sREPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

Effets de chlore sodium sur le comportement physico-mécanique d'une argile traité à la chaux

---

Présenté par :

Larouci Mohamed

Baghdir Ben Athmane

Proposé et Dirigé par :

Mme. S. Amri

Mr . M. Serraye

Promotion Juin 2019

Remerciements

Il est primordial de remercier «Allah » pour notre réconciliation à accomplir notre travail, de nous avoir donné le courage au long de notre parcours pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer tout notre gratitude à Madame Amri Salima, Maitre assistante et promotrice de notre projet de fin d'étude, pour ses remarques judicieuses et constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire, pour tous ses conseils avisés.

Un grand merci également à mon Co-encadreur Mr Serraye Mahmoud.

Nous exprimons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre profond respect.

Nous n'oublierons jamais à remercie Mr Faroudji , le directeur de laboratoire EPTRC d'avoir m'autorisé l'accès au laboratoire et aussi notre remerciements sont également à

Adressés les ingénieurs et les techniciens du laboratoire, pour les nombreux services qu'ils nous ont rendus durant la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de nos remerciements les plus amicaux.

Nous exprimons aussi nos vifs remerciements à tous fonctionnaires et techniciens du laboratoire de génie civil (université de Médéa) pour leurs aides dans la préparation de notre échantillon.

Nos sentiments de reconnaissance vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nous remercions nos collègues et nos amis pour les sympathiques moments qu'on a passés ensemble.



DEDICACE

Je dédié ce modeste travail :

- A ma très chère mère et à mon père.
- A mes frères et mes sœurs.
- A la famille ***Larouci*** et ***Braouni***
- A mon binôme ***BENATHMANE***.
- A tous mes amis son exception.
- A Toute **la famille GEOTECHNIQUE**

  Spécialement la promotion 2019.

LAROUCI Mohamed



DEDICACE

Je dédié ce modeste travail :

- A ma très chère mère et à mon père.
- A mes frères et mes sœurs.
- A la famille ***baghdir***.
- A mon binôme ***mohamed***.
- A tous mes amis son exception.
- A Toute **la famille géotechnique**

  Spécialement la promotion 2019.

Baghdir benathmane

الملخص

تتميز التربة الطينية بخواصها الجيوتقنية المنخفضة التي تسبب اضطرابات كبيرة ومكلفة للغاية. يمكن أن توفر المعالجة باستخدام الجير لهذه التربة حلاً مثاليًا واقتصاديًا لتحقيق الاستقرار فيها وذلك عن طريق التعديلات المثيرة للاهتمام لخصائصها الجيوتقنية. ومع ذلك ، يمكن أن يؤدي وجود بعض عوامل الاضطراب (الكبريتات والنترات والكلوريدات والفوسفات والمواد العضوية وما إلى ذلك) إلى فشل العلاج أو حتى استبعاد أنواع معينة من التربة من عملية التحسين. في هذا السياق ، تم إجراء تحقيق تجريبي لتقييم تأثير كلوريد الصوديوم على الخصائص الجيوتقنية (حدود أترباغ ,خصائص بروكتور ، مقاومة القص) للتربة الطينية المعالجة بالجير.
الكلمات المفتاحية: الطين, الجير,كلور الصوديوم, علاج,جيوتقنية.

Résumé :

Les sols argileux sont caractérisés par une faible propriété géotechniques qui causant des désordres considérables et très coûteuses. Le traitement par la chaux à ces sols peut apporter une solution idéale et économique pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés géotechniques. Néanmoins, la présence de certains éléments perturbateurs de prise (sulfates, nitrates, chlorures, phosphates, matières organiques…etc.) peut conduire à l'échec d'un traitement voire exclure certains types de sols du processus d'amélioration.

Dans ce cadre une investigation expérimentale a été effectuée afin d'évaluer l'effet du NaCl sur caractéristiques géotechniques (limite d'Atterberg, paramètre de Proctor, résistance au cisaillement) d'un sol argileux traitée à la chaux.

Mots clés : Argile, chaux, chlorure de sodium (NaCl), traitement, géotechnique.

Abstract :

Clay soils are characterized by low geotechnical properties that cause considerable and very costly disorders. The treatment with lime to these soils can provide an ideal and economical solution to stabilize them and this by interesting modifications of their geotechnical properties. However, the presence of certain disturbance factors (sulphates, nitrates, chlorides, phosphates, organic matter, etc.) can lead to the failure of a treatment or even exclude certain types of soil from the improvement process.

In this context, an experimental investigation was carried out to evaluate the effect of NaCl on geotechnical characteristics (Atterberg limit, Proctor parameter, shear strength) of clay soil treated with lime.

Keywords : Clay, lime, sodium chloride (NaCl), treatment, geotechnical.

Table des matières

Table des matières

Dédicaces
Remerciements
Résumé
Abstract
ملخص
Table des matières
Liste des figures
Liste des tableaux

Introduction Générale

Introduction générale 2

Plan de travail 3

Chapitre I:Généralité sur les argiles

I.1. Introduction 4

I.2. Minéralogie et structures cristallines des argileux 4

I.2.1. Elément tétraédrique 5

I.2.2. Elément octaédrique 5

I.3. Différentes familles de minéraux argileux 7

I.3. 1.Kaolinite 7

I.3. 2.Smectite 8

I.3. 2.1.Montmorillonite 9

I.3. 3.Illite 10

I.3. 4.Chlorite 11

I.4 principaux caractéristiques des minéraux argileux et l'eau 12

I.4.1 Attraction entre les minéraux argileux et l'eau 12

I.4.1.1.Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux 12

I.4.1.2.Polarité de l'eau 13

I.4.1.3 .Cations présents dans l'eau 13

I.4.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC) 14

I.4.1.5.Surface spécifique....14
I.4.1.6 Densité de charge spécifique....15
I.4.2.Forces d'attraction entre les minéraux argileux....15
I.4.2.1.Forces d'attraction....15
I.4.2.2 forces de répulsion....16
I.4.3.Film d'eau adsorbée....17
I.5.Comportement des sols argileux....18
I.5.1.Retrait gonflement des sols fins....18
I.5.2. Mécanisme de gonflement....19
I.5.2.1.Gonflement par hydratation de surface....20
I.5.2.2.Gonflement par hydratation osmotique....20
I.5.2.3.Gonflement au sens physico-chimique....20
I.5.2.4.Gonflement au sens mécanique....21
I.5.3.Paramètres de gonflement....21
I.5.3.1.Pression de gonflement....21
I.5.3.2.Gonflement libre....21
I.5.3.3.Indice de gonflement....21
I.5.4.Manifestations dues au gonflement des argiles....22
I.6.Glissement de terrain....24
I.6.1.Définition du glissement de terrain....24
I.6.2.Cause des glissements de terrain....24
I.6.2.1.Causes d'origine naturelle....24
I.6.2.2.Causes d'origine humaine (activité humaine)....24
I.6.3.Pathologiques de glissement des terrains....25

I.7.Tassement 27

I.8.Conclusion 28

Chapitre II: Techniques de traitement du sol

II.1.Introduction 29

II.2.Traitement des sols expansif par ajout de sable 29

II.3. Traitement chimiques 30

II.3. 1. Chaux 30

II.3.1.1. Mécanisme de stabilisation à la chaux 31

II .3.1.1.1.Action à court terme 31

a- Floculation 31

b- Séchage 32

II .3.1.1.2. Action à moyen et à long terme 32

a- carbonatation de la chaux 32

b- actions pouzzolaniques 32

II.3.1.2.Influence de l'ajout de chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux 33

II.3.1.2.1. Augmentation de PH 33

II.3.1.2.2 Diminution de l'indice de plasticité 34

II.3.1.2.3. Amélioration des références de compactage 36

II.3.1.2.4. Amélioration de la résistance à la compression uniaxiale 38

II.3.2. Ciment 39

II.3.2.1.Processus de stabilisation par le ciment 40

II.3.3.Cendres volantes 40

II.4.Traitement mécaniques 41

II.4.1 Compactage de surface 41

II.4.2 Compactage dynamique 42
II.5 Traitement thermique 43
II .6Autres techniques d'amélioration des sols 43
II .6.1 Electro-osmose 43
II .7. Conclusions 43

Chapitre III : Identification des matériaux

III.1. Introduction 45
III.2. Matériaux utilisés 45
III.2.1 Argile étudié 45
III.2.1.1 Lieu de prélèvement 45
III.2.1.2 Préparation d'échantillon 46
III.2.1.3. Caractérisation chimique 47
a-Analyse chimique sommaire –ACS- NF P 18-560 47
b-Mesure de Ph 49
c-Mesure de la capacité d'adsorption de bleu méthylène d'un sol (NF P 94-068) 49
III.2.1.4. Caractéristique physique 50
a- Analyse granulométrique 50
-Méthode par tamisage à sec après lavage (NF P 94-056) 50
-Méthode par sédimentométrie (NF P 94-057) 51
b- Poids volumique des grains solides (NF P94-054) 52
c- Teneur en eau (NF P94-050) 53
d- Limite d'Atterberg (NF P 94-051) 53
-Limite de liquidité 53

-Limite de plasticité 53

-L'indice de plasticité 53

-l'indice de consistance 53

III.2.1.5.Caractéristique mécanique 55

a-Essai de Proctor normale (NF P 94-093) 55

b- Essai de cisaillement rectiligne à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1) 57

III.2.2. Chaux 59

III.2.3. Chlore sodium 60

III.3. Conclusion 61

Chapitre IV : Effet de la combinaison de la chaux et du chlorure

IV.1 Introduction 63

IV.2. Préparation du mélange 63

IV.3. Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du pH-mètre 63

IV.4. Déroulement des essais 64

IV.5. Résulta et discussion 65

IV.5.1.Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur les limites d'Atterberg 65

a- Effet du chlorure de sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la limite de liquidité 65

b-Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la limite de plasticité 66

c- Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur l'indice de plasticité 67

d - Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur l'indice de consistance 68

IV.5.2.Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur Les paramètres de Proctor Normale 70

a- Effet de chlorue sodium(NaCl)et la chaux et leur combinaison sur la Teneur en eau optimale 71
b- Effet du chlorure sodium(NaCl) et leur combinaison avec la chaux vive sur la densité séche maximal 72

IV.5.3.Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la résistance au cisaillement la boite 73

a- Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la cohésion 73

b- L'effet de NaCl et leur combinaison avec la chaux vive sur l'angle de frottement interne 74

IV.6.Conclusion 75

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1Eléments structuraux : les tétraèdres (Errais. 2011).....5
Figure I.2 : Eléments structuraux : les octaèdres (Errais. 2011).....6
Figure I.3: Représentation schématique des empilements de feuillets pour La kaolinite (Errais .2011).....7
Figure I.4 : Schéma de la structure de la kaolinite. (Lambe ,1953.).....8
Figure I.5 : Structure élémentaire de smectite (Caillère, 2016).....8
Figure I.6 : Schéma de la structure de la montmorillonite (Lambe, 1953).....9
Figure I.7 : Schéma de la structure de l'illite Robitaille et Tremblay).....10
Figure I.8 : Structure particulaire de l'illite (Errais, 2011).....10
Figure I.9 : Schéma de la structure de chlorite (Mitchel 1976).....11
Figure I.10 : Schéma de molécule d'eau BRAJA M, DAS (2010).....13
Figure I.11 : Forces d'attraction s'exerçant entre les minéraux argileux. Robitaille et Tremblay (1997).....16
Figure I.12 : Forces de répulsion s'exerçant entre les minéraux argileux. Robitaille et Tremblay (1997).....17
I.13 : Films d'eau adsorbée. Robitaille et Tremblay (1997).....18
I.14: Différents types de fissuration causés par les mouvements différentiels de retrait-gonflement (Mouroux et al. 1988).....19
Figure I.15 .a et b : Photos montrant les différents types de fissures au niveau des Constructions dans la région d'étude (El Kouif), (Aoun, 2016).....22
Figure I.16: Rupture du studios-appartements du fait du gonflement du sol (In-Amenas)(Derriche et Iguechtal).....23
I.17: cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi, 2006).....23
Figure I.18 : Fissures longitudinales dans la routé affecté par le glissement.....26
Figure I.19 : Différents faces de glissement (DTP Médéa).....26
Figure I.20 : Stagnation des eaux au centre du radie.....27
Figure I.21 : Vue générale de la batterie de silos.....27

Figure. II .1 : Action de la chaux à court terme (modification par floculation) (Cabane, 2004) de silos.....31

Figure II.2: Réaction pouzzolaniques (Marrot, 2010) cité par Thi-Thanh-Hang NGUYEN(2015) 33

Figure. II.3 : Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al. 2010) 34

Figure II.4: Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile de Londres (illite, kaolinite, smectite) (Rogers et Glendenning, 1996) 34

Figure II. 5: Evolution de limite de liquidité et limite de plasticité d'un sol après l'ajout de chaux (GTS, 2000) 35

Figure .II.6 : Effet du traitement au sel et à la chaux sur les limites d'Atterberg (Marks, 1967) 36

Figure II.7 : Evolutions des références de compactage (Nguyen, 2015) 37

Figure II.8. : Effet du traitement à la chaux-chlorure de sodium sur les paramètres de Proctor (Marks, 1967) 37

Figure II.9 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale des mélanges argile –chaux –chlorure de sodium Davoudi et Kabir (2011) 39

Figure. II.10: Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre De Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie.Hamid,G.(2017) 41

Figure II .11 Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice1978, France).Gaafer, M (2015) 42

Figure II .12 : Principe de la technique électro-osmose. Hamid, G (2017) 43

Figure III.1 : Localisation du site étudie (Google maps) 46

Figure III.2 : Prélèvement d'échantillon 46

Figure III.3 : Séchage et broyage de matériau étudié 47

Figure III.4: Analyse chimique de l'argile étudiée 48

Figure III.5: Essai de bleu méthylène 50

Figure III.6: Analyse granulométrique par tamisage 51

Figure III.7 : Analyse granulométrie par sédimentation 52

Figure III.8 : Courbe granulométrique du matériau argileux 52

Figure III.9 : Détermination Poids volumique des grains solides 53

Figure III.10 : Détermination de la limite de liquidité, limite de plasticité 55

Figure III.11 : Classification des sols selon Casagrande 55

Figure III.12 : Réalisation de l'essai Proctor normale 56

Figure III.13 : Courbe Proctor normal 57

Figure III.14 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite 57

Figure III.15 : (a) containtes de cisaillement en fonction de déplacementhorizontal ; (b) Tassement en fonction de déplacement horizontale la courbe contrainte normale en fonction de contrainte au cisaillement 58

Figure III.16 : la courbe contrainte normale en fonction de contrainte au cisaillement 58

Figure III.17 Chaux vive de wilaya de Saida 59

Figure III.18 Chlorure utilisé dans ce travail 60

Figure IV.1 : Variation du pH de l'argile étudié en fonction du taux de chaux 64

Figure IV.2: Effet de chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la limite de liquidité 66

Figure IV.3: Effet de chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux sur la limite de plasticite 67

Figure IV.4: Effet de NaCl et leur combinaison avec la chaux sur l'indice de plasticité 68

Figure IV.5: Effet de chlore sodiumet leur combinaison avec la chaux sur l'indice de consistance 69

Figure IV.6 : Clasification de sol etudié 70

Figure IV.7 :Effet de chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur les paramétre de proctor Normale 71

Figure IV.8 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la teneur en eau optimale 72

Figure IV.9 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la densité séche maximale 73

Figure IV.10 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur sur la cohésion 74

Figure IV.11 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur sur l'angle de frottement interne 75

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux d'après (LEPLUART, 2002 cité par Belabbaci, 2014.).....15

Tableau III.1: Analyse chimique de l'argile étudie.....48

Tableau III.2 : Classification des sols en fonction du pourcentage Massique en carbonate.....49

Tableau III.3 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène 50

Tableau III.4: Résultat des limites d'Atterberg 55

Tableau III.5: Résultat de l'essai de cisaillement.....58

Tableau III.6 : Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés (d'après Harichane et al 2011) cisaillement 59

Tableau III.7 : Caractéristique physico-chimique de chlorure de sodium utilisé 61

Tableau IV.1 : Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec la chaux à la présence ou sans chlorure de sodium 65

Tableau IV.2 : Caractéristiques de Proctor lors de traitement 70

Liste des notations

liste des Notations

W	(%)	Teneur en eau
γd	(KN/m^3)	Poids volumique sec
OPN	**-**	Optimum de Proctor Normal
MDD, (γd_{max})	(KN/m^3)	Maximum dry density (Densité sèche maximale)
LL, (W_L)	**(**%)	Liquid Limit (Limite de liquidité)
PL, (W_P)	(%)	Plastic Limit (Limite de plasticité)
C	(KN/m^2)	Cohesion (Cohésion)
ϕ	(°)	Internal Friction Angle (Angle de frottement interne)
Sp	(mm^2/mm^3)	Surface spécifique.
Wopt	(%)	Teneur en eau optimale.
γd_{max}	(KN/m^3)	Poids volumique sec maximale
Ip	-	Indice de plasticité
γh	(KN/m^3)	Poids volumique humide
CEC	meq/100g	Capacité d'échange Cationique
ASTM	**-**	American Society for Testing and Materials
C-S-H	-	Calcium Silicates Hydrates (Silicates de Calcium Hydratés)
C-A-H	-	Calcium Aluminates Hydrates (Aluminates de Calcium Hydratés)
EPTRC	-	entreprise publique des travaux routier du centre
VBS	-	valeur de bleu méthylène

Introduction générale

Introduction générale

A travers la nature géologique des terrains de notre pays, des sols médiocres peu appropriés présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont généralement rencontrés, donc ils posant un problème major pour les ingénieurs sur chantier et les géotechniciens, autre que le manque des matériaux de bonne qualité, qui doit répondre aussi bien à une exigence économique acceptable il a été donc nécessaire d'améliorer les caractéristiques de ces sols pour les remettre acceptables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes, tout dépend le processus de stabilisation des sols.
Le choix de l'une de ces méthode dépend de plusieurs paramètres tels que, les considérations économiques, la nature du sol à traiter et la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux utilisés ainsi que les conditions d'environnement.

La méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins couteuse, mais malgré ça, le problème reste encore posé, car, après traitement, le sol stabilisé peut être altéré par certains éléments chimiques nommés «éléments perturbateurs» à savoir les sulfates, les chlorures, les fertilisants, la matière organique … etc. En effet, plusieurs chercheurs ont mis en évidence le grand risque qui peut se présenter lors ou après la stabilisation avec l'addition des ajouts minéraux en présence de certains composés chimiques par exemple les chlorures.

Dans ce contexte, le principal objectif de la thèse est d'étudier l'effet de chlorure sodium sur le comportement d'une argile traité à la chaux. Ce travail de recherche s'articule sur quatre chapitres à savoir :

- **Le premier chapitre :** est présente une généralité sur les argiles et les différents types d'argile et leur caractéristique.
- **Le deuxième chapitre :** est consacré à la présentation les différentes techniques d'amélioration des sols
- **Le troisième chapitre :** décrit les protocoles expérimentaux ainsi l'identification et la caractérisation des matériaux étudies.

- **Le quatrième chapitre** : est présenté l'analyse de différents résultats expérimentaux de l' effets de NaCl sur les limites d'Atterberg , les paramètres de compactage et les paramètres de cisaillement des sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux.

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

chapitre I

Généralité sur les argiles

Chapitre I: Généralité sur les argiles

I.1. Introduction :

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce Terrestre, obtenus par dégradation et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface. Ces résidus détritiques sont déplacés par voie glaciaire, fluviale ou éolienne et se déposent dans les bassins de sédimentation. Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileux ses composées pour l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2 μm, cependant cette dernière sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux (Amroune ,2016).

Les argiles sont des sols très sensibles à l'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

1. argiles plastiques : indurés et très déformables.

2. argiles raides : indurées et présentent un comportement plus fragile que de la limite d'élasticité. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quart microscopique.

D'un point de vue purement chimique, l'argile est composée d'environ 50% de silicates d'alumine hydratés, elle contient de nombreux minéraux en majorité silice, aluminium, fer, magnésium, calcium, cuivre, sodium, potassium, manganèse…etc (Robitaille et Tremblay ,1997).

Dans ce chapitre nous avons présentés une synthèse bibliographique sur la structure des argileux et l'effet de l'eau et les différentes réactions physico-chimiques qui se produit dans la structure argileuse.

