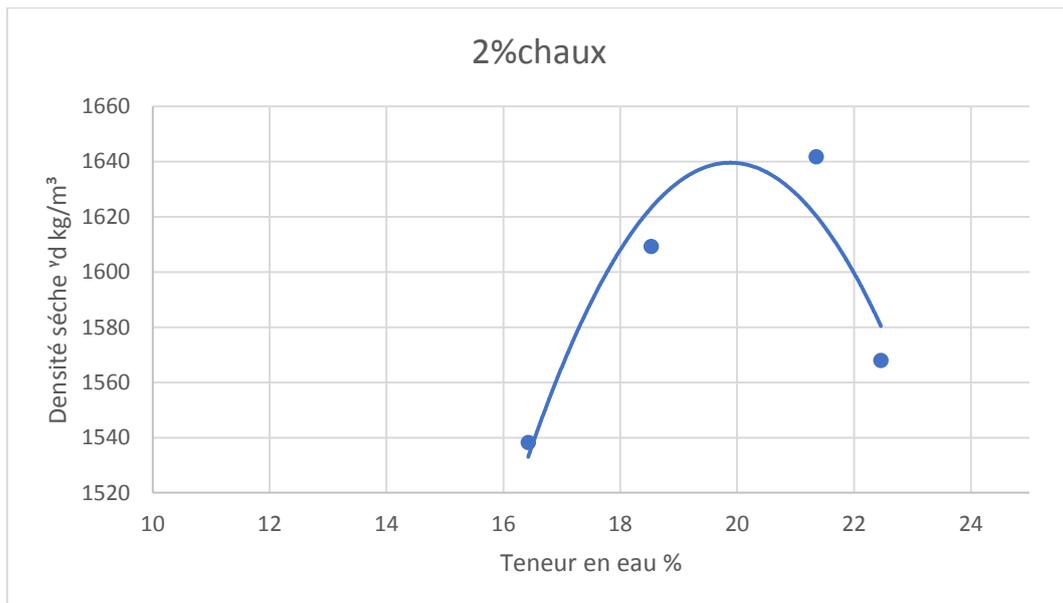


Figure III.10: courbe de compactage de l'argile traitée avec 2% de chaux

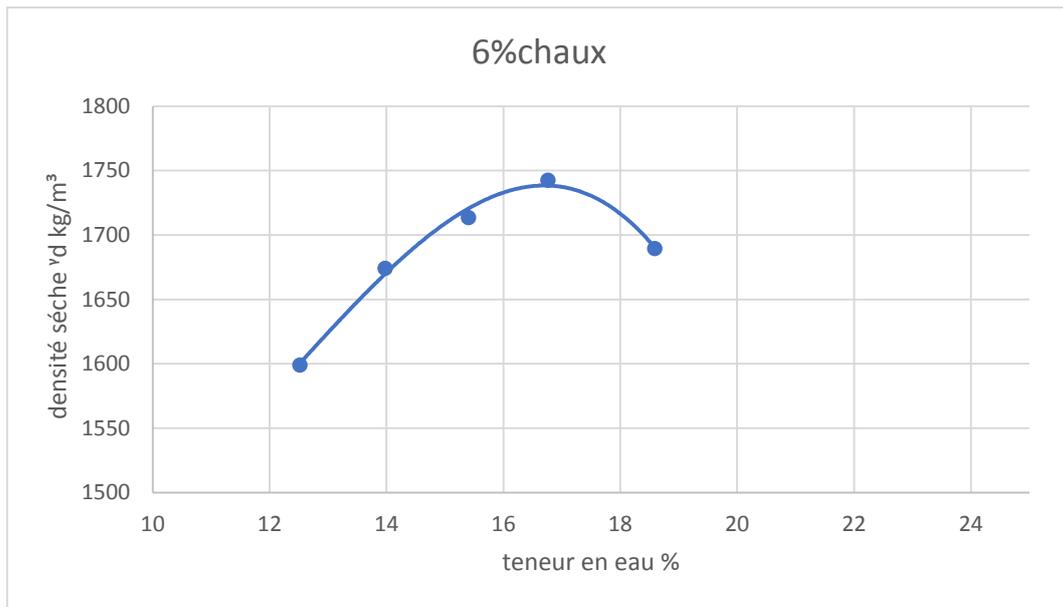


Figure III.11 : courbe de compactage de l'argile traitée avec 6% de chaux

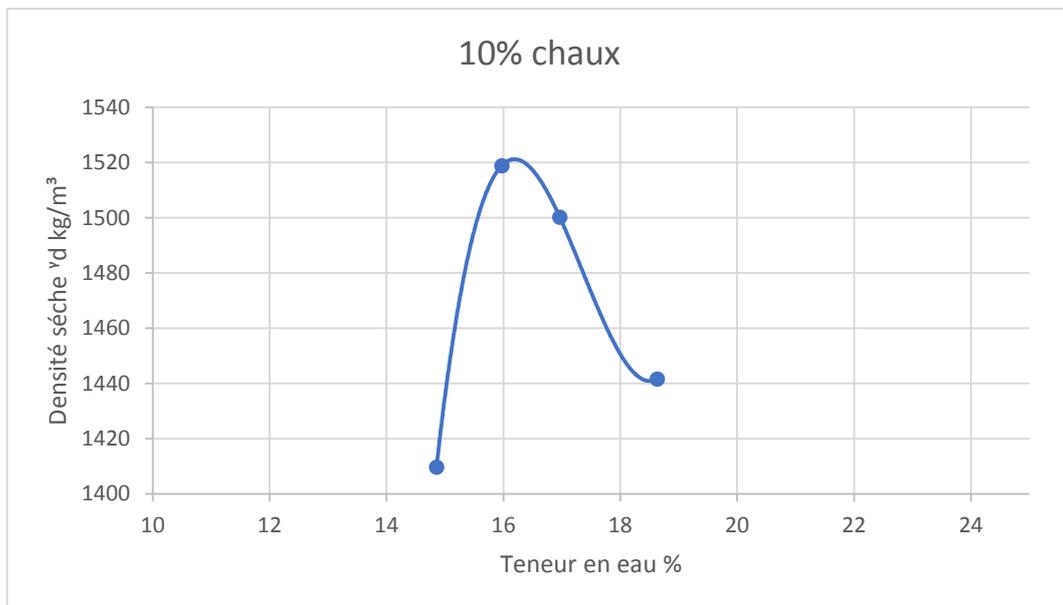


Figure III.12 : courbe de compactage de l'argile traitée avec 10% de chaux