I.2. Minéralogie et structures cristallines des argileux :

Les minéraux argileux sont des particules très fine dont le diamètre équivalent est normalement inférieur à 0,002 mm Ces sont, pour la plus part, des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes de manière à former des figures géométriques très régulières Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques,

qui portent habituellement le nom de feuillets en raison de leur apparence similaire à celle d'une lamelle ou d'une feuille extrêmement mince. Ces feuillets sont eux-mêmes constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales**.**

L'organisation structurale des phyllo silicates se base sur une charpente d'ions O^{-2} et OH^{-} .Ces anions occupent les sommets d'assemblages tétraédrique et (O^{-2} et OH^{-}), dans les cavités de ces unités structurelle élémentaires viennent se loger des cations de taille variable (Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{2+}, Mg^{2+})

I.2.1. Elément tétraédrique :

Le tétraèdre de silice est formé de 4 atomes d'oxygène (O^{-2}) au sommet du tétraèdre, il existe quatre ions d'oxygènes (O^{-2}) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant à chacun d'eux. Ces tétraèdres, s'ordonnent entre eux pour former une couche tétraédrique (figure I.1) (Nebat,2016).

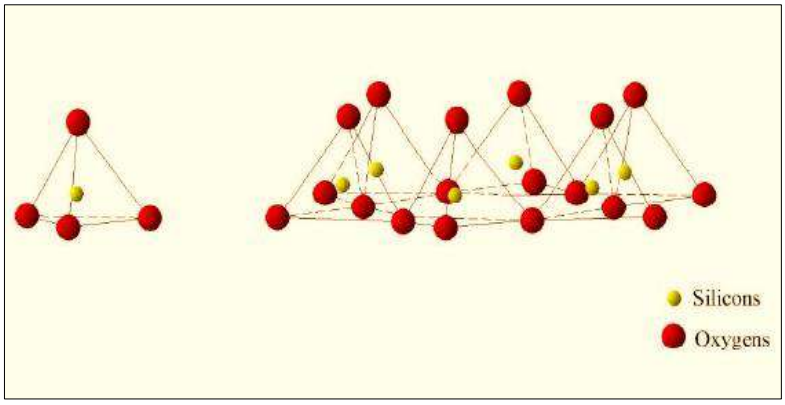


Figure I.1 Eléments structuraux : les tétraèdres (Errais, 2011).

I.2.2. Elément octaédrique :

L'octaèdre d'alumine est constitué de 6 hydrox les entourant un atome d'aluminium (Al^{3+}) ou bien le magnésium (Mg^{2+}). Ces octaèdres se combinent pour composer des couches planes dites couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes (figure I.2) (Nebat ,2016).

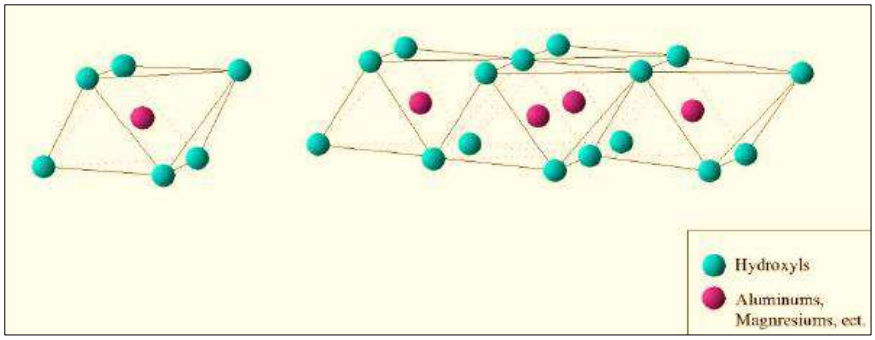


Figure I.2 : Eléments structuraux : les octaèdres (Errais. 2011).

Tous les minéraux argileux sont constitués de feuillets tétraédriques et octaédriques. L'ordre dans lequel les feuillets sont empilés et les liens qui existent entre eux et les divers atomes, métalliques ou non, qu'on trouve à l'intérieur des structures fondamentales déterminent les différents types de minéraux argileux.

L'insertion des atomes dans les structures fondamentales peut se faire par substitution, lors de la formation des minéraux argileux. Les substitutions surviennent principalement dans les structures octaédriques, où les atomes d'aluminium sont le plus souvent remplacés par des atomes de magnésium ou de fer. Dans les structures tétraédriques, un atome d'aluminium peut parfois remplacer l'atome de silicium. Comme la plus part de ces atomes ont approximativement la même taille. Les structures fondamentales conservent sensiblement la Même forme c'est pour quoi on parle de substitutions isomorphes**.**

Habituellement, les substitutions isomorphes se réalisent avec des atomes métalliques portant des charges électriques différents. Elles provoquent par conséquence un débalancement électrique à l'intérieur des structures fondamentales, favorisant ainsi l'apparition des charges électriques négatives à la surface des minéraux argileux. Ces charges sont en grande partie responsables de l'activité électrique des argiles, une activité qui en raison de ses origines chimiques, porte souvent le nom **d'activité électrochimique.** Plus la surface spécifique des particules et grand, plus le nombre de substitutions et grand. Il y a donc plus de charge électrique disponibles, et l'activité électrochimique des minéraux argileux et d'autant plus élevée (Robitaille et Tremblay ,1997).

I.3.Différentes familles de minéraux argileux :

A partir des structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles , selon le nombre de feuillets variable par particules et suivant le type d'argile considéré .Précisons actuellement les propriétés principales des quatre grands groupes d'argile qui sont :
La kaolinite et la smectite et l'illite et enfin chlorite.

I.3. 1.Kaolinite :

Le groupe de la kaolinite compose les argiles blanches, utilisées pour la confection de la poterie et des porcelaines et pour le blanchissement du papier. La principale espèce de ce groupe est la kaolinite, constituée de très fines particules de kaolin, mêlés à du quartz, du feldspath et du mica. La kaolinite résulte principalement de l'altération superficielle des roches granitiques ou gneissiques. Chaque plaquette est formée de multiples feuillets empilés, chaque feuillet est formé de l'association d'une couche tétraédrique (Chauvel. 1976) et d'une couche octaédrique. Cette unité structurelle de base est dite (1 :1), d'une épaisseur de 7A° (figure I.3), la liaison entre feuillets est très forte, sa formule structurale s'écrit [$Si_2O_5Al_2(OH)_4$], cette structure est détruite par chauffage à 450°C. La kaolinite est un minéral stable, peu à pas gonflant .Dans ce groupe on peut distinguer d'autres espèces telles que l'halloysite dont les feuillets sont séparés par des couches d'eau liées, les plaquettes sont très fines et souvent enrobées en forme de tube (Aissiou, 2010).

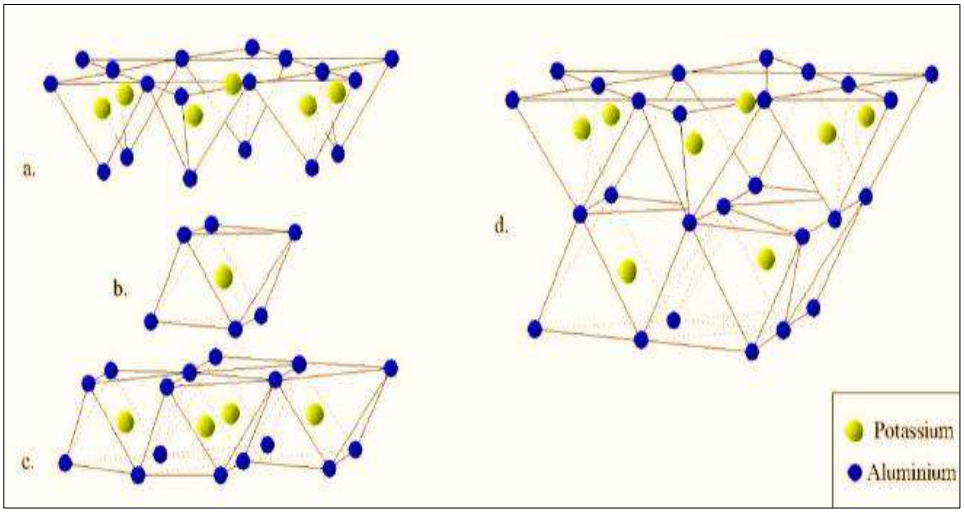


Figure I.3: Représentation schématique des empilements de feuillets pour La kaolinite (Errais .2011).

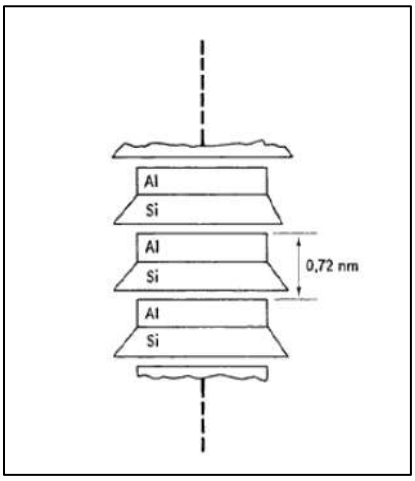


Figure I.4 : Schéma de la structure de la kaolinite. (D'après Lambe ,1953.)

I.3. 2.Smectite :

Une partie des atomes d'aluminium de la couche octaédrique est remplacée par des atomes de magnésium voire de fer (figure I.5) .La compensation des charges négatives excédentaires, s'effectue par l'introduction dans l'espace inter foliaire (espace séparant deux triplets consécutifs T O T) d'un cation (Ca^{2+},Na^{+}). Ces cations inter foliaires ont la particularité de pouvoir être solvates par des molécules d'eau qui provoquent le gonflement du cristal.

L'espace inter foliaire passe de 14 à 17 A° en présence de (Ca^{2+}) et de 13 A° jusqu'à l'infini pour (Na^{+}), Il existe plusieurs minéraux argileux dans le groupe des smectites, entre autres la montmorillonite. (Belabbaci ,2014).

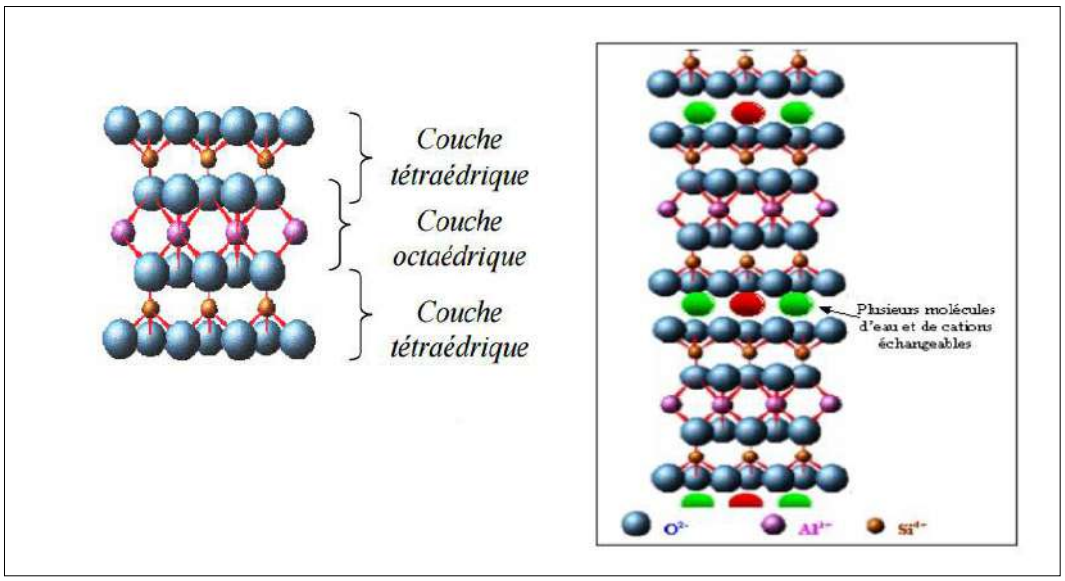


Figure I.5 : Structure élémentaire de smectite (Caillère, 2016).

I.3. 2.1.Montmorillonite :

La montmorillonite tire son nom de la ville de Montmorillon en France, ces minéraux sont regroupés sous le nom de smectites. La montmorillonite résulte souvent de l'altération en climat tropical des roches volcaniques. C'est une argile très gonflante, son feuillet élémentaire est formé d'une couche octaédrique prise en sandwich entre deux couches tétraédriques. Cette unité structurelle de base est dite (2 :1), d'une épaisseur de 10A°, la liaison entre feuillets est très faible, par conséquent l'eau pourra rentrer et se fixer entre ces feuillets qui auront, par la suite tendance à s'écarter, et l'argile constituée sera expansive. La formule structurale de la montmorillonite est de la forme **$[Si_4 Al_2O_{10}(OH)_2]_2$**, (Aissiou, 2010).La figure I.5 présente un schéma de la structure de la montmorillonite.

Les particules de montmorillonite compètent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur varient de 1 à 10 nm, elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux.

La montmorillonite se caractérise par une très grande activité électrochimique à la surface de ses particules. Cette activité s'explique par le nombre élevé de substitutions isomorphes qui surviennent, surtout dans le feuillet octaédrique, là où les atomes de magnésium ou de fer peuvent remplacer les atomes d'aluminium. De plus, la grande surface spécifique des particules contribue à y accroître la quantité des charges électriques négatives Les dépôts de sol contenant de la montmorillonite ont tendance à manifester de forts gonflements lorsque leur teneur en eau augmente. Ce gonflement engendré des pressions.

Suffisantes pour détériorer les structures des routes ou des constructions légères comme les petits bâtiments .(Robitaille et Tremblay ,1997).

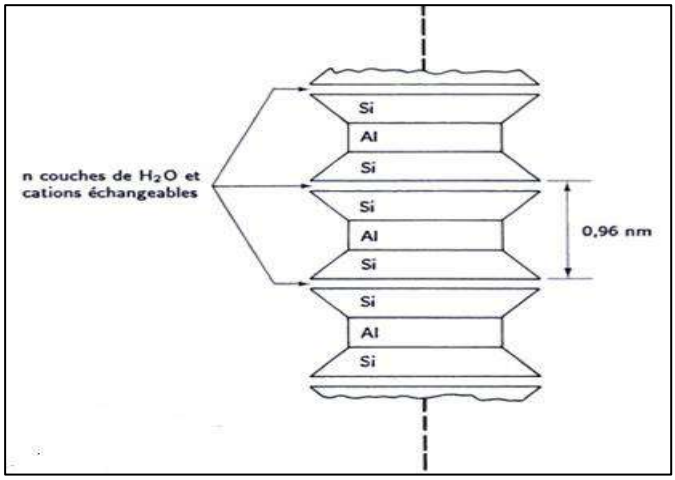


Figure I.6 : Schéma de la structure de la montmorillonite
(D'après Lambe, 1953).

I.3. 3.Illite :

La structure de l'illite ressemble a celle de la montmorillonite puisque ses couches élémentaires, dont l'épaisseur atteint 1nm, sont elles aussi formées d'un feuillet octaédrique emprisonné entre deux feuillets tétraédriques.

Ce qui différé, ce sont les liens qui unissent les couches élémentaires: ils sont assurés par les atomes de potassium (K) (figures I.7, I.8). Bien qu'étant plutôt forts comparativement à ceux de la montmorillonite. Ils demeurent inférieurs aux liens d'hydrogène de la kaolinite. L'épaisseur typique de l'illite se situe donc entre celles de la montmorillonite et de la kaolinite, c'est-à-dire à environ 30 nm, bien qu'elle puise varier de 10 à 200 nm (Robitaille et Tremblay ,1997).

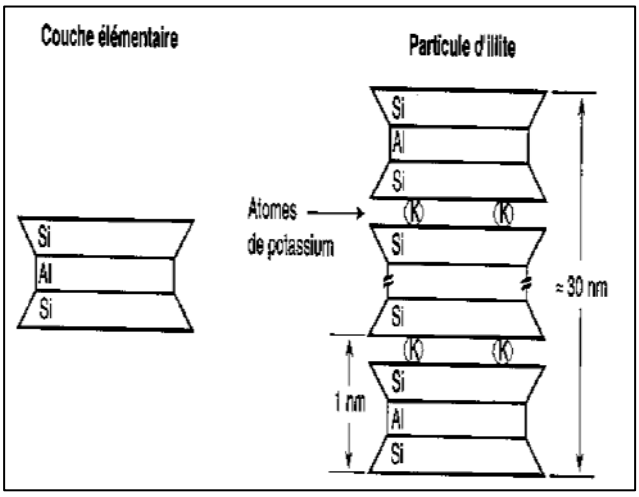


Figure I.7 : Schéma de la structure de l'illite (Robitaille et Tremblay ,1997).

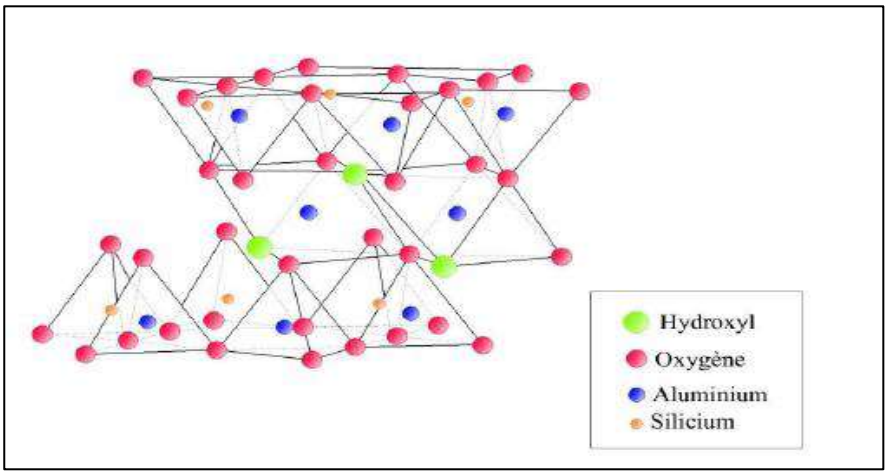


Figure I.8 : Structure particulaire de l'illite (Errais, 2011).

L'activité électrochimique de l'illite est plus importante que celle de la kaolinite. En effet, étant donnée le nombre de ses substitutions isomorphes et sa surface spécifique, qui sont plus grands que ceux de la kaolinite. On trouve plus de charges électriques négative à la surface de ses particules, qui son t'elles-mêmes plus actives en présence d'eau que celles de la kaolinite. Cette activité et toute fois bien inférieure à celle de la montmorillonite.

Les dépôts de sol contenant de l'illite demeurent assez stables. Lorsque leur teneur en eau augmente, ils peuvent subir des gonflements, mais beaucoup moins importants que ceux observés dans les dépôts de montmorillonite.

I.3. 4.Chlorite :

Il est nécessaire de citer les chlorites du fait que leurs propriétés se rapprochent de celles des argiles. Leur structure est cependant plus complexe, et se compose de deux feuillets de micas entre lesquels s'insère un feuillet de brucite**.** Le chlorite est relativement fréquente dans les sols argileux, elle est constitué d'une répétition des couches suivantes : un feuillet de silice, un feuillet d'alumine, un autre feuillet de silice et, finalement, un feuillet de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg) (figure I.9).On pourrait considérer comme un minérale, le chlorite peut aussi comporter plusieurs substitutions isomorphes et dans certain cas, perdre une couche de brucite ou de gibbsite. Étant donné que l'eau peut pénétrer entre les couches. Le chlorite peut être gonflant ; elle n'est cependant pas aussi active que la montmorillonite.

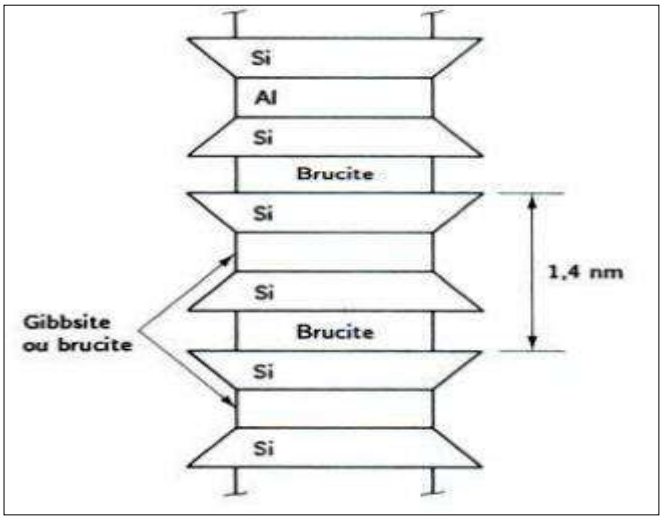


Figure I.9 : Schéma de la structure de chlorite (d'après Mitchel 1976)

I.4 principaux caractéristiques des minéraux argileux et l'eau :

De façon générale, l'eau n'a pratiquement pas d'influence sur le comportement des sols pulvérulents, par exemple, la valeur de la résistance au cisaillement d'un sable ne varie presque pas, qu'il soit sec ou saturé.