Tableau III.8 : récapitulatif des résultats de compactage sur le sol traité

Dosage de la chaux	2%	6%	10%
Teneur en eau optimale $W_{opt}(\%)$	21.35	16.763	16.965
Densité sèche maximale $\gamma_{dmax}(kg/m^3)$	1641.68	1742.56	1520.28

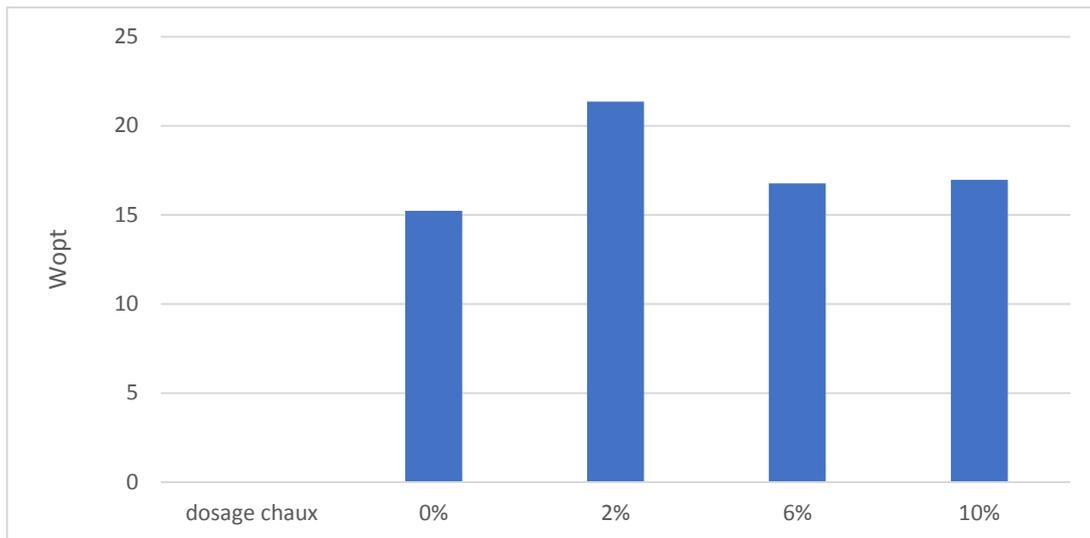


Figure III.14 : histogramme de la teneur en eau optimale en fonction des teneurs en chaux