Il en va autrement pour les sols cohérant, dont le comportement peut être considérablement modifié par une variation de la teneur en eau. Quand le sol et sec, la cohésion entre les minéraux argileux est très forte, l'argile possède alors une résistance au cisaillement élevée et peut supporter de lourds charges sans se déforme. Si cependant ou augmente la teneur en eau, la cohésion diminue, de même que la résistance au cisaillement:

L'argile devient alors plastique et malléable. Si la teneur en eau continue de s'accroitre. L'argile devient très molle et à la limite, elle peut s'écouler comme un liquide épais, dans un tel cas la cohésion entre les minéraux argileux de même que la résistance au cisaillement sont pratiquement nulles.

Ces changements de comportement sont attribuables aux caractéristiques des films d'eau adsorbée qui entourent presque toujours chaque minéral argileux. Ces films d'eau sont constitués de molécules d'eau fortement attirées par les surfaces des particules. (Robitaille et Tremblay ,1997).

I.4.1 Attraction entre les minéraux argileux et l'eau :

Le film d'eau adsorbée et maintenu à la surface des minéraux argileux par des forces d'attraction qui agissent entre les molécules d'eau et les particules d'argiles. Ces forces et dépendent principalement des quatre facteurs suivants :

- L'activité électrochimique à la surface des minéraux argileux,
- La polarité de l'eau,
- Les liens d'hydrogène de l'eau,
- Les cations présents dans l'eau.

I.4.1.1.Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux :

L'activité électrochimique de toute surface se manifeste par l'attraction qu'elle exerce sur d'autres particules chargées négativement ou positivement. Dans le cas des argiles, l'activité résulte de la présence, à la surface des particules, de charge négatives produites par les substitutions isomorphes, les surfaces recherchent une stabilité électrique ; elles attirent donc

fortement les molécules dipolaires comme l'eau et les ions positifs appelés **cation**, contenus dans l'eau des sols.

I.4.1.2.Polarité de l'eau :

La polarité d'eau est engendrée par la disposition des deux atomes d'hydrogène et de l'atome d'oxygène formant la molécule d'eau (figure I.10). Bien qu'électriquement neutre cette disposition crée deux pôle un positif et un négatif, et les molécules d'eau sont attirées par la surface des minéraux argileux ou elles forment un film d'eau adsorbée.

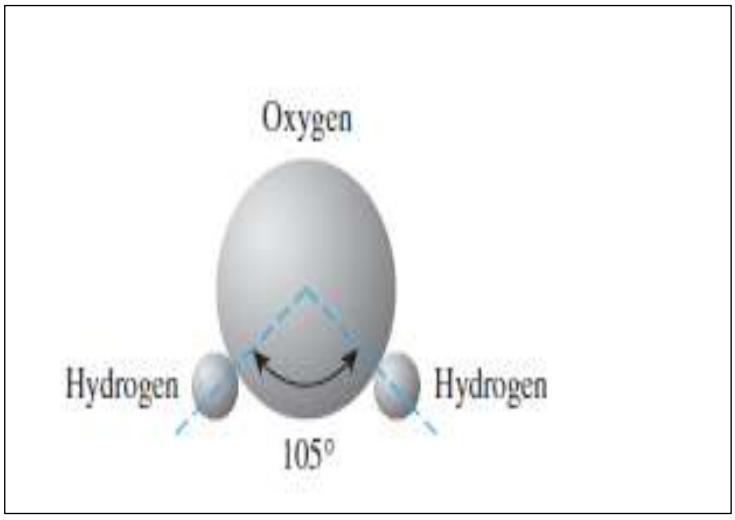


Figure I.10 : Schéma de molécule d'eau BRAJA M, DAS (2010)

I.4.1.3 .Cations présents dans l'eau :

Les cations sont attirés par les charges négatives à la surface des minéraux argileux. Se combinant avec les molécules d'eau, ils entrainent ces dernières et les maintiennent en contact avec les particules d'argile. La plupart des cations sont métalliques, et on trouve sous forme d'impuretés dans les eaux souterraines. Ceux que l'on rencontre le plus souvent dans l'eau des sols sont les cations de calcium (Ca^{+}) et de magnésium (Mg^{+2}). Les moins courants sont les cations de potassium(K^{+}) et de sodium(Na^{+}). Dans les sols acides, on trouve fréquemment des cations d'aluminium (Al^{+3}) et d'hydrogène (H^{+}). Les argiles d'origine marine se caractérisent par la présence de cations de soduim et de magnésium, le principal cation présent dans l'eau de mer (Houmadi et al ,2009).

Les substitutions isomorphes de(Al^{3+}) par(Mg^{2+}) a la surface des feuillets s'entrainent un excès de charge négative. Pour assurer l'´électron neutralité, ce déficit de charge est compensé

par des cations (Ca^{2+})ou(Na^{+}). Les montmorillonites compensées par des cations (Ca^{+})sont appelées des montmorillonites calciques.Lorsqu'elles sont compensées par des cations(Na^{+}), elles sont appelées des montmorillonites sodiques. Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux .L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium(Na^{+}) est plus faible que celle des cationsde calcium(Ca^{2+}), c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique aura la plus grande surface spécifiques, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets (Belabbaci ,2014).

I.4.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC) :

La capacité d'échange cationique (CEC) est le nombre des charges positives compensent la charge superficielle, elle est généralement exprimée en milliéquivalents pour 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler. Il existe de très nombreuses méthodes de détermination de la CEC, le plus utilisée en routine.

- La méthode potentiométrique (méthode de Rouiller-Doirisse, 1974; Thomas, 1982), un traitement aux résines déca ionisantes remplace tous les cations superficiels par des protons, l'échantillon devient alors un acide faible titraille par une base forte diluée. Si la solubilité du minéral est faible dans la zone de ph considérée, la quantité d'ion (OH^{-}) ayant réagi avec les sites superficiels est égale à la charge négative (Decareau. et al, 1990).

I.4.1.5.Surface spécifique :

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

$$\mathbf{S}_p = \frac{\mathbf{surface}}{\mathbf{volume}}\left(\frac{\boldsymbol{m}\mathbf{m}^2}{\boldsymbol{m}\mathbf{m}^3}\right)$$

La surface spécifique est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau I.1 **(**Robert Holtez et al ,1981).

Tableau I.1 Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (LEPLUART, 2002 cité par Belabbaci, 2014.)

Minéraux	**Surface interne (m^2/g)**	**Surface externe (m^2/g)**	**Surface totale (m^2/g)**	**CEC (milliéquivalent/ 100g)**
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700-400	40-70	760	100-150
Chlorite	-	100-175	100-175	10-40

I.4.1.6 Densité de charge spécifique :

La densité de charge de surface noté « σ », et égale au nombre de cation compensateur par unité de surface. Elle peut évalue :

- Lorsque les valeurs de la CEC et de la surface sont connues, la densité de charge « σ » s'exprime par : $\sigma\ (meq/m^2) = \frac{CES}{S}$. en unité S.I, la CEC est exprimée en coulomb/kg, et σ en coulomb/m^2

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux .L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraine l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur (Belabbaci,2014).

I.4.3.Forces d'attraction entre les minéraux argileux :

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la double couche diffusée due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques.

I.4.3.1.Forces d'attraction :

Les forces d'attraction ou force de cohésion, sont produites avant tout par les surfaces chargées des minéraux et par les cations des films d'eau adsorbée et de l'eau libre. Les cations chargés positivement, sont attirés par les surfaces des minéraux argileux, chargée négativement (figure I.12) ; ainsi adsorbés, ils agissent comme des liens favorisant l'attraction entre les minéraux

argileux. Plus ces derniers sont rapprochés, plus l'action qu'exercent les cations est grande et plus l'attraction est forte, les films d'eau adsorbée peuvent modifier ces forces; en effet, plus ils sont épais, plus les minéraux sont éloignés et plus l'attraction et faible.

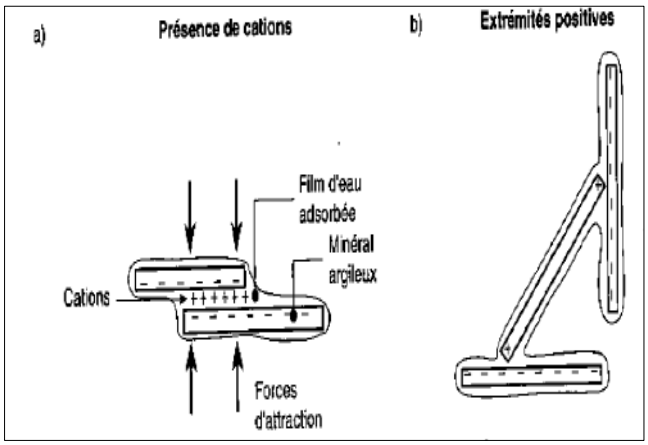


Figure I.11 : Forces d'attraction s'exerçant entre les minéraux argileux. (Robitaille et Tremblay ,1997)

Les forces d'attraction favorisent la floculation et le dépôt des minéraux argileux placés dans un milieu de sédimentation riche en cations, comme l'eau de mer. Par ailleurs, les minéraux argileux situé dans un dépôt d'argile sont soumis à la fois aux forces d'attraction et aux contraintes de compression produites par le poids propre du sol. et comme ces contraintes augmentent avec la profondeur, plus les minéraux argileux sont enfuis profondément dans le dépôts, plus ils se rapprochent les uns des autres et plus les forces d'attraction deviennent importantes (Robitaille et Tremblay ,1997).

I.4.3.2 Forces de répulsion :

Les forces de répulsion s'exercent d'abord entre les minéraux argileux eux-mêmes : ceux dont les surfaces portent le même type de charges se reposent tout simplement. Ces forces peuvent aussi dépendre de la différence entre les concentrions de cations des films d'eau adsorbée et de l'eau libre. Par un phénomène osmotique, les molécules d'eau provenant de l'eau libre, où l'on observe une faible concentration de cations, cherchent à s'infiltrer entre les minéraux, dans les films d'eau adsorbée, pour ainsi diluer la quantité de cations qui est beaucoup plus élevée à cet endroit (figure I.12). Cette infiltration augmente évidement.

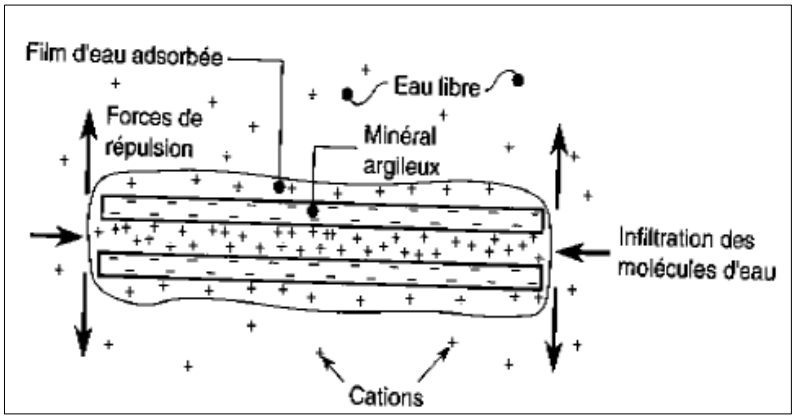


Figure I.12 : Forces de répulsion s'exerçant entre les minéraux argileux (Robitaille et Tremblay ,1997).

I.4.4.Film d'eau adsorbée :

Le film d'eau adsorbée est constitué de molécules d'eau auxquelles se joignent les cations présents dans l'eau des sols. Les forces d'attraction qui le maintiennent à la surface des minéraux argileux varient en fonction de la distance. Ainsi à la surface même des minéraux, les molécules d'eau et les cations sont solidement retenus : l'attraction est si grand que les molécules d'eau, fortement orientées adoptent un comportement les associant d'avantage à un solide qu'à un liquide. A mesure qu'elles s'éloignent de la surface et que les forces d'attraction diminuent, ces molécules d'eau deviennent de plus en plus mobiles. A la limite, l'attraction entre la surface des minéraux argileux et les molécules d'eau n'appartiennent alors plus au film d'eau adsorbée, elles se déplacent librement et constituent ce qu'on appelle **l'eau libre.** L'épaisseur du film d'eau adsorbée est difficile à évaluer. Selon les observations elle peut atteindre 40 nm, ce qui est supérieure à l'épaisseur de certains minéraux argileux. (Figure II.13) présente à l'échelle, l'un par apport à l'autre, les films d'eau adsorbée enveloppant une particule de la kaolinite et une particule de montmorillonite.

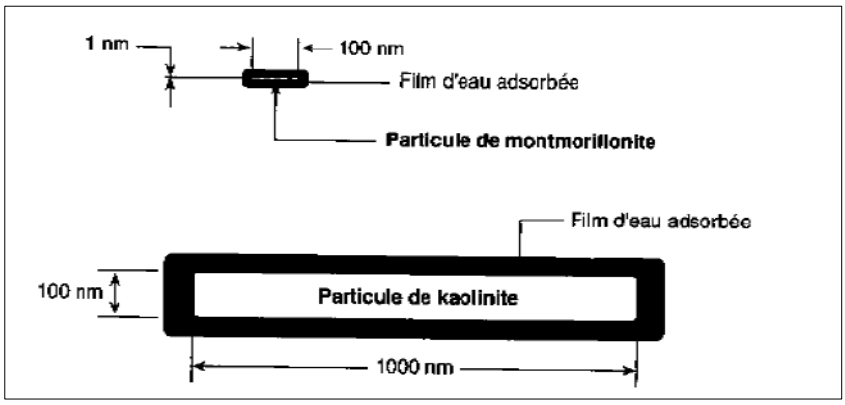


Figure I.13 : Films d'eau adsorbée. Robitaille et Tremblay (1997)

I.5.Comportement des sols argileux :

I.5.1.Retrait gonflement des sols fins :

Le retrait-gonflement est un phénomène qui concerne exclusivement les sols à dominante argileuse, bien que non dangereux pour l'homme, engendre chaque année sur le territoire mondiale des dégâts considérables aux structures, pouvant dépasser les millions d'euros cumulés. Ce phénomène est sans doute le plus dangereux et paradoxalement le moins connu.

En tant que risque naturel d'origine climatique, Ce phénomène est immédiatement lié aux conditions météorologiques et particulièrement aux précipitations. Ce risque est constaté dès les années 1950.

Le phénomène du gonflement est désigné très complexe intervenir plusieurs paramètres, a cause de la structure minéralogique de l'argile, car en fonction de la structure particulière de certains minéraux argileux ce phénomène provoque des fissures plus ou moins importantes, de cette manière créée des désordres dans les ouvrages géotechniques. Notons que les sinistres peuvent survenir tant par retrait que par gonflement. Ces dernières sont la conséquence de la mauvaise prise en charge du mouvement du terrain. C'est pour cela, plusieurs ingénieurs sont souvent confrontés à des problématiques majeures comme l'instabilité des ouvrages dans plusieurs pays du monde tels que Grèce, Iran, Sud d'Afrique, USA et l'Algérie en particulier.

Le phénomène de retrait est observé en période de déficit pluviométrique. Le matériau argileux présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Une rétractation (phénomène de retrait) due au matériau, elle devra dur et cassant

lorsqu'il est asséché (la teneur en eau diminue).La figure I.14 présente les différents types de fissuration causés par les mouvements différentiels de retrait-gonflement.

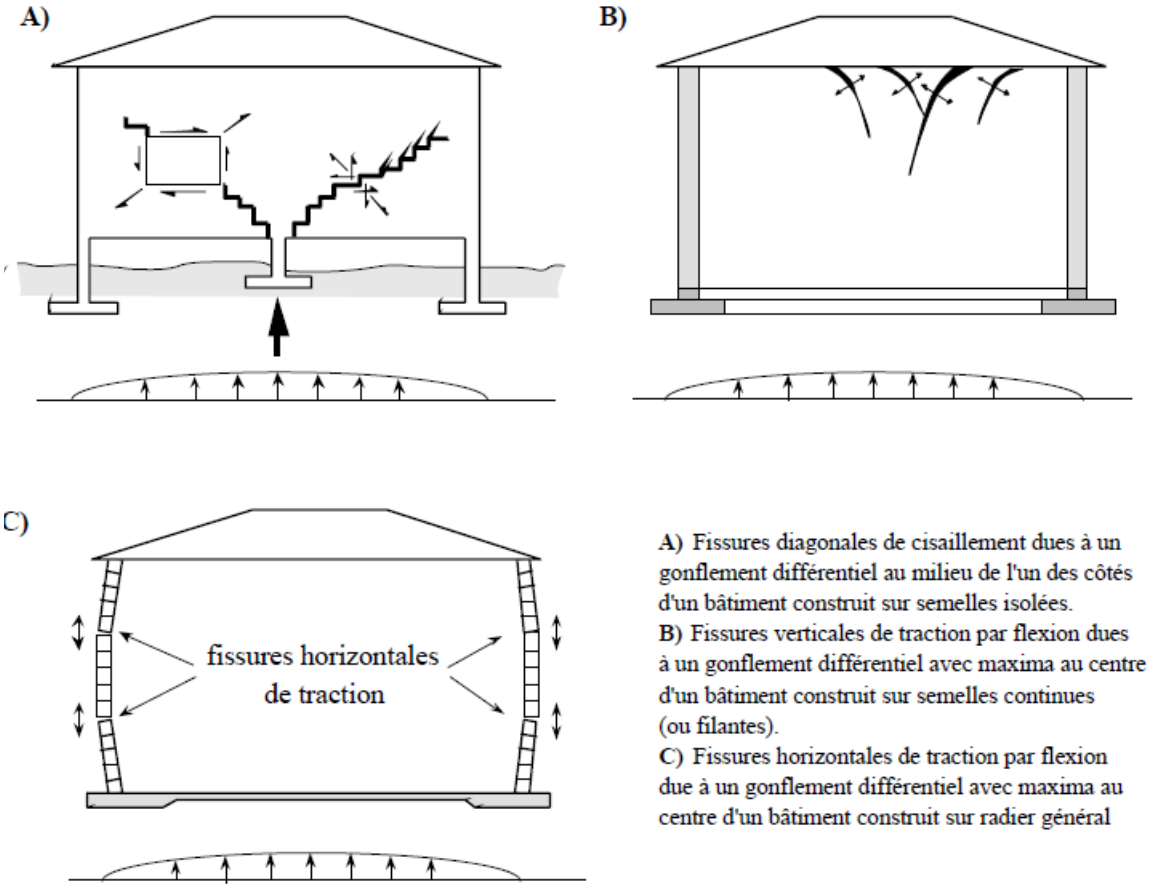


Figure I.14: Différents types de fissuration causés par les mouvements différentiels de retrait-gonflement (Mouroux et al. 1988).

I.5.2. Mécanisme de gonflement :

Le gonflement d'une argile est le résultat d'une introduction de molécules d'eau entre les feuillets. Si la distance inter foliaire est supérieure à 3A° (dimension de la molécule d'eau), l'accès de l'eau est possible, les forces d'attraction entre les feuillets sont alors affaiblies du fait de la présence d'eau, c'est cet affaiblissement qui donne aux feuillets d'argile une tendance de s'éloigner les uns des autres en augmentant l'espace inter foliaire, qui provoque par conséquent le phénomène de gonflement. (Tessier ,1990 cité par Aissiou, 2010).

I.5.2.1.Gonflement par hydratation de surface :

Dans lequel il faut distinguer la surface de la particule argileuse de celle du feuillet argileux. Au cours du gonflement inter micellaire, l'eau pénètre entre les particules, et quand l'eau pénètre également entre les feuillets on parle de gonflement intra micellaire.

I.5.2.2.Gonflement par hydratation osmotique :

Qui est favorisé par le développement de la double couche ionique .Suivant l'ampleur des différents modes d'acquisition d'eau, on distingue trois types de gonflement :

-Gonflement intra particulaire

-Gonflement inter particulaire

-Gonflement inter floconneux

Le gonflement intra particulaire est un gonflement microscopique, la succession de gonflement inter particulaire et inter floconneux résulte un gonflement macroscopique.

I.5.2.3.Gonflement au sens physico-chimique :

Une particule d'argile possède normalement une charge négative due aux substitutions isomorphes, et afin que l'ensemble eau-argile acquière l'électro neutralité, des cations sont attirés à la surface de la particule d'argile.

Ce pendant cette attraction est contrarié par la tendance des ions (cations et anions) à diffuser et à se distribuer d'une manière homogène dans l'eau. Le résultat de ces deux influences est un nuage d'ions entourant la particule.

Ce système peut être considéré comme une double couche électrique diffuse appelée double couche de Gouy-Chapman. Compte tenu de la structure ionique présentée précédemment, il apparaît d'importantes interactions physico-chimiques entre une particule argileuse et l'eau, généralement illustrées par le modèle de la double couche. Avec des hypothèses très précises, cette théorie permet de quantifier le phénomène de gonflement par rapport aux différents paramètres de l'eau (Aissiou, 2010).

I.5.2.4.Gonflement au sens mécanique :

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. A cet effet, un rappel sur les bases de la mécanique des sols appliquées à l'état de contraintes dans un sol est nécessaire.

I.5.3.Paramètres de gonflement :

En toute rigueur, les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le gonflement, ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus de gonflement. Comme c'est déjà évoqué, les phénomènes physico-chimiques et les mécanismes intervenant à différentes échelles (auxquels se surajoutent d'éventuelles modifications de la structure du terrain pendant le gonflement) rendent très difficiles la caractérisation .D'après Aoun (2016) les paramètres de gonflement sont :

I.5.3.1.Pression de gonflement :

Est définie comme étant la pression. Engendrer lors de l'hydratation d'un échantillon en condition confinée ; et peut être aussi définie par la pression qu'il faut exercer pour maintenir un échantillon à son volume initial avant l'adsorption d'eau. Cette définition de la pression de gonflement est la plus usitée mais elle n'est pas la seule.

I.5.3.2.Gonflement libre :

Un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.

I.5.3.3.Indice de gonflement :

Traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné ; il est défini par la pente de la courbe e= f(σ)obtenue en déchargement lors d'un essai oedométriques classique.

I.5.4.Manifestations dues au gonflement des argiles:

Plusieurs édifices ont été bâtis sur des sols gonflants sans que les précautions nécessaires pour ce type de cas du retrait-gonflements des sols soient prises. Il parait que pour certains concepteurs, la prise en considération du mécanisme conduisant au gonflement des argiles constitue pour eux une étape secondaire

L'examen des travaux publiés dans la littérature mondiale montre que l'on rencontre des problèmes de construction sur les sols gonflants dans les pays suivants :

Afrique du sud, Algérie, Arabie Saoudite, Argentine, Australie, Azerbaïdjan, Botswana, Birmanie, Canada, Chine, Cuba, Égypte, Espagne, Éthiopie, France, Ghana, Grèce, Hongrie, Inde, Iran, Italie, Kazakhstan, Maroc ,Mexique ,Nigéria ,Pakistan, Pologne, Portugal,

Au niveau nationale enregistre des nombreux dégâts a titres d'exemple la figure au dessous qui montre des conséquences à cause le gonflement d'argile dans la région d'étude (El Kouif, wilaya de Tébessa, Nord-est de l'Algérie),



Figure I.15 .a et b : Photos montrant les différents types de fissures au niveau des Constructions dans la région d'étude (El Kouif) (Aoun, 2016).

Un autre cas à In Amenas (sud de l'Algérie) c'est le cas le plus frappant de la manifestation de gonflement d'argile dans le sud d'Algérie est celui d'In Amenas (Wilaya d'Illizi).
Dans cette région les désordres dus au gonflement ont mené à la ruine totale de plusieurs d'ouvrages de grande importance (figure I.16**)**



Figure I.16: Rupture du studios-appartements du fait du gonflement du sol (In-Amenas**)** (Derriche et Iguechtal)

On enregistre aussi un cas à Saïda (sud-ouest d'Algérie), Dans la Wilaya de Saïda (Sud-Ouest) d'Algérie, de nombreux projets fondés sur des motifs argileux qui ont des problèmes a montré des signes de dégradations telles que fissures dans les structures. Ces dégradations ont entraîné la destruction totale des bâtiments. (figure I.17).



Figure I.17: cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi, 2006).

I.6.Glissement de terrain :

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels. Se produisent dans les circonstances très variées, ils affectent des ouvrages construits par l'homme ou des pentes naturelles. ; il se produisent soudainement ou durent plusieurs mois, voire parfois plusieurs années ; la rupture affecte une forme vaguement circulaire ou bien au contraire ne présente aucune caractéristique géométrique particulière, la rupture se produit sous l'action mécanique d'un écoulement d'eau ou parce que le terrain a été progressivement lessivé par une eau pauvre en cation on pourrait multiplier les exemple et montrer combien la morphologie des glissements présente d'aspects divers tant dans les milieux pulvérulent que dans les milieux cohérant.

I.6.1.Définition du glissement de terrain :

Les géologues, les ingénieurs ainsi que d'autres professionnels s'appuient souvent sur des définitions uniques et légèrement différentes de glissements de terrain. Cette diversité dans les définitions reflète la nature complexe des nombreuses disciplines associées à l'étude de ce phénomène.

Le glissement de terrain dans notre projet, est un terme général qui peut être utilisé pour décrire un mouvement qui résulte de la déformation, de la rupture et du déplacement du sol, de la roche, ou des matières organiques sous les effets de la gravité et du relief. Les diverses classifications de glissements de terrain sont associées à des mécanismes spécifiques de rupture ainsi qu'aux propriétés et aux caractéristiques des pentes.

Il ya d'autres expressions ou termes qui sont utilisés de façon interchangeable avec le terme «glissement de terrain», y compris tout mouvement de masse, rupture de pentes ou autre. On entend souvent ces termes appliqués à tous les types et tailles de glissements de terrain. Néanmoins, quelle que soit la définition utilisée ou le type de glissement de terrain étudié, il est important de connaitre les éléments de base qui le forment.

I.6.2.Cause des glissements de terrain :

Il existe deux principales catégories de causes de glissements de terrain: l'une d'origine naturelle et l'autre d'origine humaine. Parfois, les glissements de terrain sont causés, au pire, par une combinaison des deux catégories.

I.6.2.1.Causes d'origine naturelle :

Cette catégorie comprend trois grands mécanismes de déclenchement qui peuvent se produire seuls ou en combinaison : l'eau, l'activité sismique et l'activité volcanique.

Les effets de toutes ces causes varient considérablement et dépendent de plusieurs facteurs tels que la pente du talus, la morphologie, la forme du terrain, le type du sol, la géologie des terrains, et la présence de surcharges (dues aux personnes et aux constructions) sur les zones touchées.

I.6.2.2.Causes d'origine humaine (activité humaine) :

L'homme constitue fréquemment une cause d'accélération ou de déclenchement des instabilités, on cite parmi les activités humaines :

- Les modifications de l'équilibre naturel des pentes ; le talutage en pied de versant, le remblaiement en tête de versant ainsi que les travaux de terrassement, sont considérés comme une action mécanique ayant des répercutions défavorables sur la stabilité des pentes lorsqu'ils ne pas bien entrepris. Les terrassements, en supprimant la butée de pied d'un versant, réduisent les moments stabilisateurs.

- Les surcharges sur un versant qui peuvent être un remblai, un immeuble, un mur de soutènement, une décharge, etc. qui se trouvent en tête ou à mi-pente d'un versant.

L'augmentation de la charge et du moment moteur crée une diminution du coefficient de sécurité qui est favorable à l'apparition d'une rupture rationnelle, (Bousbaa ,2015).

I.6.3.Pathologiques de glissement des terrains :

Nous allons représenter dans ce chapitre quelques cas pathologiques dus aux glissements des terrains cité dans la littérature, et qui représentent plusieurs cas de glissement de terrain soit en Algérie.

On peut citer plusieurs cas de glissement de terrain survenus en Algérie, plus particulièrement celui de Bejaia, le terrain concerné par le glissement de terrain présente une forte pente supérieure à 60° et qui est sujette à un glissement certain, compte tenu de la forte pluviométrie affectant la région de Bejaia (figure I.18).



Figure I.18 : Fissures longitudinales dans la routé affecté par le glissement

Un autre cas à Médéa le glissement de terrain située au Zone de glissement est située au nord de l'échangeur de Médéa, au cour de la réalisation de la section autoroutier entre la Chiffa et Berrouaghia sur 53km, le cas de glissement et en PK20+930~ PK21+175.

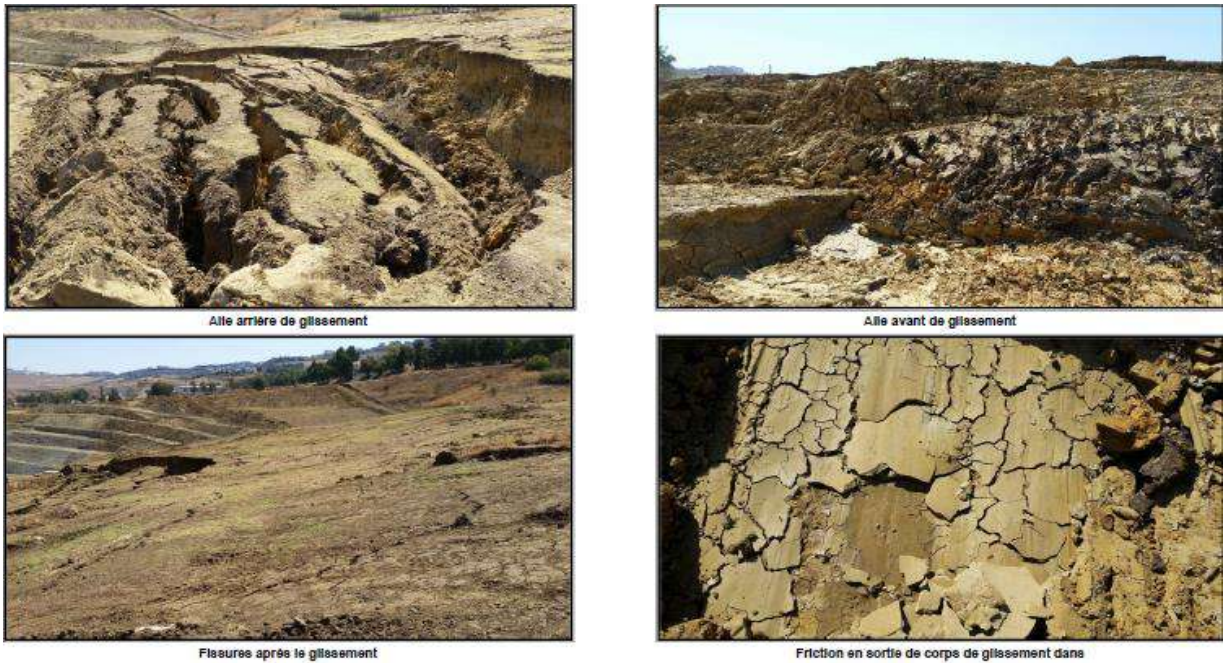


Figure I.19 : Différents faces de glissement (DTP Médéa)

I.7.Tassement :

Les sols fins saturé tels que les argiles et les limons sont caractérisés par une faibles perméabilité, ce qui fait que sous l'effet d'une surcharge transmise par les fondation au sol, l'eau interstitielle s'infiltre lentement et le volume du squelette granulaire diminue. La réduction du volume se manifeste. On parle alors d'un tassement du sol par consolidation.

Le tassement de consolidation est un phénomène qui dépend du temps, il se produit dans les sols à grains fins qui présentant un faible coefficient de perméabilité, la vitesse de tassement dépend de taux de drainage de l'eau interstitielle, le tassement secondaire qui dépend lui aussi du temps (Harichane ,2014).

Dans ce cas on peut de citer le cas de tassement des silos métallique à wilaya de Bejaïa, l'ouvrage est constitué de 10 silos métalliques de capacité totale de 76000 tonnes destinés pour le stockage de produits céréaliers, il a été réalisé en 2004 et mis en exploitation au mois de mars 2006.Les silos ont été fondés sur un radier général en béton armé de dimensions 119,4m x 49 met de 75 cm d'épaisseur. Deux galeries de vidange souterraines de 2,5m x3 m longent le radier et débouchent sur des trémies d'évacuation.(figures I.19, 20).Tenant compte du risque de tassement important, un renforcement de sol a été réalisé par des colonnes ballastées de 1m de diamètre, 12m de profondeur et un maillage de 2,43m x2,39m. Le tassement du sol renforcé, calculé par l'entreprise de réalisation pour une charge de service de 140 kPa est de 10 cm, il a été jugé admissible au stade de la conception par le maître de l'œuvre Omar sadoui et al (2012).



Figure I.20 : Stagnation des eaux au centre du radie. Omar sadoui et al (2012)



Figure I.21: Vue générale de la batterie de silos. Omar sadoui et al (2012)

I.8.Conclusion :

Les matériaux argileux, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. Les dommages provoqués par le gonflement des sols argileux présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses.

On dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever :

- Le changement de site.
- Le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant.
- La protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau.
- La prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer.

Enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié, C'est le but de notre travail de recherche.

Dans le chapitre qui suit, nous décrirons les différentes méthodes du traitement des sols argileux permettant d'améliore leur comportement mécanique et physique par le suite réduire le nombre des dégâts.

CHAPITRE II

Techniques de traitement du sol

Chapitre II: Techniques de traitement du sol

II.1.Introduction :

Plusieurs techniques du traitement des sols utilisé pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation.

Dans ce chapitre nous allons présenté une synthèse bibliographe sur les différentes techniques d'amélioration des sols expansifs qui sont actuellement le plus utilisées en domaine géotechnique.

II.2.Traitement des sols expansif par ajout de sable :

C'est vers les années soixante-dix que des chercheurs ont étudié l'influence de l'ajout de sable sur les sols gonflants. Cette technique consiste à remplacer une partie du sol gonflant par le matériau inerte tel que le sable car il sera plus économique d'utiliser un matériau local et en principe largement disponible .Cette technique intéressé actuellement les payes ou' le sable est abondant, comme l'Algérie, Arabia soudai, etc.

Des études récentes ont été menées par de nombreux chercheurs et qui montrent l'effet positifs et très encourageants de sable pour réduire la plasticité des argiles, par conséquent réduit ses potentiel de gonflement.

Nous allons citer les résultats obtenus par certains chercheurs

- Kaoua et al (1994), ont constaté que l'ajout de 20 % de sable permet de diminuer le potentiel de gonflement de 25% et la pression de gonflement a été réduit de plus de 60%.
- Une autre étude a été fait par Bengraa et al, (2005) concluent, sur la base d'analyses par que l'ajout de sable à deux argiles de différentes plasticités, permet de réduire leur plasticité et leur potentiel de gonflement du sol (Bengraa et al ,2005).
- Farooq et Virk (2009) ont montré que l'ajout de sable augmente la densité sèche maximale et l'indice de (CBR), et réduit le potentiel de gonflement, l'indice de compression, la teneur en eau optimale et l'indice de plasticité d'un sol argileux.

- Prasad et Sharma (2014) ont examiné la variation de la densité sèche maximale et teneur en eau optimale d'une argile plasticité moyenne traitée avec du sable à différentes teneurs (0%,10%, 20%, 30%, 40%). Ils ont constaté que la teneur en eau optimale, jusqu'à 30% de sable, diminue, par la suite, il augmente légèrement. Cependant, la densité sèche maximale, jusqu'à 30% de sable, a augmenté et par la suite, il a diminué. En outre, dans cette étude, les auteurs ont montré l'amélioration de l'indice de CBR dans les sols argileux traité avec 30% de sable.

II. 3. Traitement chimiques :

Le principe de base est l'augmentation de la concentration ionique de l'eau libre et l'atténuation du phénomène d'échange, cette technique est applique dans les payes développes et en particulier aux Etats unis.

Le traitement d'un sols par ajout d'un produit consiste dans une première étape à choisir ce produit (sels ou liant) , ensuite déterminer son dosage , puis définir une méthode d'addition en tenant compte de la quantité et la profondeur du sol à traitée . la méthode d'étude dépend évidemment de l'usage auquel est destiné le sol stabilisé.

Dans le catégorie des liants on enregistre la présence de deux types hydrauliques (ciment , chaux , cendre volante , laitier et pouzzolane) et organique (goudron , bitumes , polymère) (Louafi, 2013).

II. 3. 1. Chaux :

La chaux a été utilisée depuis longtemps comme stabilisateur des sols sensibles à l'eau (remblai, couches de formes…etc.). De plus, la chaux est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie, la dépollution.

La chaux est généralement une poudre fine obtenue par la calcination de carbonate de calcium ($CaCO_3$), à une température supérieure à 900°C, qui donne lieu à la naissance d'un oxyde de calcium (CaO) ou la chaux vive munie d'un dégagement du gaz carbonique (CO_2) (Eq. 1).

$CaCO_3$ (calcination à 900°C) → CaO (chaux vive) + (dégagement de CO_2) **(1)**

Au contact de l'eau, la chaux vive obtenue par calcination, peut se transformer en chaux éteinte ($Ca(OH)_2$) accompagné par un fort dégagement de chaleur, (Eq. 2).

$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ + 12 kJ/mol **(2)**

La chaux vive CaO peut, après hydratation par l'humidité ambiante ($Ca(OH)_2$), se carbonater sous l'action du (CO_2) atmosphérique, (Eq. 3).

$$\mathbf{Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O} \qquad \mathbf{(3)}$$

Les caractéristiques des chaux aériennes vis-à-vis du traitement des sols dépendent de la forme sous laquelle elles sont utilisées, diverses formes de chaux étant utilisées dans le traitement des sols. Les formes les plus communes sont la chaux vive et la chaux éteinte (Hamid, G et al, (2016); Hamid, G (2017)).

II .3.1.1. Mécanisme de stabilisation à la chaux :

Le principe de l'action de chaux avec les minéraux argileux en présence d'eau, peuvent être résumés en deux phases principales à savoir:

II .3.1.1.1.Action à court terme:

a- Floculation:

L'hydratation et l'ionisation de la chaux, et la modification de la capacité d'échange cationique (*CEC*) mènent à la floculation/agglomération des particules argileuses en grumeaux
Stables. Ce phénomène s'explique par la formation de ponts $Ca(OH)_2$ ou $CaOH^+$ entre les feuillets d'argile. Les feuillets sont déstructurés à cause des interactions électrostatiques, et une structure plutôt sphérique s'instaure. Elle peut se résumer ce phonème dans le schéma (figure. II.1) (Cabane, 2004) cité par G,Hamid (2017) .

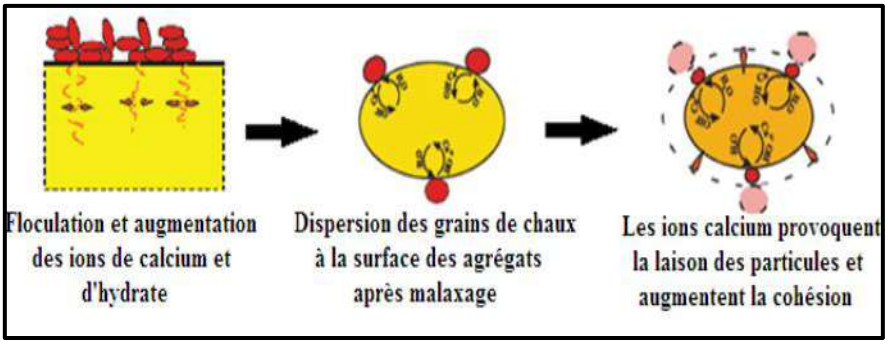


Figure. II .1 : Action de la chaux à court terme (modification par floculation), (Cabane, 2004).

b- Séchage :

La réduction de la teneur en eau résulte de 4 phénomènes différents :

1. La fixation chimique de l'eau par la réaction d'hydratation de la chaux vive en chaux éteinte.
2. L'évaporation de l'eau par la chaleur produite via la réaction précédente: une partie de cette chaleur élève la température du mélange, le reste provoquant l'évaporation d'une partie de l'eau du sol.
3. L'augmentation de la matière sèche due à la formation de chaux éteinte: 1,3 fois de la masse de chaux vive ajoutée.
4. Le malaxage et l'aération au traitement augmente l'évaporation.

II .3.1.1.2. Action à moyen et à long terme :

a- carbonatation de la chaux :

La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques sont les deux réactions secondaires responsables de la stabilisation. La carbonatation de la chaux est la réaction entre cette dernière et le CO_2 de l'atmosphère menant à la formation de carbonate de calcium.