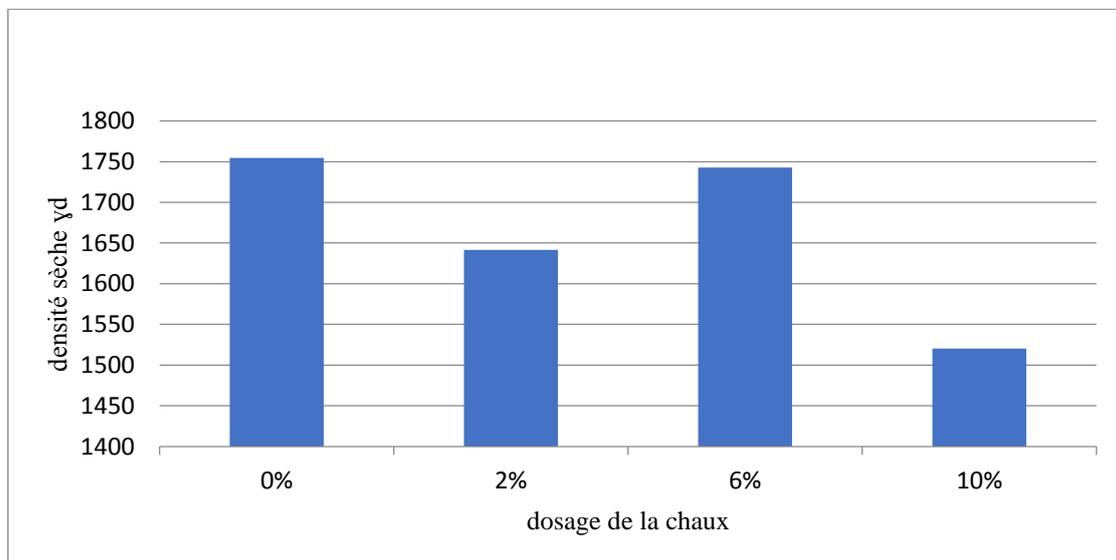


Figure III.13 : histogramme de la densité sèche en fonction des différents teneurs en chaux.

III.3.1.1 Interprétation des résultats :

Les tableaux (III.6, III.8.) et les figures (III.11, III.12) présentent les résultats des essais de compactage Proctor Normal à déférent teneur en eau avec ajout, on constate la diminution de la densité sèche, contrairement à la teneur en eau optimale qui augmente, par rapport à la densité sèche et le teneur en eau optimale du sol naturel.

La diminution de la densité sèche est due à la faible masse volumique de la chaux. L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'accroissement de la surface totale des particules des mélanges traités par les grains fins de la chaux.

III.3.1 Essai cisaillement à la boîte :

Les figures suivantes représentent les graphes de cisaillement :