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

b- actions pouzzolaniques :

L'action pouzzolaniques qui se produit est due à la mise en solution en milieu de PH élevé (supérieur à 12) de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées.

Ces produits sont donc des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) (figure II.2).

Les principales réactions chimiques peuvent être schématisées comme suit (Glen**,** 2001):

$$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{+2} + 2OH$$

$Ca^{+2} + 2OH^- + SiO_2$ (silice des argiles) → **CSH** (silicate de calcium hydraté)

$Ca^{+2} + 2OH^- + Al_2O_3$ (alumine des argiles) → **CAH** (aluminate de calcium hydraté).

Les réactions pouzzolaniques sont responsables du durcissement du mélange sol-chaux cependant, les vitesses de solubilisation des constituants de la fraction argileuse d'un sol sont plus faibles qu'en présence des matériaux pouzzolaniques traditionnels, et donc les phénomènes de cimentation se développent lentement (plusieurs semaines, mois, voire des années dans les

conditions climatiques tempérées) (Nguyen, 2015).

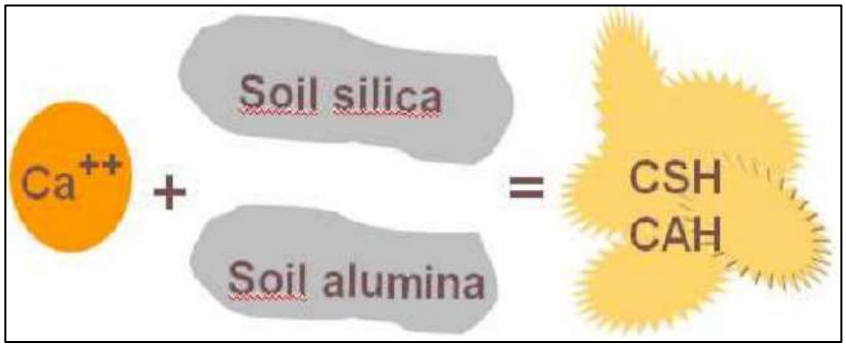


Figure II.2: Réaction pouzzolaniques ((Marrot, 2010) cité par Nguyen (2015))

La cinétique de ces réactions est influencée par plusieurs facteurs :

- La température du milieu: plus la température est élevée, plus la prise est rapide. Cependant, au-dessus de 45°C, les produits de la réaction sont dénaturés. La prise est ralentie voire arrêtée lorsque la température est inférieure à environ 4°C, et reprend lorsque la température commence à s'élever à nouveau.
- La quantité et la nature de la fraction argileuse: c'est la fraction argileuse du sol, constituée de phyllo silicates d'aluminium, qui réagit avec la chaux. Tous les minéraux argileux sont attaqués par la chaux, mais ceux qui ont la plus haute teneur en silicates disponibles réagissent plus fortement. Ainsi, la structure en trois couches de la montmorillonite expose des silicates des deux côtés du feuillet, de manière à ce qu'une montmorillonite subisse des
- réactions plus vite qu'une kaolinite composée de deux couches, parfois avec un décalage de plusieurs semaines dans le cas de la recombinaison pouzzolaniques. Néanmoins, une surface de silicates «disponibles» est attaquable si elle n'est pas reliée à une autre surface similaire par des ions qui ne sont pas facilement échangeables, comme c'est le cas dans l'illite et le chlorite.

II .3.1.2.Influence de l'ajout de chaux sur les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux :

II .3.1.2.1.Augmentation de PH :

la forte concentration en ion Ca^{2+} et OH^{-} entraine un échange cationique entre les ionsabsorbés et les cations apportés qui modifie la CEC et augmente le pH du sol à plus de12.5 (figure. II.3) (Al-Mukhtar et al. 2010) .

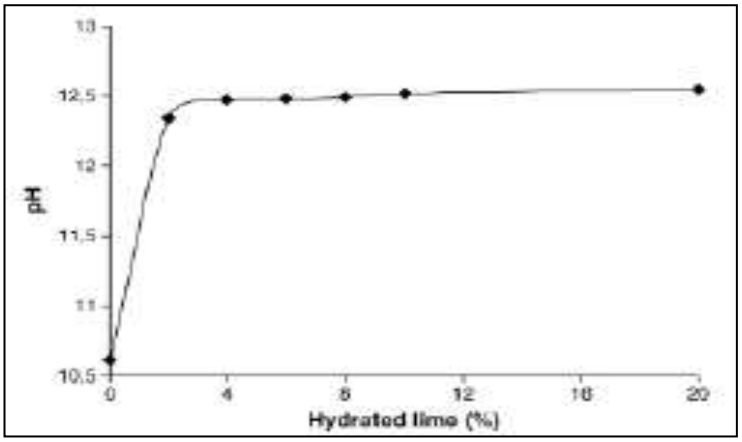


Figure. II.3 : Effet de la chaux sur le pH d'une argile (bentonite très plastique riche en kaolinite et en montmorillonite), (Al-Mukhtar et al. 2010).

II.3.1.2.2.Diminution de l'indice de plasticité :

L'addition de la chaux conduit à une augmentation importante de la limite de plasticité (w_P) du sol sans modification significative de la limite de liquidité (w_L). Il y a donc une diminution de l'indice de plasticité (I_P) comme montre l'étude de Rogers et Glendenning (1996) sur l'argile l'argile de Londres traité par la chaux ils ont constaté une diminution de l'indice de plasticité avec une forte augmentation de la limite de plasticité et une faible augmentation de la limite de liquidité quand le dosage en chaux augmente (figure II.4) :

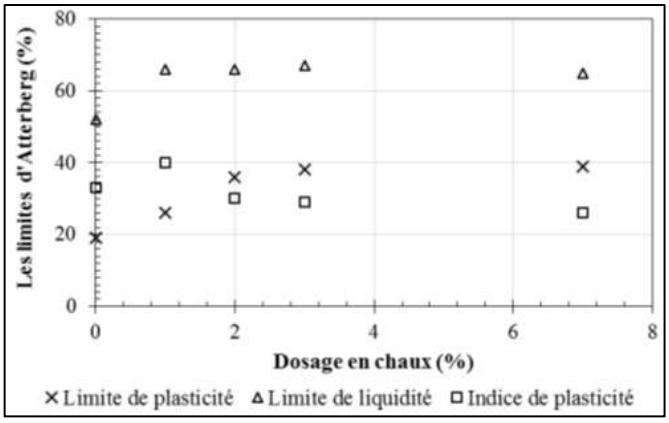


Figure II.4: Effet du dosage en chaux sur les limites d'Atterberg de l'argile de Londres (illite, kaolinite, smectite) (Rogers et Glendenning, 1996).

Le même résultat est trouvé dans l'étude de Hilt et Davidson (1960). Ces auteurs ont remarqué que l'ampleur des modifications des limites d'Atterberg ne dépend pas du temps de cure mais du dosage de chaux ajoutée et de la nature du sol traité. Cette constatation peut être reliée aux variations de *CEC* en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

Bell (1996) a conclu que l'augmentation de la limite de plasticité de l'argile traitée à la chaux dépend de sa minéralogie argileuse: l'augmentation forte de w_P pour la montmorillonite, moins forte pour la kaolinite et changement non significatif pour le quartz.

L'étude de Lasledj et Al-Mukhtar (2008) sur l'argile très plastique traitée à la chaux a montré que *I*P diminue immédiatement de 170% à 58% lors de l'addition de la chaux, et que le temps de cure n'a pas d'effet significatif sur les limites d'Atterberg.

La réduction de l'indice de plasticité se produit en concomitance avec celle de la teneur en Eau (GTS, 2000). Après traitement, le sol se trouve à une teneur en eau inférieure à la nouvelle limite de plasticité. C'est-à-dire que le sol se transforme de l'état plastique (déformable – collant) avant le traitement à l'état solide (rigide – fragile) après le traitement. Cela facilite donc la mise en œuvre du remblai (la circulation des engins). La figure II.5 explique l'évolution des limites d'Atterberg et la transformation de l'état du sol après le traitement.

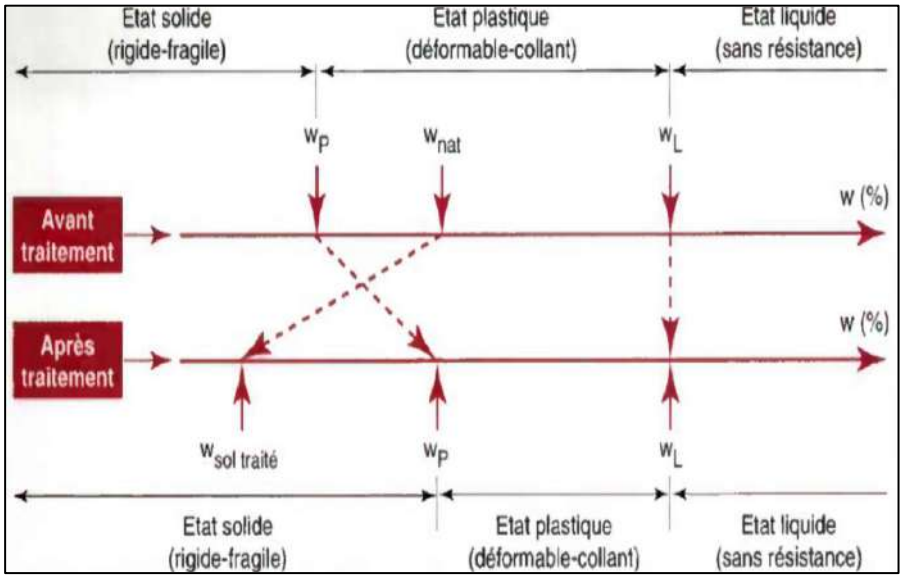


Figure II. 5: Evolution de limite de liquidité et limite de plasticité d'un sol après l'ajout de chaux (GTS, 2000).

En présence chlorure de sodium, Marks, (1967) ont trouvé une modification avec la teneur optimale en chaux pour les des deux sols étudiés a causé peu de changements dans les limites de plasticité. Il a constaté que l'indice de plasticité augmente de zéro à 4,0. Avec addition de 1% de sel pur l'argile traitée par la chaux figure au-dessous.

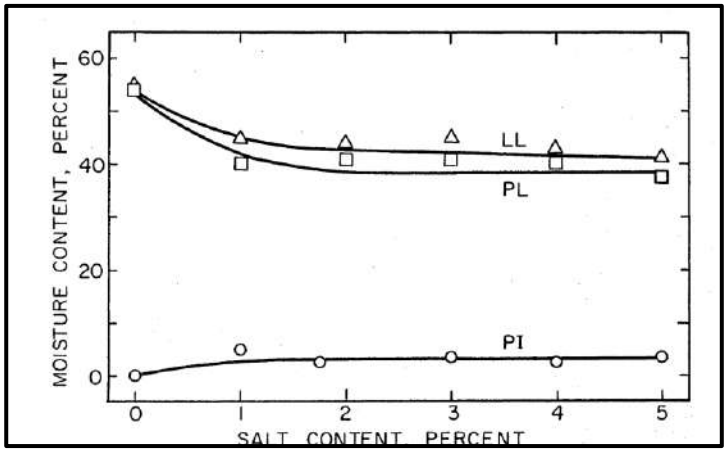


Figure .II.6 : Effet du traitement au sel et à la chaux sur les limites d'Atterberg (Marks, 1967).

II.3.1.2.2. Amélioration des références de compactage :

Après traitement, la courbe de compactage Proctor devient plus aplatie. La compacité maximale est moindre, ce qui est traduit par une masse volumique sèche maximale (ρd_{MAX}) réduite, et une teneur en eau à l'optimum (w_{OPT}) plus élevée (figure .II.7). On explique la diminution de ρd_{MAX} par la réorganisation des particules argileuses causée par le phénomène de floculation/agrégation. L'ampleur de ces modifications dépend de la quantité de chaux ajoutée : plus la quantité de chaux

ajoutée est importante, plus la teneur en eau optimale est décalée vers les fortes teneurs en eau et plus ρd_{MAX} est faible Nguyen (2015).

Mtallib et Bankole (2011) attribue l'augmentation de w_{OPT} à l'addition de la chaux dans le sol qui exige plus d'eau pour les réactions (l'hydratation, pouzzolaniques) avec la chaux.

Les courbes de l'indice portant immédiat (*IPI*) et de l'indice portant californien *CBR* immersion Sont déplacées vers les teneurs en eau plus élevées après le traitement. Pour une même teneur En eau, la portance du sol traité est améliorée par rapport à celle du sol non-traité (figure II.7).

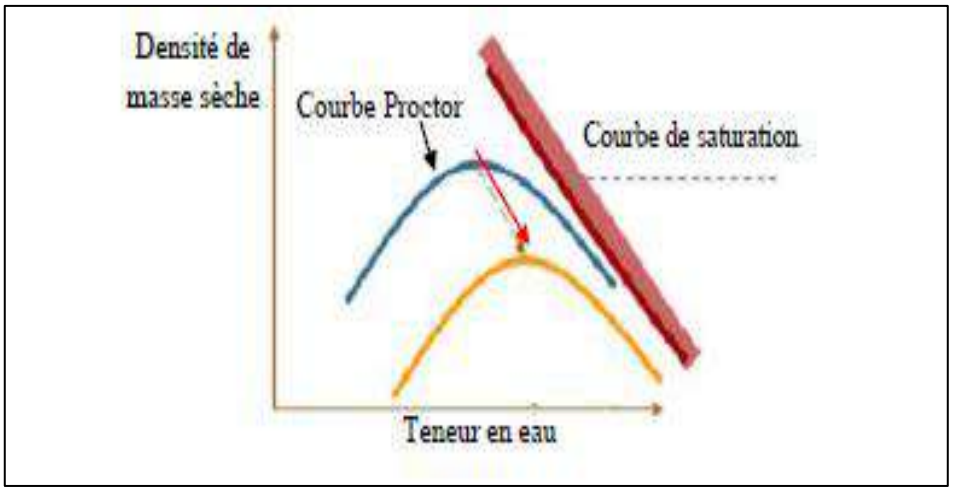


Figure II.7 : Evolutions des références de compactage (Nguyen, 2015).

Une modification du paramètre de Proctor d'un sol traitée par la chaux en présence chlorure de sodium. Une légère augmentation de la densité sèche compactée a été obtenue avec une teneur en sel croissante de sel mélanges de chaux. Une densité sèche maximale a été obtenue avec l'addition de deux pour cent de chlorure de sodium en conjonction avec toutes les teneurs en chaux sauf 6%, qui était la modification optimale, comme indiqué sur la figure. II.8 (Marks, 1967).

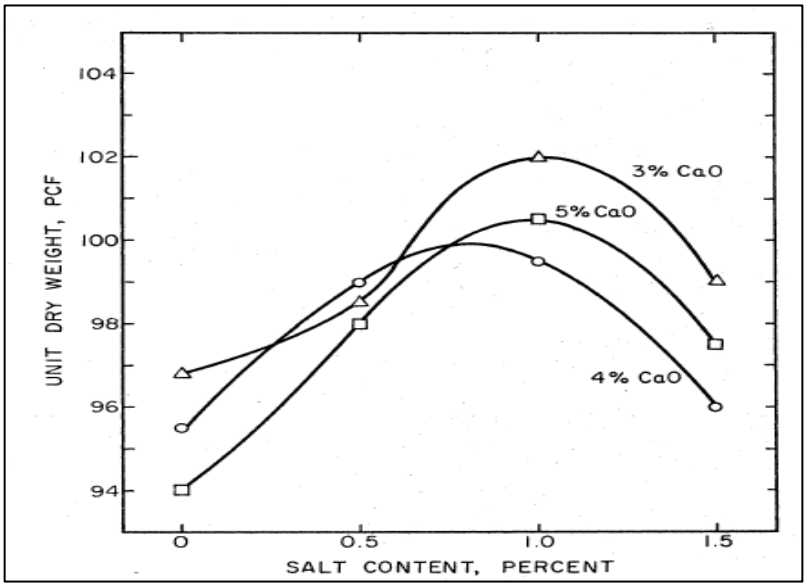


Figure II.8. : Effet du traitement à la chaux-chlorure de sodium sur les paramètres de Proctor (Marks, 1967).

II.3.1.2.2. Amélioration de la résistance à la compression uniaxiale :

L'effet de l'ajout de chaux aux sols argileux se manifeste par des améliorations dans les propriétés de résistance. Cette amélioration, qui est en grande partie, le résultat de la réaction pouzzolaniques Entre les particules et la chaux.

La résistance des mélanges sol chaux, est déponde par plusieurs facteurs tels que le type de sol, le type de chaux et la quantité , la dure de cure (température et eau), la teneur en eau, le poids unitaire,

Gueridi, (2009) a montré que l'ajout de chaux produit une augmentation de la résistance à la compression simple il a constaté aussi que la résistance du sol stabilisé augmente dans un premier temps presque proportionnellement avec le taux de chaux et cela jusqu'à un taux de 6%. Au-delà de ce pourcentage, l'augmentation de la résistance est moins marquée et la courbe semble s'acheminer

Vers une direction asymptotique horizontale, bien que certains auteurs parlent de courbes avec un maximum.

En ce qui concerne l'effet des sels solubles sur l'amélioration des sols traitée par la chaux certaines recherches ont été effectuées des études ;

Le sel de chlorure de sodium signalé augmente de façon proportionnelle la résistance à la compression des échantillons de stabilisants avec de la chaux. Il a expliqué que cela est dû à une augmentation du pH en raison de la présence de NaOH résultant de la réaction entre le chlorure de sodium et la chaux selon l'équation suivante (Tremblay et al .(2002) cité par Davoudi et Kabir) , (2011)) :

$$\mathbf{2NaCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl2 + 2NaOH}$$

Un comportement similaire a été constaté par Davoudi et Kabir (2011). L'effet bénéfique apporté par la présence du chlorure de sodium est due à la diffusion effective des ions de calcium Ca^{2+} à L'intérieur de la matrice argileuse qui viennent de remplacer les ions de sodium Na^{+}.

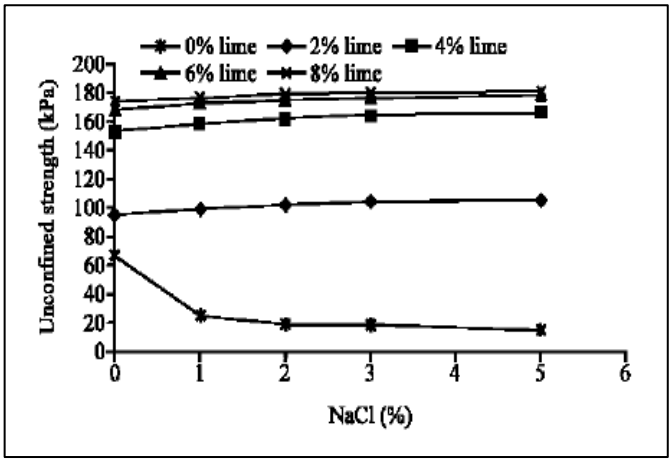


Figure II.9 : Variation de la résistance à la compression uniaxiale des mélanges argile –chaux – chlorure de sodium (Davoudi et Kabir (2011)

II.3.2. Ciment :

Un ciment est un liant hydraulique composé de matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'ailleurs, pour les travaux de terrassement, la norme NF- P15-108 met en évidence des liants hydrauliques routiers destinés notamment, à la réalisation d'assises de chaussées, de couches de forme et de terrassements.

La norme NF- EN 197-1 subdivise les liants hydrauliques en cinq type en fonction de leur composition à savoir: le ciment Portland (CEM I), le ciment Portland composé (CEM II), le ciment de haut-fourneau (CEM III), le ciment pouzzolaniques (CEM IV) et le ciment composé (CEM V). En général, tous les liants doivent contenir un ou plusieurs constituants qui présentent l'une au moins l'une des propriétés suivantes:

- propriétés hydrauliques: elles font développer, par réaction avec de l'eau, des composées hydratées stables très peu solubles dans l'eau.
- propriétés pouzzolaniques: c'est la faculté de former à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.
- propriétés physiques: elles font améliorer certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution du ressuage…etc.) (Hamid, G. (2017).

II.3.2. 1.Processus de stabilisation par le ciment

Le ciment Portland est un matériau fin formé à partir d'un mélange de clinker et de gypse. Le clinker est composé principalement de quatre phases d'oxydes; silicate tricalcique (C3S). Silicate bi calcique (C2S), aluminate tricalcique (C3S) et fer aluminate tétra calcique (C4AF). Sachant que: C = CaO S = SiO_2 A = Al_2O_3 et F = Fe_2O_3

Les deux phases de silice calcique sont les plus importantes dans le processus de stabilisation. Lors de l'hydratation, ces deux phases produisent l'hydroxyde de calcium Ca(OH) 2et l'hydrate de silice calcique (C3- s2- H3). L'hydroxyde de calcium fournit l'apport en calcium nécessaire à l'échange cationique, à la floculation de l'argile et à son agglomération. L'hydrate de silice calcique, quant à lui, apporte la résistance au sol traité. Lorsque le Ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol.

La solution devient donc saturée en hydroxyde de calcium. À mesure que les ions de calcium (Ca^{2+}) sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. Après un certain temps (environ 12 heures).

C-S-H (C = C3, S = S2, H = H3) et le $Ca(OH)_2$

$$\mathbf{2(C3S) + 6\ H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + 3Ca(OH)_2}$$

$$\mathbf{2(C2S) + 4\ H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H + Ca(OH)_2}$$

Incorporé au sol, le ciment va se dissoudre et s'hydrater. L'hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres est suivis par une phase de cristallisation. En cristallisant, les constituants hydratés du ciment enrobent et relient les grains entre eux: c'est la prise hydraulique. Celle-ci conduit assez rapidement et durablement au durcissement du mélange et à sa stabilité à l'eau et au gel, (Glen, 2001) .

II.1 .3.Cendres volantes :

Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols.

Zalihe Nalbantoglu, (2004) ; a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement (Nalbantoglu et al ,2004).

II.4.Traitement mécaniques :

Le traitement mécanique permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal

II.4.1 Compactage de surface :

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols (figure .II.10). La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroit avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. La technique du compactage est fonction de quatre paramètres essentiels : (l'énergie et le mode de compactage, la masse, volumique du sol sec, la teneur en eau et le type de sol).(Hamid, 2017).



Figure. II.10: Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie. (Hamid, 2017)

II .4.2 Compactage dynamique :

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse sur la surface à compacter. Le

principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulièrement intensif de manière à atteindre le plus rationnellement possible le but recherché. Cette technique est applicable dans tous les types de sols à comportement granulaire. Il s'applique particulièrement bien aux remblais hétérogènes ainsi qu'aux terrains de composition variable. Il peut s'appliquer aussi bien à des sols non saturés qu'à des sols situés sous la nappe.

En pratique, la technique consiste à laisser tomber en chute libre ou en quasi-chute libre, d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes (figure. II.11). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage. Les paramètres du compactage, à savoir l'espacement entre les impacts, le nombre de coups par impact, le nombre de

Passes de compactage…etc., sont déterminés sur site en fonction des différents essais de contrôle (essais de calibration, mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ…etc.) (Hamid, 2017).



Figure II .11 Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice1978, France) (Gaafer, 2015).

II.5. Traitement thermique :

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

II .6 Autres techniques d'amélioration des sols :

II .6.1 Electro-osmose:

L'électro-osmose a été initialement mise au point par Casagrande (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte (figure .II.12).(Hamid, 2017).

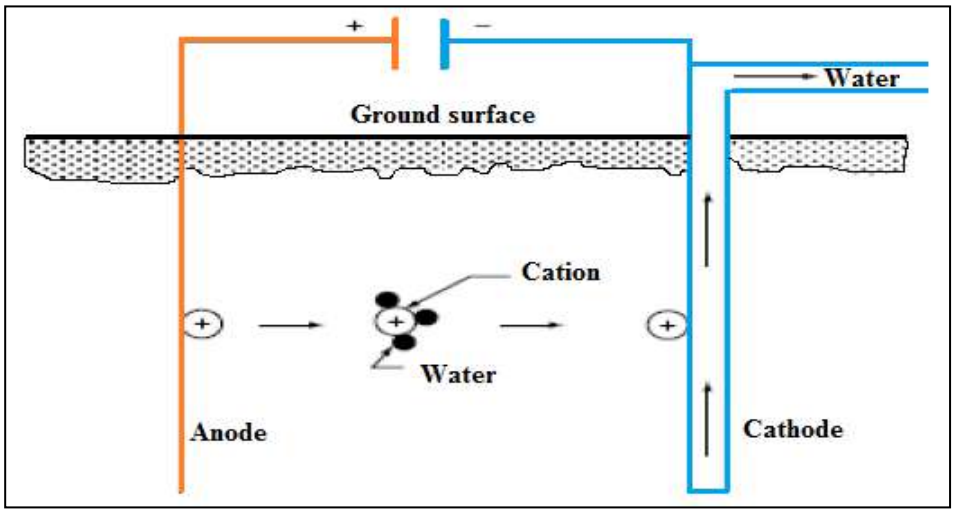


Figure II .12 : Principe de la technique électro-osmose. Hamid, G (2017)

Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique.

II .7. Conclusions :

Les différentes techniques d'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le mandéen vue de consolider des terrains ayant une structure hétérogène et inconstructible.

Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement. Ces choix doivent toujours être guides par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins.

La stabilisation chimique des sols trop humides et/ou trop plastiques, est une solution souvent préconisée pour rendre les terrassements réalisables et stabiliser les sols. Elle assure une diminution directe de la teneur en humidité et une augmentation directe de la portance.

CHAPITRE III

Identification des matériaux

Chapitre III : Identification des matériaux

III.1. Introduction :

Dans cette partie expérimentale, nous allons présenter les différentes caractéristiques des matériaux étudies dans ce travail. Les martiaux utilisés dans cette étude sont respectivement un matériau argileux provenant de la région de Médéa, une chaux fabriqué à Saida et une chlore sodium.

Sont présentés également, le protocole expérimental effectué avec un matériau argileux réduit en poudre et selon la norme Française (AFNOR).

L'ensemble des essais ont été effectués au niveau des laboratoires :

- Entreprise populaire des travaux routiers centre (EPTRC) de Berouaghia (Médéa);
- Laboratoire de mécanique des sols (hall technologie) d'université Médéa.

III.2. Matériaux utilisés :

III.2.1 Argile étudié :

III.2.1.1 Lieu de prélèvement :

L'argile a été utilisé dans cette étude, il a été prélevé à partir de 5m de profondeur (figuresIII.1,III.2), dans le contexte de réalisation d'un projet 300 logements provenance dans la région de Médéa il est délimiter comme suite :

- ✓ Au Nord : la route de Draa Samar Médéa ;
- ✓ A L'est : équipement projetés ;
- ✓ Au sud : programme 200 logements projetés ;
- ✓ A L'ouest : programme 500 logements projetés.

Le terrain et caractérisé par une pente variable qui peut atteindre les 10%.



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



Figure III.2 : Prélèvement d'échantillon 28/02/2019.

III.2.1.2 Préparation d'échantillon :

Après leur extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique, transportés au laboratoire. Après séchage, les sols ont été ensuite concassés et broyés pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification (ou de caractérisation) (figure III.3).



Figure III.3 : Séchage et broyage de matériau étudié.

III.2.1.3. Caractérisation chimique :

a- **Analyse chimique sommaire –ACS- NF P 18-560 :**

Afin d'étudier les caractéristiques chimiques de l'argile étudier, nous avons mené une série d'expériences chimiques sur les échantillons d'argile, selon la norme française NF P 18-560 (voir annexe).

Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau III.1 et représentés sur la (figure III.4)

Tableau III.1: Analyse chimique de l'argile étudie.

Caractéristiques	Symboles	Unités	Valeurs
Silice + Silicates	SiO2	%	59,40
Oxyde de fer + Alumine	Fe2O3 + Al2O3	%	5,25
Gypse + eau (Sulfate)	CaSO4, H2O	%	3,5
Chlorure	NaCl	%	0,98
Carbonate	CaCO3	%	24,89
Perte au feu	PAF	%	17,85
Matière organique	Mo	%	2,8

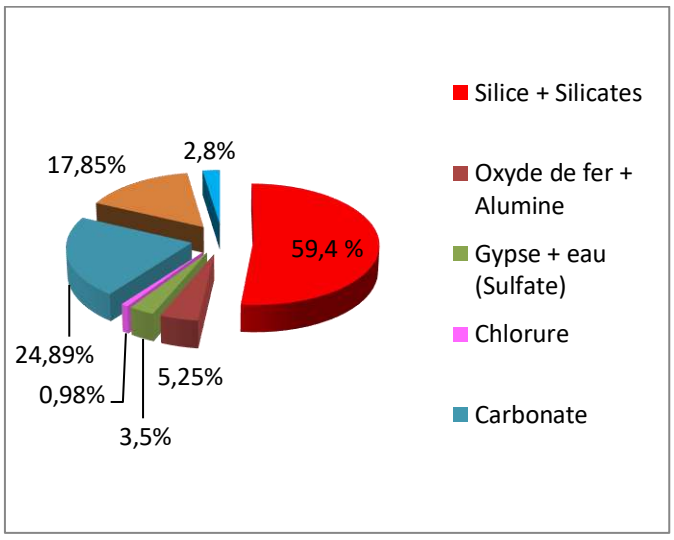


Figure III.4: Analyse chimique de l'argile étudiée.

D'après l'analyse chimique, on remarque que notre matériau présente une prépondérance, un pourcentage 59,40% de Silice + Silicates, et un pourcentage 24,89% de Carbonate, selon la norme NF P 94-048, comme indique le tableau (III.2) l'argile étudiée a été peu calcaire.

Tableau III.2 : Classification des sols en fonction du pourcentage Massique en carbonate.

Teneur en carbonate (%)	Classification
<10	non calcaire
10 à 29	peu calcaire
30 à 69	moyennement calcaire
70 à 89	fortement calcaire
≥90	Calcaire

b-Mesure de pH :

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évolués ou carbonates**.** L'analyse de notre sol a montré que son pH est de 7,64.

c-Mesure de la capacité d'adsorption de bleu méthylène d'un sol (NF P 94-068)

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol.

L'essai s'effectue sur 60 g de matériau, mis à tremper dans 0,2 l d'eau et maintenus en permanence sous agitation. On procède à des additions de bleu de méthylène jusqu'à ce que toutes les particules du sol soient saturées. La saturation est déterminée par le test de la tâche, en observant la formation d'une auréole bleue sur le papier filtre où l'on dépose une goutte de solution(figure III.5).

La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. On peut en déduire la surface spécifique totale du sol, (S_{st}) donnée par la formule théorique de suivante :

$$S_{st}\,[m^2/g] \approx 21 * VBS$$

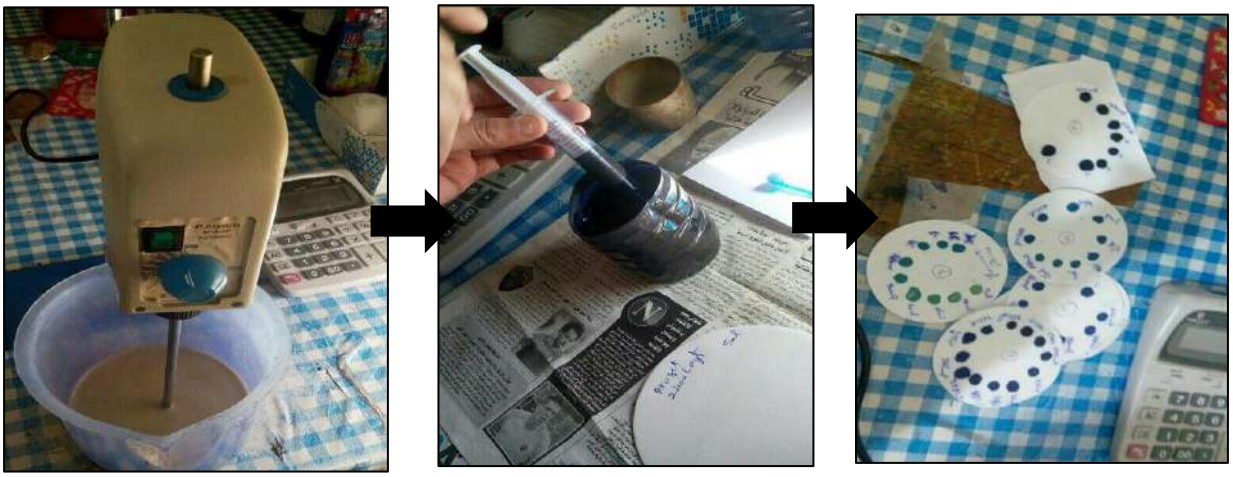


Figure III.5: Essai de bleu méthylène.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.3 **:**

TableauIII.3 :Résultat de la valeur du bleu de méthylène.

Échantillon	volume absorbé (ml)	VBS [ml/g]	Sst [m^2/g]
Matériau argileux	410	6,8	142,8

D'après les résultats suivants et selon la norme **NF P 11-300** le matériau étudie est un sol argileux donc ce matériau est susceptible de variation de volume.

III.2.1.4. Caractéristique physique :

a-Analyse granulométrique :

- **Méthode par tamisage à sec après lavage (NF P 94-056) :**

Principe de l'essai est consisté à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

On prend 1kg d'argile et imbibé pendent 24h, après en passe dans le tamis 0,08mm et laver complètement à un faible débit d'eau, en applique la méthode de sédimentométrie sur les éléments inférieur le tamis 0,08mm, et analyse granulométrique par tamisage concerne les éléments supérieure (figure au-dessous).



Figure III.6: Analyse granulométrique par tamisage.

- **Méthode par sédimentométrie (NF P 94-057) :**

La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente, on prend 80g d'échantillon, en mélange avec l'eau distillée additionnée d'un défloculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de $440cm^3$d'eau distillée et de $60cm^3$d'une solution à 5% d'hexamétaphosphate de soduim ($Na_6(Po_3)_6, 10H_2O$), introduit la prise d'essai dans le récipient utilisée avec l'agitateur mécanique afin d'agitation pendent 3min(figure III.7), laisser à imbibé au moins 15h à la température ambiante, après la fin durée compléter par l'eau distillé jusqu'à $2000cm^3$ dans un éprouvette, verser $2000cm^3$ dans une second éprouvette et plongé le thermomètre et le densimètre parfaitement propre et commencer de lire les lectures.



Figure III.7 : Analyse granulométrie par sédimentation.

La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon est représentée sur la figureIII.8.

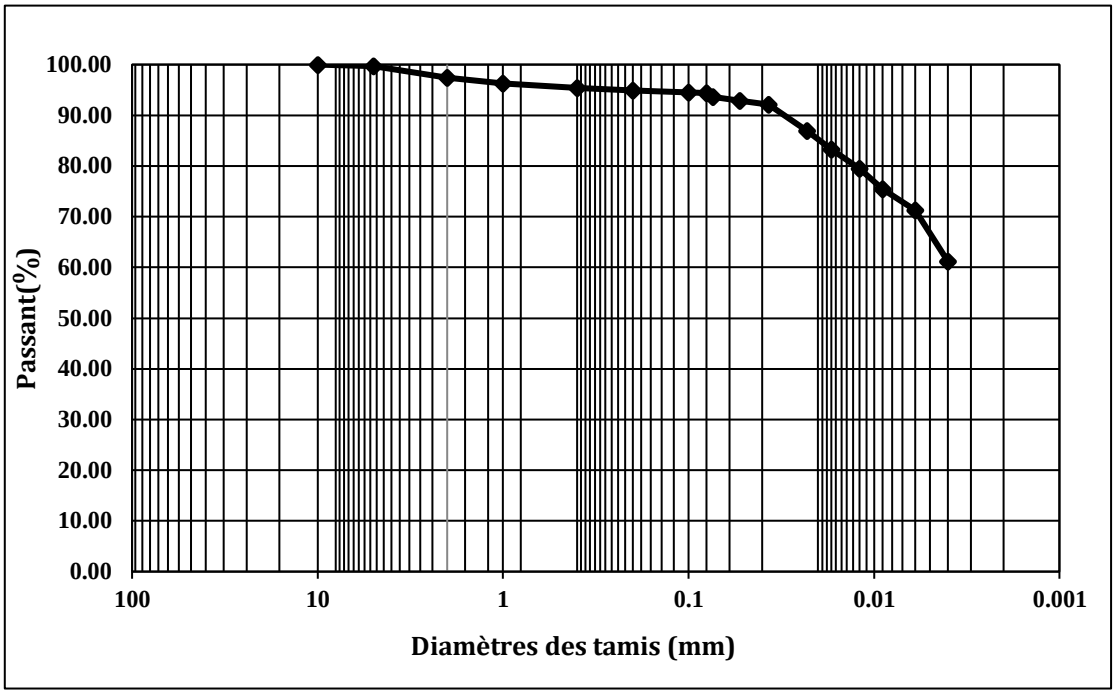


Figure III.8 : Courbe granulométrique du matériau argileux.

La courbe granulométrique, l'échantillon est constitué de plus de 94% de grains inférieurs à 80µm ce qui nous permet dire que cette échantillon représente un sol fin.

b- Poids volumique des grains solides (NF P94-054) :

Cet essai a pour but de mesurer le poids spécifique des sols au moyen du pycnomètre(figure III.9) (Condensateur de châtelet). Le poids spécifique d'un sol est le rapport du poids des grains Solides à leur volume absolu.

Υs= 27 kN/m Gs= 2.7 , Avec := $\frac{\Upsilon s}{\Upsilon w}$

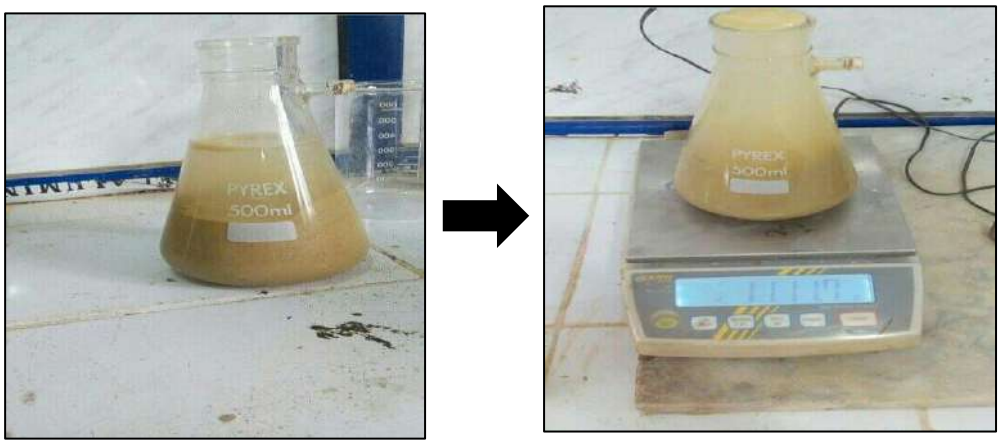


Figure III.9 : Détermination Poids volumique des grains solides.

c-Teneur en eau (NF P94-050) :

L'essai de la teneur en eau permet la détermination de la quantité d'eau existante dans le sol naturel (échantillon).La teneur en eau de l'argile étudié est de 26%

d-Limite d'Atterberg (NF P 94-051) :

Elles représentent des repères de teneurs en eau qui raffermissent la classification des sols du point de vue de leur plasticité ou de leur malléabilité.

Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,40 mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide.

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre

- **Limite de liquidité :**

  La limite de liquidité ($\mathbf{W_L}$) par définition ; c'est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 13 mm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs

expérimentales (NC, W_L) pour au moins quatre couples de valeurs. La WL est obtenue pour une valeur de NC égale à 25 coups.

- **Limite de plasticité :**

La limite de plasticité c'est la teneur en eau à partir de laquelle un sol cesse d'être malléable. On la considère comme la teneur en eau à laquelle un échantillon d'un sol roulé en cylindre d'un certain diamètre commence à se fragmenter

Pour faire la limite de plasticité nous formants une boulette à partir une patte préparer, et la rouler sur une plaque lisse à la main formants des rouleaux de façon que leur longueur dépasse 10cm et un diamètre atteint 3mm (figure III.10), Une fois les fissures prouvées, on prélève la partie centrale du rouleau et la placer dans une tare de masse connue, la peser et l'introduire dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau.

- **L'indice de plasticité :**

Atterberge (1911), dit que l'indice de plasticité est la série des teneurs en eau, à l'intérieur de laquelle le sol se connaissait comme un matériau plastique. L'indice de plasticité (IP) est donc égal à la différence entre les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité.

$$\mathbf{I_P = W_L - W_P}$$

- **l'indice de consistance**

L'indice de consistance d'un sol a été défini par Terzaghi et Peck en 1948, se indice permettent de situer une argile à l'intérieur et même à l'extérieur de son domaine de plasticité. Une argile dure à un indice de consistance élevé càd >1 .