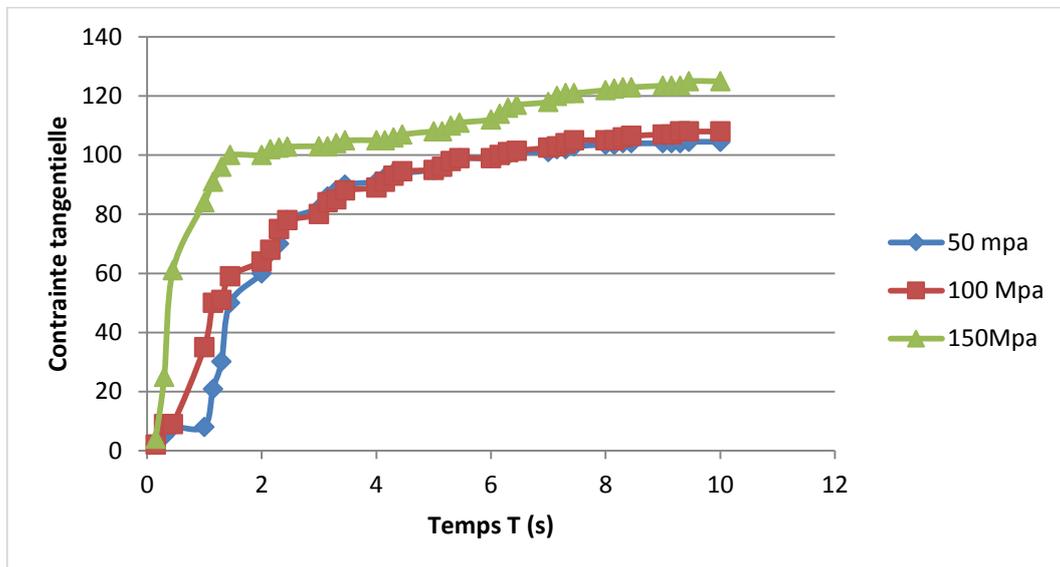


Figure III.15 : courbe de cisaillement de l'argile avec 2% de chaux

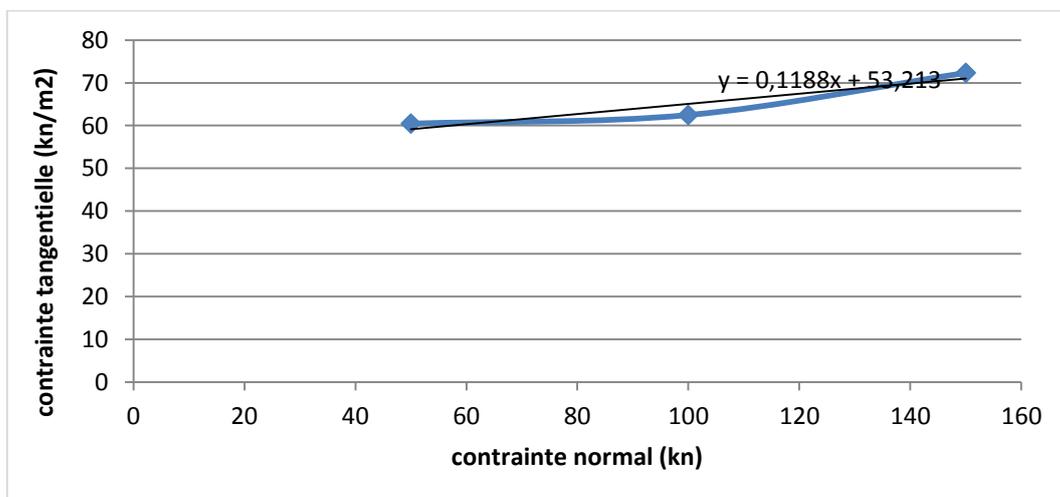


Figure III.16 : courbe du critère de Mohr de l'argile avec 2% d'ajout

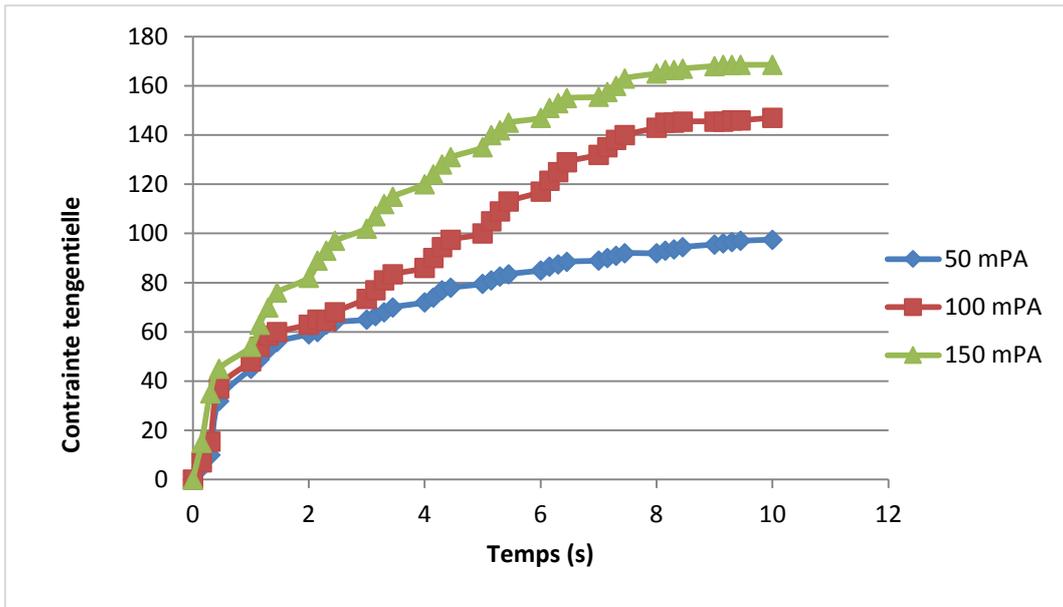


Figure III.17 : courbe de cisaillement de l'argile avec 6% de chaux

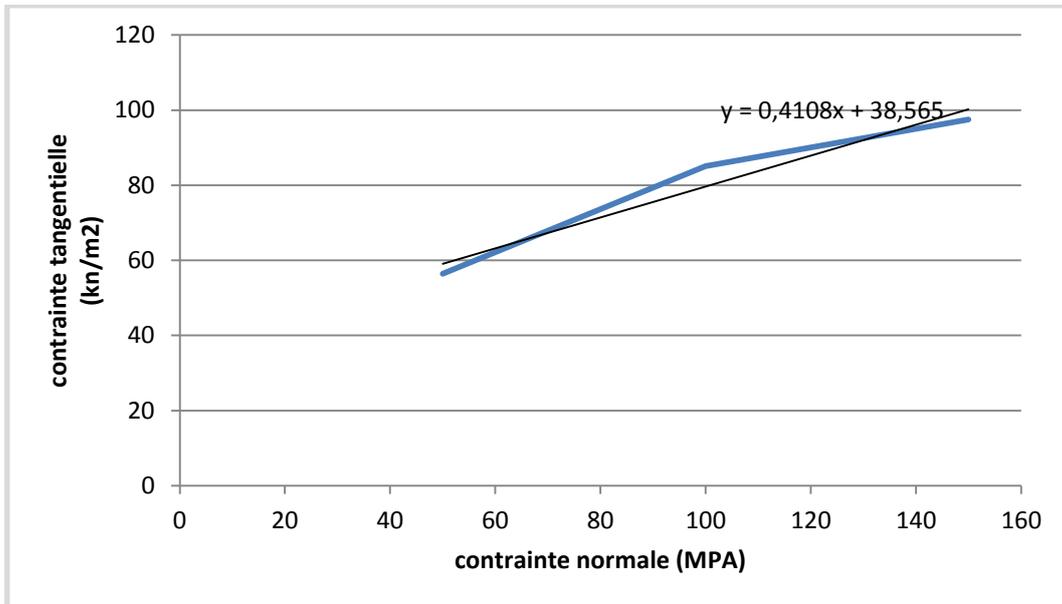


Figure III.18 : courbe du critère de Mohr de l'argile avec 6% d'ajout

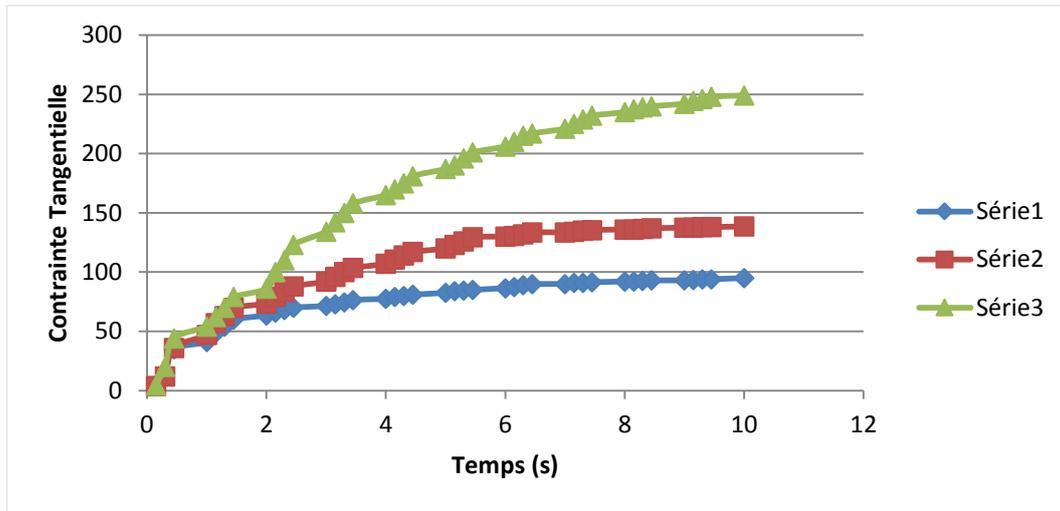


Figure III.19 : courbe de cisaillement de l'argile avec 10% de la chaux

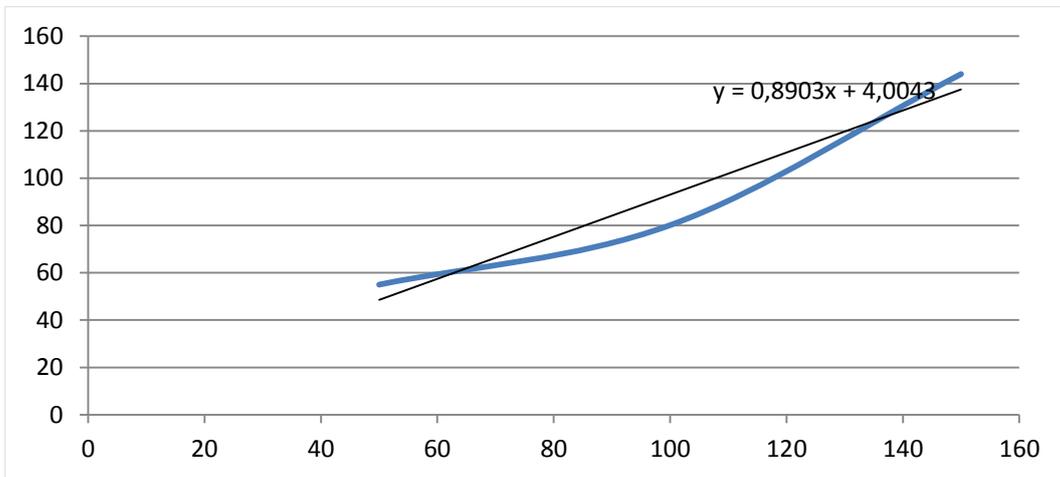


Figure III.20 : courbe du critère de Mohr de l'argile avec 10% d'ajout

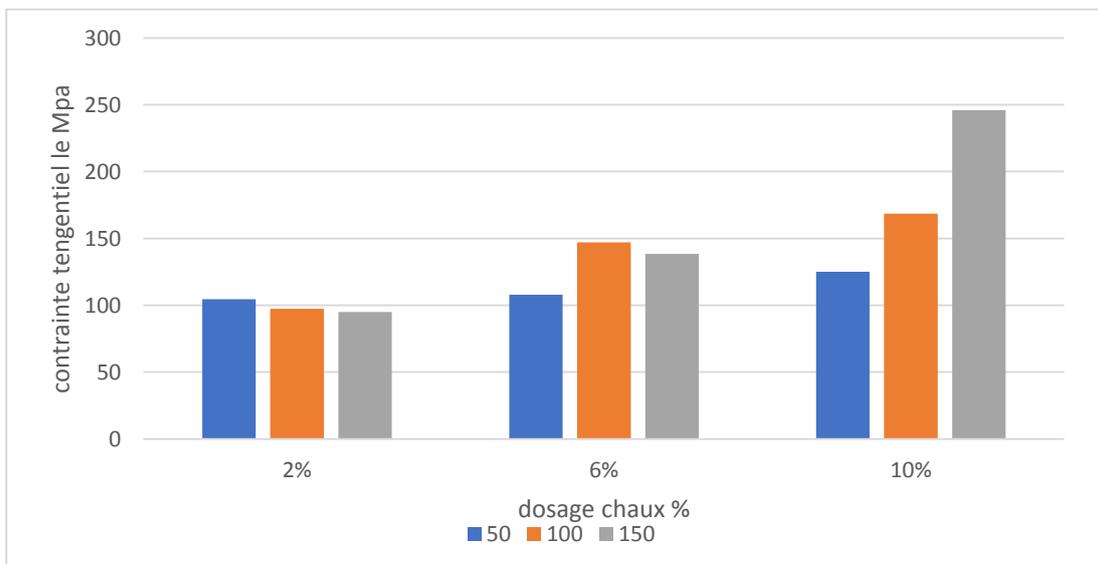


Figure III.21 : histogramme représentant les contraintes tangentielles en fonction des différents pourcentages de chaux.

Les résultats de l'angle de frottement et la cohésion du sol naturel sont résumés dans le tableau ci-contre :

Tableau III.9 : la cohésion et l'angle du sol naturel

	Sol naturel
L'angle de frottement (°)	5.228
La cohésion (KPA)	11.34

D'après les figures (III.14, III.16, III.18), on tire les résultats d'angles de frottement ainsi que la cohésion :

Tableau III.10 : la cohésion et l'angle de frottement des différents dosages de la chaux

	Dosage de la chaux		
	2%	6%	10%
L'angle de frottement (°)	6.775	22.33	41.678
La cohésion (KPA)	53.213	38.565	4.0043