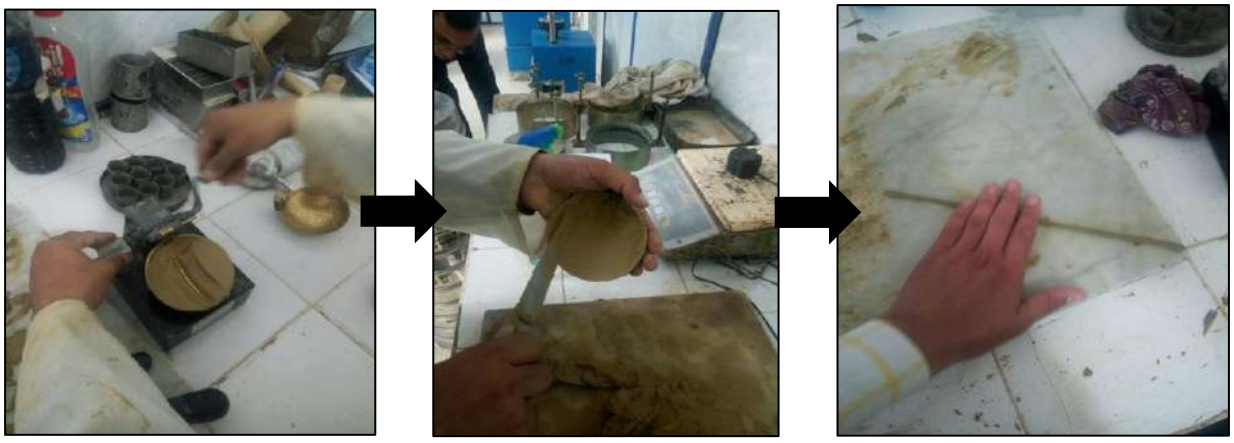


Figure III.10 : Détermination de la limite de liquidité, limite de plasticité.

Le tableau III.4.ci-dessous résume les limites trouvées pour notre matériau d'étude.

Tableau III.4: Résultat des limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	Indice de consistance
Resultants (%)	63,80	36	27,80	1,28

D'après L'abaque de CASAGRANDE (figure III.11)et les résultats des limites d'Atterberg , on en déduit que le sol étudié est une **argile très plastique.**

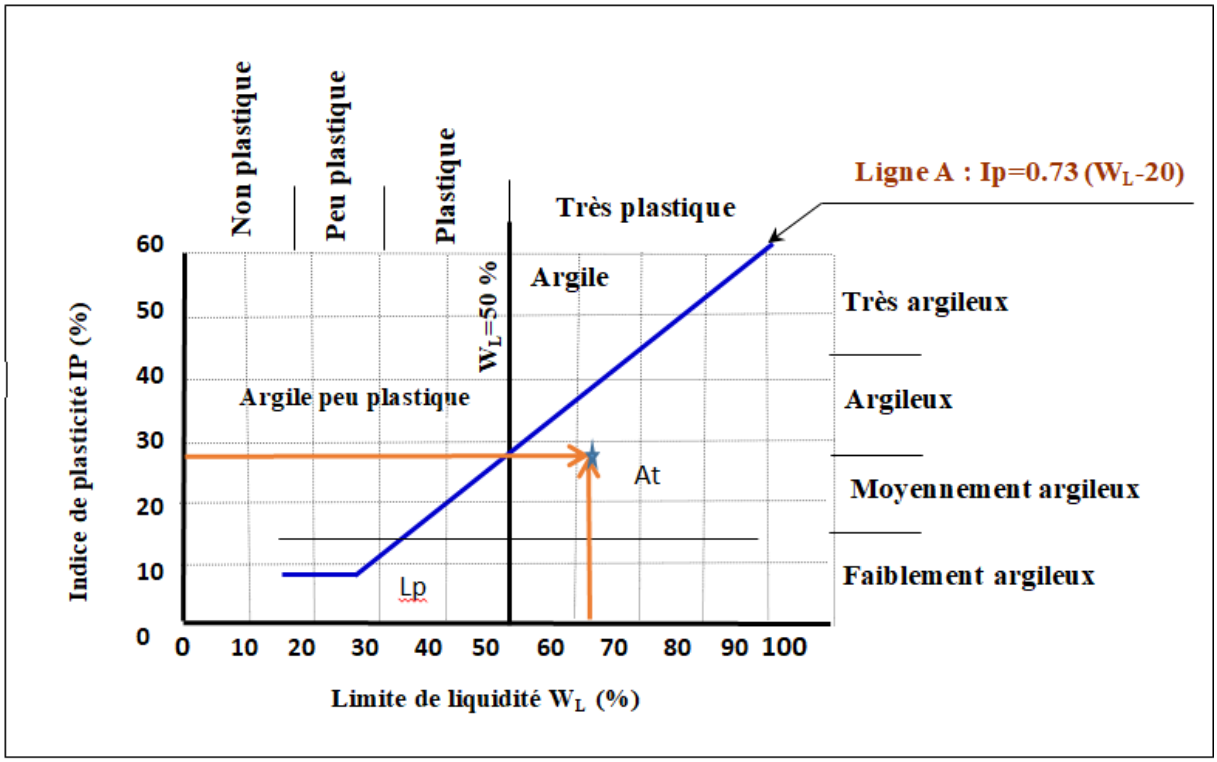


Figure III.11 : Classification des sols selon CASAGRANDE

III.2.1.5.Caractéristique mécanique :

a- Essai de Proctor normale (NF P 94-093) :

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée.

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle (figure III.12).

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau.

Pour chacune des valeurs de teneur 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.



Figure III.12 : Réalisation de l'essai Proctor normale.

Le résultat obtenu de l'essai Proctor du matériau argileux est donné sur la figure III.13.

D'après la courbe on remarque que l'argile étudié présente une densité séché maximale de 1,63 t/m³, et la teneur en eau optimale égale à 22,5 %.

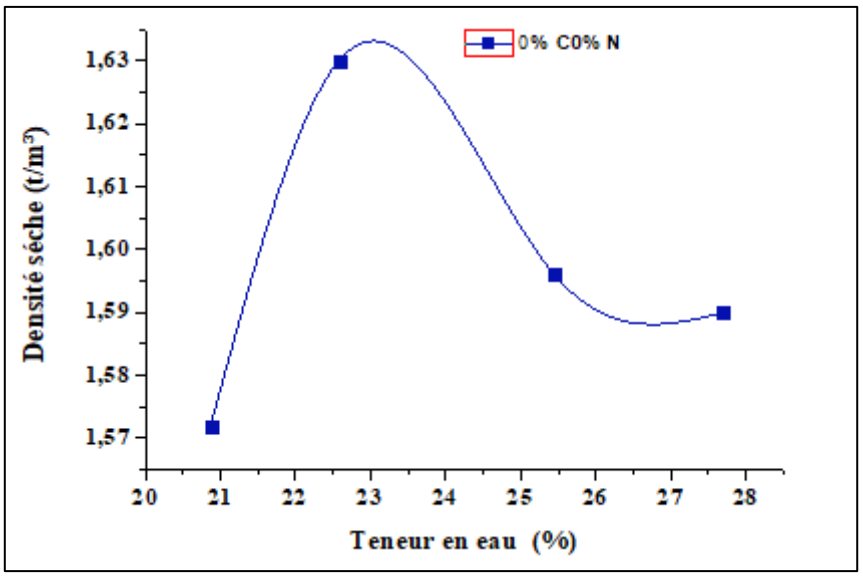


Figure III.13 : Courbe Proctor normal.

b- Essai de cisaillement rectiligne à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1) :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boite de cisaillement constitue de deux demi-bottes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-boites constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de même dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisaillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents, la figure ci-dessous montre la procédure d'essai.

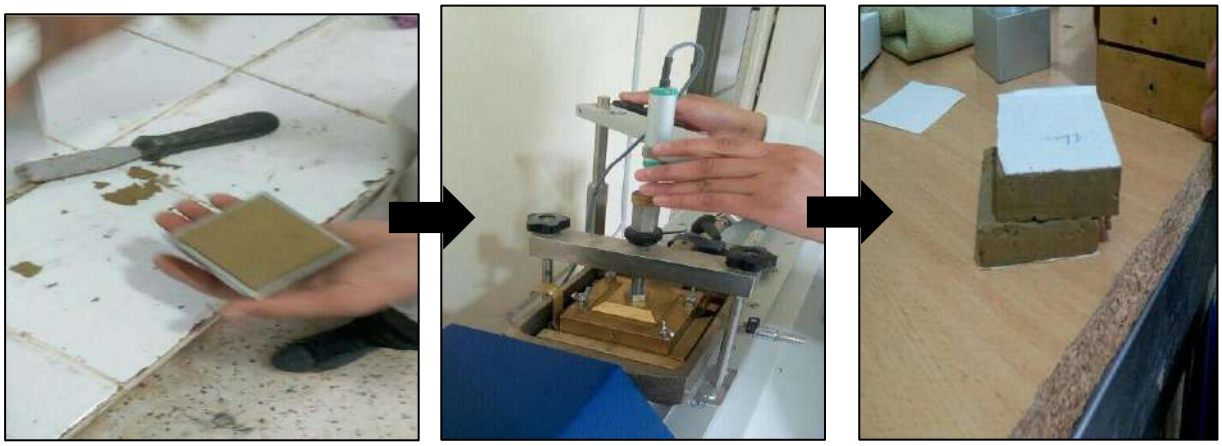


Figure III.14 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite.

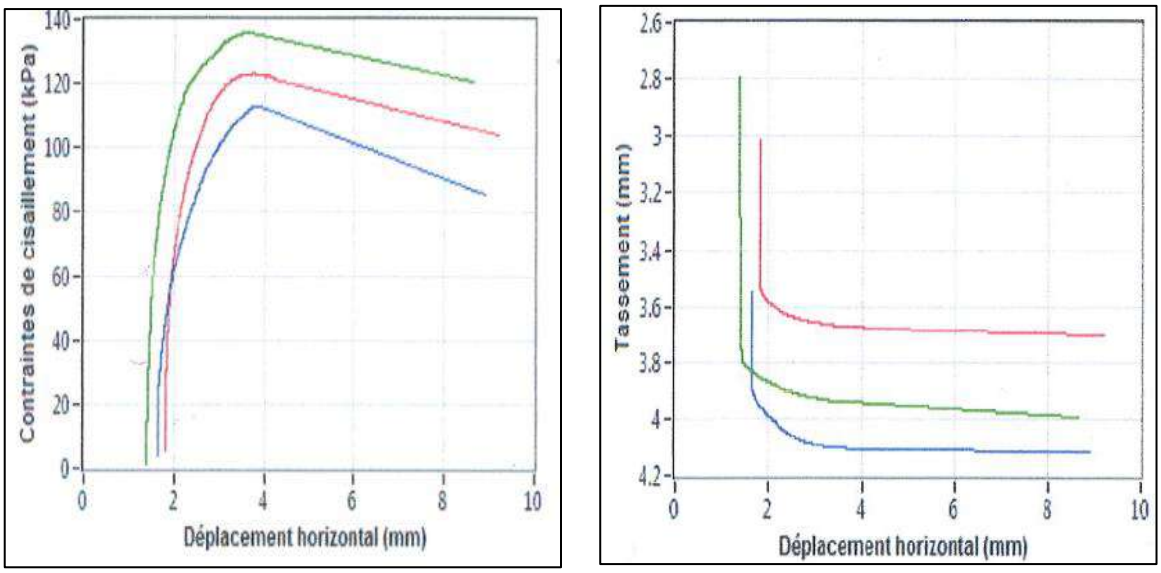


Figure III.15 : contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal(à gauche); Tassement en fonction de déplacement horizontale (à droite)

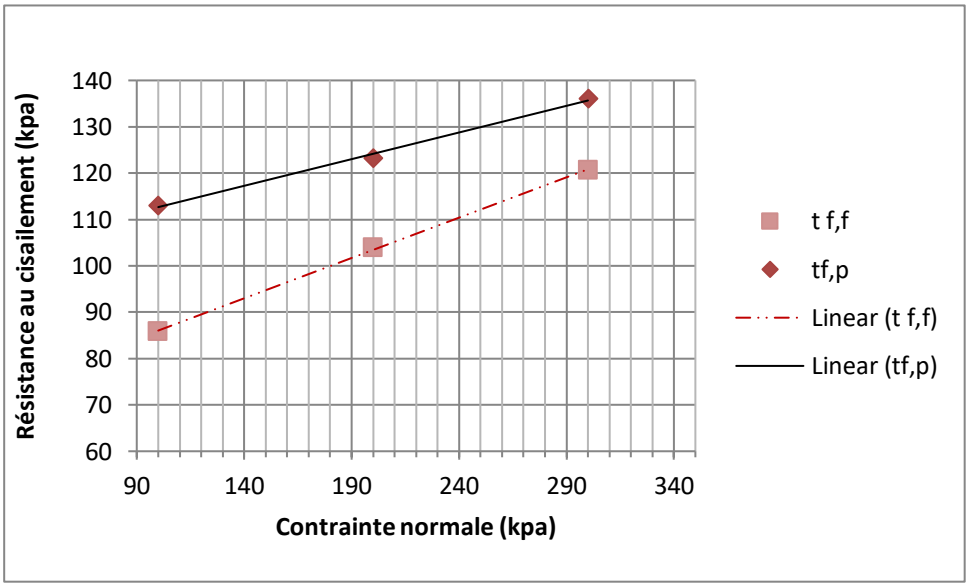


Figure III.16: la courbe contrainte normale en fonction de contrainte au cisaillement

Tableau III.5: Résultat de l'essai de cisaillement.

Paramètres	Angle de frottement (°)	Cohésion(Kpa)
Resultants	9,84	101,1

III.2.2. Chaux :

La chaux utilisée dans notre travail est une chaux vive (figure III.17) produit par la société BMSD-SARL situé dans la ville de Hessasna wilaya de Saida (sud-ouest du territoire nationale), leur propriété physico-chimique à été présenté dans le tableau au-dessous (Harrichane et al. 2011a).

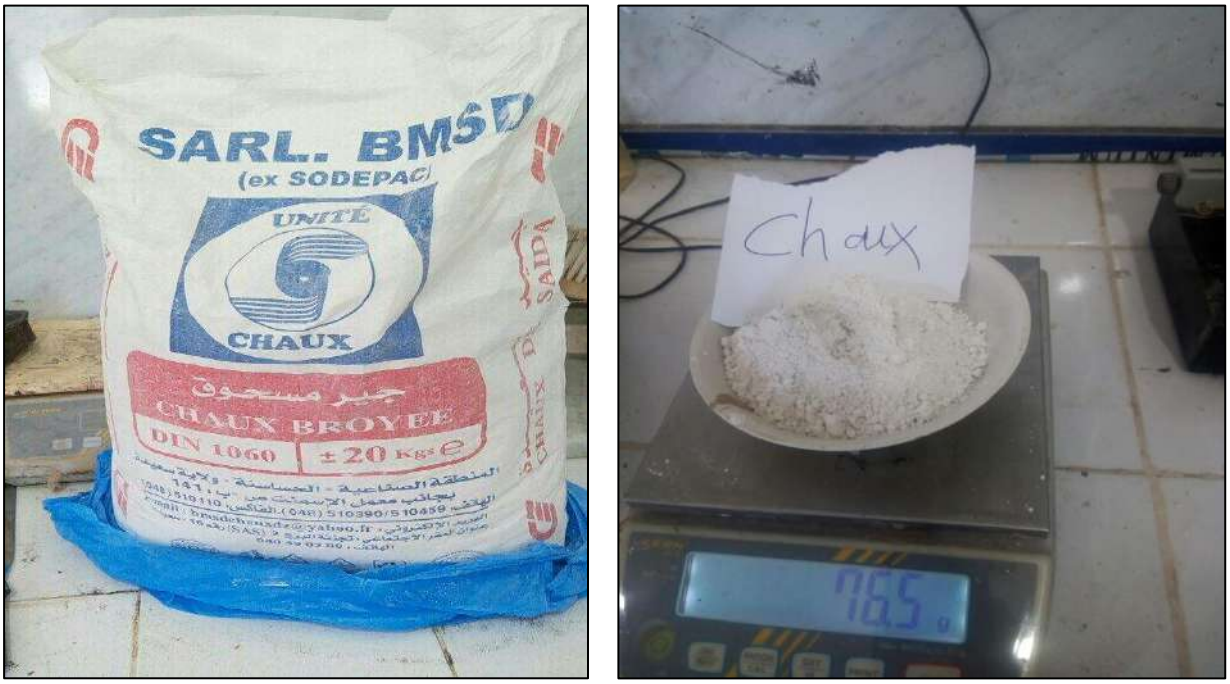


Figure III.17 : Chaux vive de wilaya de Saida.

Tableau III.6 : Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés (d'après Harichane et al 2011)

Nom chimique	Chaux (%)
CAO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe_2O_3	< 2
Al_2O_3	< 1.5
Si O_2	< 2.5
SO_2	< 0.5
Na_2O	0.4 - 0.5
K_2O	-
CO_2	< 5
TiO_2	-
$P2O_3$	-
$CaCO_3$	< 10

Apparence physique	Poudre blanche
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600 – 900

III.2.3. Chlore sodium :

Le chlore sodium (NaCl),a été utilisé dans cette étude (figureIII.18), alors que les quantités exprimées de ce produit ont été mélangées à sec avec le sol sélectionné sous forme d'une poudre fine. Les propriétés physico-chimiques de ce élément chimique sont représentées dans le tableau III.6.



Figure III.18: Chlorure utilisé dans ce travail.

Tableau III.7 : Caractéristique physico-chimique de chlorure de soduim utilisé.

Propriété physico-chimique	**Chlore sodium**
Dosage argentométrique	Min- 99,5%
Identité	test Passe
Apparences de solution	test Passe
Insoluble dans l'eau	Max- 0,005%
Ph (5%,H_2O)	5-8
Bromudes (br)	Max- 0,005%
Chlorates et nitrates	Max- 0,003%
Hexacyanoferrate (II)	Max- 0,0001%
Iodures	Max- 0,001%
Sulfates	Max-0,001%
Phosphates	Max- 0,0005%
Arsenic	Max , 0,00004%
Barium (Ba)	Max , 0.001%
Magnésium (Mg)	Max , 0,001%
Calcium (Ca)	Max , 0,002%

III.3. Conclusion

A la lumière des résultats de caractérisation des matériaux obtenus pour les différentes analyses réalisées, le sol étudié est un sol argileux de plasticité élevée.

Son emploi comme sol support e risque de poser des problèmes délicats au moment de la mise en œuvre mais surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage. C'est la raison pour laquelle nous allons essayer d'améliorer ses caractéristiques en lui incorporant de la chaux vive .

Par la suite un autre programme expérimentale sur l'argile de Médéa pour voir l'effet de chlorure sodium sur le comportement physico-mécanique d'un argile traitée à la chaux .

Les résultats de différents essais réalisés serrant présenté, interprété et commenter dans le chapitre suivants à connaissance ; les limites d'Atterberge, Proctor normal et la résistance au cisaillement direct no consolidé no drainé (UU).

CHAPITRE IV

Effet de la combinaison de la chaux et du chlorure de sodium sur les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux

Chapitre IV : Effet de la combinaison de la chaux et du chlorure de sodium sur les caractéristiques géotechniques d'un sol argileux

IV.1. Introduction :

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent montre que l'argile étudié présente un indice de plasticité important (27,80%), son utilisation en technique routière, aéroportuaire ou ferroviaire en tant que sol support ou en tant que matériau de remblai est délicate voire impossible sans protections particulières.

Plusieurs études ont étudié l'influence de l'ajout de chaux sur caractéristique mécanique et physique, ces études confirment le rôle positif qu'a la chaux sur l'amélioration de comportement des sols expansifs. Néanmoins, la présence des éléments perturbateurs (les sulfates, les nitrates, les chlorures, les phosphates, la matière organique…etc.) responsables de l'échec ou la réussite d'un traitement.

Ce chapitre présent un programme expérimenta l'été effectué pour mieux comprendre l'influence de la chaux sur le traitement d'un sol argileux d'un cote et voire l'effet de chlore sodium sur la réussite d'un traitement d'un autre cote.

IV.2. Préparation du mélange :

En premier lieu le matériau doit être séché à l'étuve à105ºC pendant 24 heures, ensuite broyé, et tamisé.