En comparant les résultats de l'angle de frottement du sol sans ajout et celle du tableau III.10, qui représente l'angle de frottement et la cohésion des différents dosages de la chaux, on constate l'augmentation de l'angle de frottement ainsi la cohésion mais à 10% la cohésion s'est diminuée.

Cette augmentations est peut-être due à la réaction pouzzolanique entre les particules d'argiles et la chaux.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Ce sont les nombreux problèmes qui touchent les sols argileux tels que la plasticité, le retrait et le gonflement, la faible perméabilité et la capacité portante limitée, qui ont incité les chercheurs et les ingénieurs à penser à des remèdes et des solutions, afin de gérer ces problèmes pour assurer la stabilité de ces sols. Il existe plusieurs types de stabilisation, la stabilisation mécanique (compactage, dessiccation.....), la stabilisation physique (par ajout de fibres) et la stabilisation chimique (par ajout d'additifs comme la chaux, le ciment, les matières organiques etc...).

La stabilisation à la chaux est actuellement l'une des méthodes les plus courantes pour transformer les sols naturels à problèmes en nouveaux matériaux aux performances désirées.

Ce travail de recherche a été entrepris dans le but d'améliorer les caractéristiques géotechniques d'un sol fin (une argile) de la wilaya de Bejaïa à l'aide de la chaux. L'étude bibliographique nous a permis d'identifier les argiles, citer les types de ces argiles existant et de parler sur leurs propriétés. Nous avons évoqué aussi les différents problèmes des sols fins ainsi les différentes méthodes de stabilisation.

L'étude expérimentale réalisée sur le sol de la wilaya de Bejaïa comporte des essais d'identifications tels que la teneur en eau, l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg, et des essais de caractérisation à savoir, le compactage par essai Proctor normal, l'essai œdométrique et le cisaillement direct à la boîte.

Les résultats expérimentaux sont résumés ci-dessous :

- Le sol étudié a une faible teneur en eau.
- Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage des passants à 80 μm égale à 99.88 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie très fine.
- Les résultats de l'indice de plasticité indiquent que le sol étudié est un sol peu plastique.

Le traitement de cette argile a été effectué en utilisant les dosages suivants :

- 2% de la chaux
- 6% de la chaux
- 10% de la chaux

Les résultats d'essais obtenus étaient en accord avec les études antérieures, le traitement à la chaux conduit à une amélioration des propriétés du sol. On peut d'ailleurs noter que :

- ✓ L'ajout de la chaux au sol augmente sa limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité.
- ✓ L'ajout de la chaux au sol augmente sa teneur en eau optimale et diminue sa densité sèche maximale.
- ✓ L'ajout de la chaux au sol augmente son angle de frottement et sa cohésion.

Références Bibliographiques

- [1] **GUILLAUD, Hugo Houben & HUBERT. 1989.** Traité de construction en terre. Marseille. [Mémoire master]
- [2] **HERNOT, F.** « Argile, son utilisation à l'officine ». Thèse Doctorat Université d'Angers 2016.
- [3] <http://mediatheque.accesmad.org>, Cours sur «L'argile».
- [4] **KADI, S.** «Etude des propriétés Structurale, texturale et application d'une argile locale de type 1 :1 traité thermiquement. Application à l'adsorption de Cd²⁺ et Pb²⁺». Thèse Doctorat en science Université ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEME 2013.
- [5] **BOUZIANE, R & NESSAB, S.** « Renforcement des argiles des argiles de Doukane (Tébessa) Mémoire Master Université Larbi Tébessi Tébessa 2023.
- [6] **Harat. M.** « contribution à de procédé de fabrication de la céramique » .
- [7] **CHENINI, M & BELLAHCENE, T.** «Etude de comportement mécanique d'un mélange sable et d'une argile de wilaya Ghardaïa renforcé par géotextile». Mémoire Master 2021.
- [8] **ZERKANE, C.** «Etude de comportement géotechnique d'une argile stabilisé par des stériles miniers». Mémoire Master Université Larbi Tébessi Tébessa 2022.
- [9] **HARAT, M.** «Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique». Mémoire Magister Université Kasdi Merbah Ouargla 2007.
- [10] **BENTAHER, Y.** «Caractérisation physico-chimique des argiles marocaine : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse». Thèse Doctorat Université De Nice-Sophia Antipolis 2016.
- [11] **HAFSI, K & MEKKI.F**« amélioration des caractérisations physique et mécanique de l'argile rouge de Mraguen(Adrar)». Mémoire Master Université Ahmed Draia Adrar 2015.
- [12] **MEKKI, L.** «Comportement d'une argile expansive fortement surconsolidée ». Thèse Doctorat Université Mohamed Boudiaf 2019.
- [13] **DOKKAR, M & SMAILI, O.** « étude des caractéristiques géotechnique des argiles au sud-est de l'Algérie (Illizi- tougourt –Hassi Messaoud) ». Mémoire Master Université KASDI MERBAH 2023.
- [14] **BOUNA, L .** «Fonctionnalisation des minéraux argileux d'origine marocaine par TiO₂ en vue de l'élimination par photocatalyse de micropolluants organique des milieux aqueux». Thèse Doctorat Université CADI AYAD 2012.
- [15] **AZZARA, A.** «Activation des argiles : mode et modification structurale». Mémoire Master Ecole nationale polytechnique 2016.

- [16] **SALHI , M.** «valorisation des terres décolorantes dans la production de brique ». Mémoire Master Université ABDERHMANE MIRA 2015.
- [17] **Bultel Frédéric,** (2001); «Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels». Thèse Doctorat l'école nationale des pontset chaussées
- [18] **CAILLERE, S & HENIN, S.** «Minéralogie des argiles : 2 classification et nomenclature». Masson, Paris 1982.
- [19] **WAKIM, J.** «Influence des solutions aqueuse sur le comportement mécanique des roches argileuse». Ecole National Supérieure Des Mines De Paris 2005.
- [20] **MISSOUM, T & SABER, I.** «Stabilisation avec la chaux d'un sol gonflant reconstitue au laboratoire». Mémoire Master Université Abdelhamid Ibn Badis 2020.
- [21] **MISSOUM, T & SABER, I.** «Stabilisation avec la chaux d'un sol gonflant reconstitue au laboratoire». Mémoire Master Université Abdelhamid Ibn Badis 2020
- [22] **MISSOUM, T & SABER, I.** «Stabilisation avec la chaux d'un sol gonflant reconstitue au laboratoire». Mémoire Master Université Abdelhamid Ibn Badis 2020
- [23] <https://blog.tensar.fr/understanding-settlement-in-geotechnical-engineering-0#:~:text=Le%20tassement%20est%20g%C3%A9n%C3%A9ralem ent%20le,se%20d%C3%A9pla%C3%A7ant%20verticalement%20e t%20horizontalement.>
- [24] Mémoire master
- [25] Etude du comportement d'un sol argileux traité par ajouts [mémoire master]
- [26] **BOUTOUCHE, S.** «Stabilisation d'un sol par un traitement à la chaux et au ciment cas du site : lotissement Mokadame». Université Mouloud Mammeri 2018.
- [27] **THRAN VAN DUY.** «Etude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux ». Mémoire Master Université De Liège 2013.
- [28] Effets des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimé [mémoire master]
- [29] Etude de l'influence de laitier sur le béton de terre comprimé .
- [30] Yas
- [31] **CHEDDACHE, H.** «Stabilisation des sols à la chaux et à chaud ». Mémoire Master Université Mouloud Mammeri 2011.
- [32] **GUASMI, R & ZOUBIRI, F.** «Effet du fort traitement par différents classes de ciment sue les propriétés de compactage de sol de Chaaba El Hamra ». Mémoire Master Université Mohmed Boudiaf 2022.

- [33] **ZEMOULI, S.** «Amélioration des propriétés géotechnique des argiles par l'utilisation des sous-produits industriels ». Thèse Doctorat Université Badji Mokhtar 2018.
- [34] **SERIKMA, M.** «Contribution à l'étude de la stabilisation par la chaux des tufs gypseux et gypso-calcaire». Mémoire de Magister Ecole Nationale Polytechnique 2009.
- [35] **BEKHTI, M.** «Contribution théorique et expérimentale à l'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés». Thèse Doctorat Université Djillali Liabès 2019.
- [36] **Zalihe Nalbantoglu,** (2004) [mémoire master]
- [37] **LEGERE, Glen. 2001.** Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestières.
- [38] Montréal : Ecole de technologie supérieure université du Québec
- [39] [(Aboubek et Aissa Mamoune, 2004) ; (Arabi et Djilali Merzoug, 2003)]
- [40] **ABAKAR, A.** «Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme Arabique et renforcé par la paille de riz ». Thèse Doctorat Université De Lorraine 2018.
- [41] **CANOUGE, P. AUTRIC, F & NOURISSIER, G.**
- [42] «Technique et pratiques de la chaux». Ecole D'Avignon 2003.
- [43] **KHAY, I.** «Etude physico-chimique des interfaces chaux/ chanvre/ argile». Thèse Doctorat Université De Limoges 2012.
- [44] **GROUPE SAINT GOBAIN.** «Fabriquer la chaux aérienne». 2023
- [45] **BOUDJADJA, K & BENKEDIDAH, A.** «Etude de
- [46] stabilisation chimique des sols». Mémoire Master Université Mohamed Seddik Ben Yahia 2018.
- [47] **AMRI, S.** «contribution à l'étude de la stabilisation chimique des argiles par la chaux et le ciment : application au cas des travaux de terrassement de voie de communication de la région algéroise». Mémoire Magister Université Houari Boumediene 2011.
- [48] <http://doc.lerm.fr>
- [49] Mémoire master ; «contribution à l'étude de la stabilisation chimique des argiles par la chaux et le ciment : application au cas des travaux de terrassement de voie de communication de la région algéroise». Mémoire Magister Université Houari Boumediene 2011
- [50] **MELLAL, F.** «Etude de comportement physico-chimique et mécanique d'un remblai routier marneux améliorer par la chaux éteinte». Mémoire Magister Université Hassiba ben-bouali 2009.

Résumé

Le traitement à la chaux et au ciment est une technique bien connue pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux dans le génie civil. De nombreuses études ont montré que le traitement à la chaux et au ciment peut améliorer les propriétés géotechniques des sols.

Dans ce travail, Une étude bibliographique a été menée sur les sols argileux et les principaux problèmes liés à ces sols, ainsi que les différentes techniques pour les stabiliser. Par la suite une étude expérimentale a été faite pour un sol prélevé sur un site situé la ville de Bejaia, où de nombreux problèmes et des dégradations au niveau de la route ont été enregistrés. Après prélèvement une étude d'identification sur le matériau utilisé qui a été effectuée par une série d'essai, y compris, l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, et les essais mécaniques. Ces résultats ont indiqués à travers les essais de laboratoire pour les différents pourcentages des ajouts(2% 6% 10%), y a des améliorations de la masse volumique sèche, la résistance, la portance et des caractéristiques de cisaillement, le traitement préconisé dans ce guide est le traitement à la chaux et /ou au ciment.

Mots-clés : Stabilisation, sols argileux, chaux, ciment

abstract

Lime and cement treatment is a well-known technique for improving the mechanical properties of clay soils in civil engineering. Many studies have shown that lime and cement treatment can improve the geotechnical properties of soils. In this work, a bibliographic study was carried out on clay soils and the main problems linked to these soils, as well as the different techniques to stabilize them. Subsequently, an experimental study was carried out for soil taken from a site located in the city of Bejaia, where numerous problems and damage to the road were recorded. After sampling, an identification study on the material used was carried out by a series of tests, including particle size analysis, Atterberg limits, and mechanical tests. These results indicated through laboratory tests for the different percentages of additions (2% 6% 10%), there are improvements in dry density, strength, lift and shear characteristics, the treatment recommended in this guide is the treatment with lime and/or cement.

Keywords: Stabilization, clay soils, lime, cement

ملخص

تعد معالجة الجير والأسمنت تقنية معروفة لتحسين الخواص الميكانيكية للتربة الطينية في الهندسة المدنية

أظهرت العديد من الدراسات أن معالجة الجير والأسمنت يمكن أن تحسن الخواص الجيوتقنية للتربة.

تم في هذا العمل إجراء دراسة بليوغرافية على الترب الطينية وأهم المشاكل المرتبطة بهذه الترب ، وكذلك التقنيات المختلفة لتثبيتها. وبعد ذلك، تم إجراء دراسة تجريبية للتربة المأخوذة من موقع يقع بمدينة بجاية، حيث تم تسجيل العديد من المشاكل والأضرار التي لحقت بالطريق. بعد أخذ العينات، تم إجراء دراسة تعريفية على المادة المستخدمة من خلال سلسلة من الاختبارات، بما في ذلك تحليل حجم الجسيمات، وحدود أتربيرج، والاختبارات الميكانيكية. أشارت هذه النتائج من خلال الاختبارات المعملية لنسب مختلفة من الإضافات (10%، 6%، 2%)، هناك تحسينات في الكثافة الجافة والقوة وخصائص الرفع والقص، والمعالجة الموصى بها في هذا الدليل هي المعالجة بالجير و/أو الأسمنت.

الكلمات المفتاحية: التثبيت، التربة الطينية، الجير، الأسمنت