La deuxième étape consiste à ajouter des quantités de la chaux, chlore sodium au sol selon le pourcentage voulu, le mélange est ensuite mis dans un bac pour effectuer le malaxage manuellement.

Ensuite on ajoute la quantité d'eau nécessaire au mélange graduellement.

Le mélange obtenu est conservé dans des sacs en plastique hermétiques et bien fermé pour permettre une bonne diffusion de l'eau dans tout le matériau

IV.3. Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du pH-mètre :

Des quantités de sol de passant au tamis 4mm a été utilisée avec des taux de chaux différents de (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%), placées ensuite dans des flacons avec une quantité d'eau distillée. Les pH des solutions sont déterminés à l'aide d'un pH mètre standard préalablement étalonné.

Selon la méthode originale, le pourcentage de demande en chaux (est arrêté par le taux de chaux du mélange correspondant à un pH de 12-13.

La courbe des pH en fonction des pourcentages de chaux est présentée sur la figure IV.1.On constante sur cette courbe que le pH de la solution augmente, donc l'alcalinité du milieu augmente avec le taux de chaux ajouté et cela jusqu'à une teneur de 4% à partir de laquelle il se stabilise à la valeur du pH de la solution de chaux. Ce taux est appelé la demande en chaux du sol.

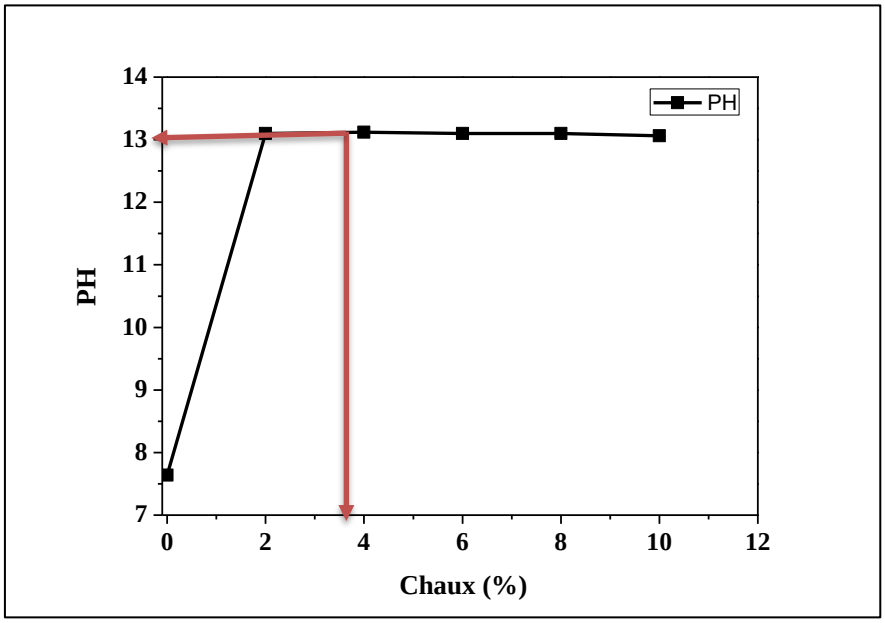


Figure IV.1 : Variation du pH de l'argile étudié en fonction du taux de chaux.

IV.4. Déroulement des essais :

Des essais au laboratoire concernant limite d'Atterberg et le Proctor normale, résistance au cisaillement ont été effectués sur l'argile étudié. Plusieurs combinaisons chlorure de sodium et la chaux ont été utilisées pour la stabilisation l'argile. Les teneurs chlorure de sodium sont de 0, 2%, 4% et tandis que celle de la chaux est 4% Un total de 6 combinaisons ont été étudiées (tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec la chaux à la présence ou sans chlorure de sodium.

Nomination	S (%)	L (%)	N (%)
S	100	0	0
L4N0	96	4	0
L4N2	94	4	2
L4N4	92	4	4
L0N2	98	0	2
L0N4	96	0	4

IV.5. Résulta et discussion :

IV.5.1.Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur les limites d'Atterberg :

Les figures ci-dessous présente les résultats de l'effet des mélanges de chlorure sodium(NaCl) avec une pourcentage de 2%,4% et un pourcentage de 4% chaux vive sur la limite de liquidité, limite de plasticité, l'indice de plasticité et l'indice de consistance.

a- Effet du chlorure de sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la limite de liquidité :

L'influence de la chaux sur la limite de liquidité W_L est présentée sur la figure IV.2. D'après les résultats obtenus, on remarque que l'adition de la chaux à un pourcentage de 4% au sols argileux fait une augmentation de la limite de liquidité .Pour un ajout de 4% de chaux au sol argileux l'augmentation de limite de liquidité est d'environ 23%.

Cette augmentation de la limite de liquidité est due à l'hydratation de la chaux vive et leur réaction avec les minéraux argileux.

les résultas obtenue sont en bon accord avec les résultats rapportés par des chercheurs on peut citée (Ousla, 1991 ; Afés et Didier., 1999).

L'ajout de chlorure sodium au matériau argileux permet de réduire la limite de liquidité, on passe d'une limite de liquidité 63,8 à 0% de chlorure sodium à environ 56%

Pour Un pourcentage en de chlorure sodium 4%. Cette évolution causel'échange de cation entrechlorure sodium et les minéraux argileux. un comportement similaire a été observer par différents chercheur [Aboud et al. (2007) ;Hassnen,(2013);Srikanth et Harnadh (2013) ; George et al.(2014),(2015) ; Ramya et al. (2018)] .

L'ajout de 2% chlore sodium avec 4% chaux réduit la limite de liquidité 63% à 59%, par contre l'ajout de 4% chlorure sodium avec 4% chaux entraine une augmentation de limite de liquidité jusqu'à 68%, on conclut que chlorure sodium c'est élément retardeur lorsque on combinée avec la chaux.

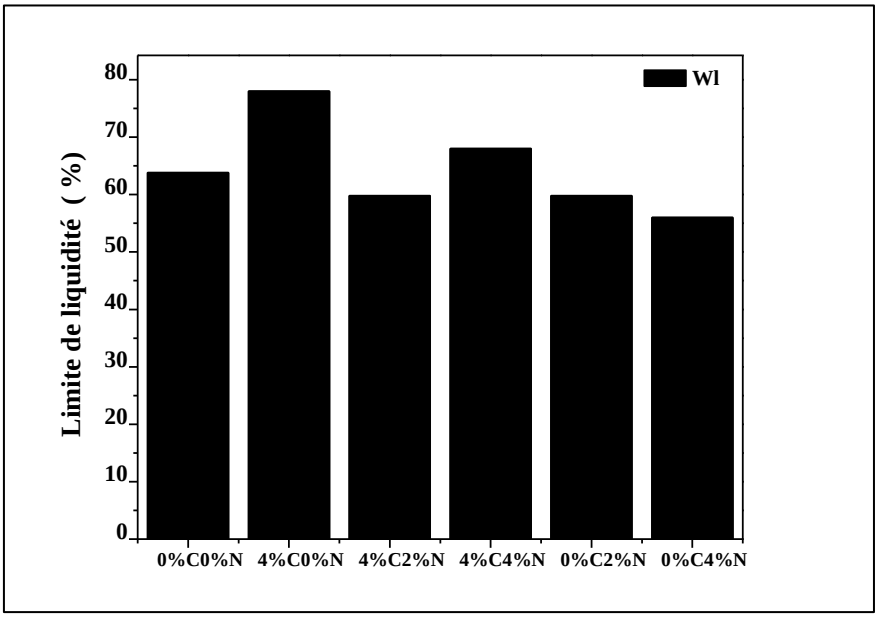


Figure IV.2: Effet de chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la limite de liquidité.

b-Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la limite de plasticité :

D'après les résultas obtenu dans la figure IV.3, on remarque que l'ajout de 4% de chaux au matériau argileux produit une augmentation d'environ58% de la limite de plasticité initiale L'augmentation de la limite de plasticité et due à la floculation des particules de sols.
Les mêmes tendances ont été observées par par différent chercheur telque [Afés et Didier (1999);Saker et al. (2007) et Goswai et al. (2005)].

On peut remarquer après l'ajout de chlore sodium (NaCl) seulement à notre sol argileux, une réduction de la limite de plasticité a une valeur de 30%, (voir la figure IV.3).Cette réduction et due à l'échange des cations et l'adsorption de chlorure sodium, la concentration des ions réduit la force de répulsion et augmente la contrainte effective qui conduisant à la floculation des particules des argiles.
Ce résultat est conforme à ceux trouvés par[Aboud et al. (2007); Hassnen, (2013); Srikanth et Harnadh (2013); George et al. (2014), (2015); Habiba, (2017);Ramya et al. (2018)]) qui ont

montré une augmentation de la limite de plasticité avec augmentation du dosage en chlorure sodium ajouté.

L'ajout de 2% de chlorure sodium à 4% chaux n'est aucune influence sur la limite de plasticité, mais lorsqu'en ajoute 4% chlorure sodium à 4%chaux,on remarque une légère augmentation de la limite de plasticité, d'environ 40%, à cause de l'effet de la réaction chimique entre chaux-chlorure sodium.

On peut conclu que l'ajout d'une quantité importante de chlorure de sodium avec la chaux entraînerait une réduction de plasticité.

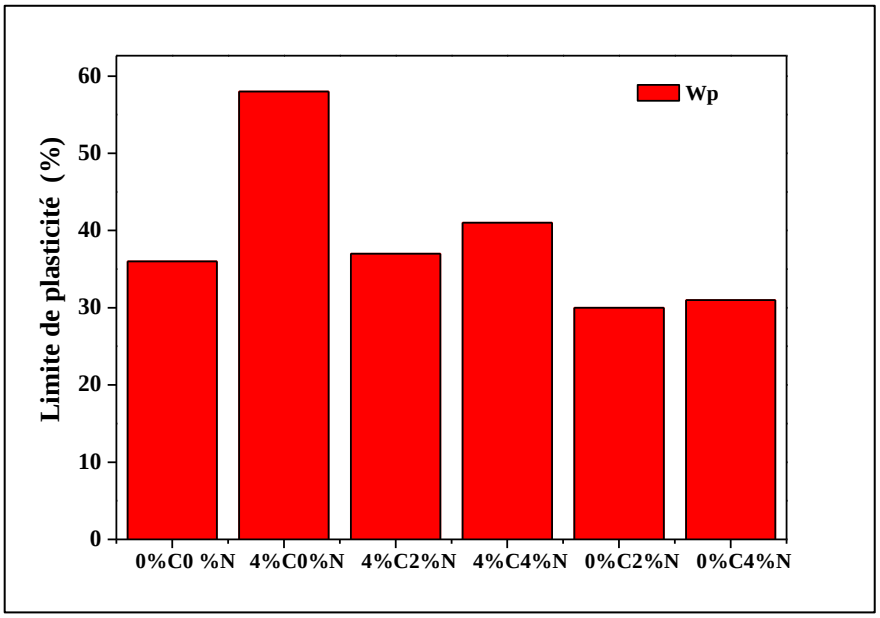


Figure IV.3: Effet de chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux sur la limite de plasticité.

c- Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur l'indice de plasticité :

L'effet de la chaux et chlorure sodium et leur combinaison sur le changement de l'indice de plasticité sont reportés sur la figure IV.4.

Pour un ajout de 4% de chaux au sol argileux la diminution de l'indice de plasticité est d'environ 20%.Cette diminution due à la floculation des particules d'argile qui indique une amélioration de la maniabilité du sol et rendre le sol moins plastique et c'est ce qu'on a remarqué lors du mélange en laboratoire.

Ce résultat similaire a été obtenu par différents chercheurs [Ansary et al., (2006) ; Nalbantoglu, (2006) ; Harichane et al ., (2011)].

L'ajout de 2% et 4% chlorure sodium permet de réduire l'indice de plasticité de 27,80% à 25%respectivement, L'intervention du chlorure de sodium entraînerait une modification de la capacité d'échange d'ions due à l'absorption. La concentration en ions réduit les forces de répulsion et augmente la contrainte effective menant à la floculation des particules d'argile, ce qui réduit la plasticité.

Ces observations sont en bon accord avec les résultats rapportés par [Aboud et al. (2007) ;Hassnen,(2013);Srikanth (2013) ; George et al.(2014),(2015); Habiba (2017); Ramya et al. (2018)].

On peut remarquer après l'ajout 2% chlorure sodium avec 4% chaux à notre sol argileux, une réduction de l'indice de plasticité d'environ 22,80%. On peut remarquer aussi que l'ajout de 4% chlorure sodium avec 4% chaux permet de réduire l'indice de plasticité de l'order27%.
Donc on conclut que l'effet de chlorure sodium et toujours retarder la réaction chimique avec la chaux.

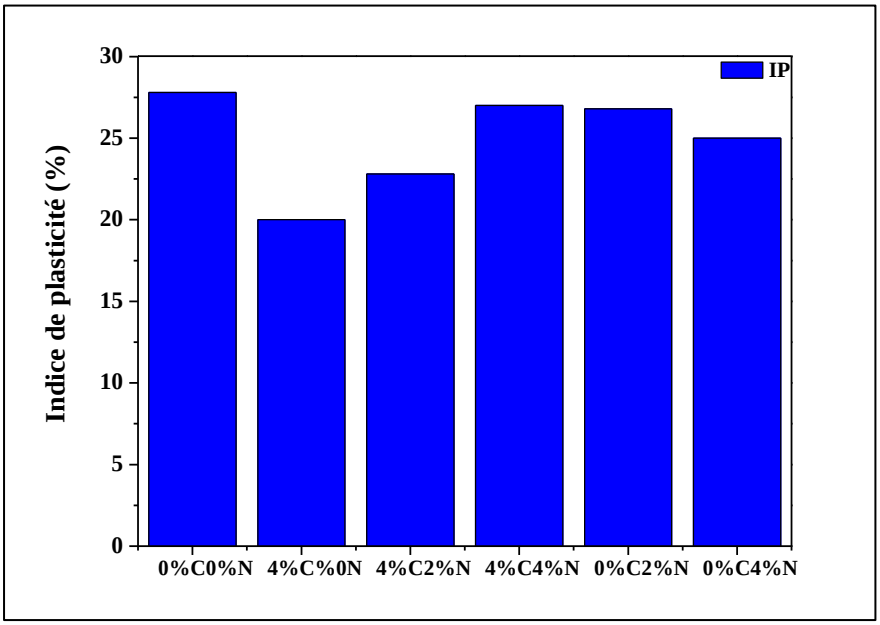


Figure IV.4: Effet de NaCl et leur combinaison avec la chaux sur l'indice de plasticité.

D - Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur l'indice de consistance :

L'évolution de l'indice consistance en fonction de l'ajout de chlore sodium et la chaux est représentée dans la figure IV.5.On constate que l'ajout de la chaux au materiau argileux augment l'indice de consistance, on passe d'un indice de consistance 1,28% à 0% de chaux à environ 2,5%, pour un pourcentage en chaux de 4%. L'ajout de chaux influence directement la consistance du matériau argileux et améliore ses propretés physiques.

On remaque aussi une réduction de l'indice de consistance aprés l'ajout de 2% , 4% chlore sodium à notre matériau, cette réduction a été de l'ordre de 8 %, 13% respectivement.
Quand on combinée 4% chaux avec 2% et 4% chlore sodium on constate une légére augmentation de l'indice de consistance.

On conclu que l'effet de la chaux et chlore sodium et leur combinaison sur la consistance de sol est augment la solidité de sol traité.

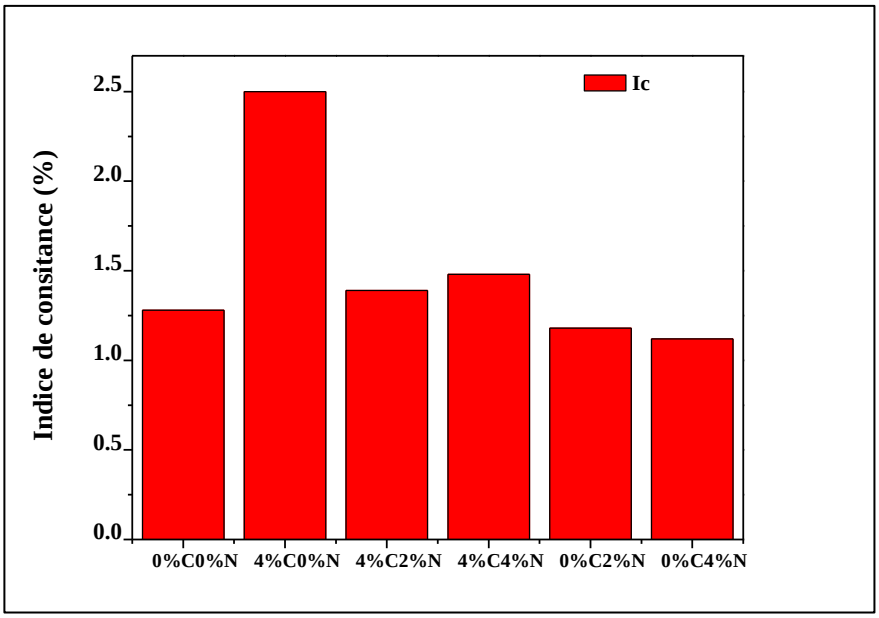


Figure IV.5: Effet de chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur l'indice de consistance.

La figure IV.6montre que la classification de notre matériau étudié a été changée selon l'ajout

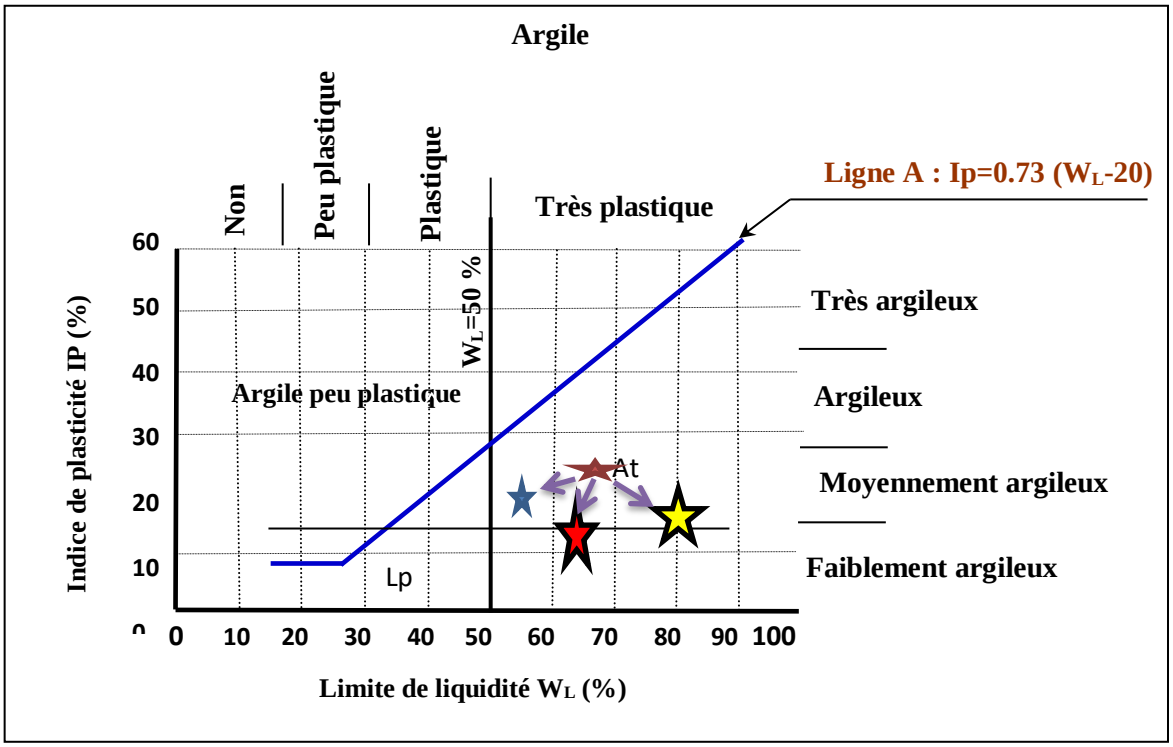


Figure IV.6 : Clasification de sol etdudié.

IV.5.2.Effet du chlorure sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur les paramètres de Proctor Normale :

Les résultats de l'essai Proctor en fonction de l'ajout de chaux et leur combinaison avec chlore sodium sont inscrits au tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Caractéristiques de Proctor lors de traitement.

Désignation	**Caractéristiques de compactage**	
	Teneur en eau optimale ω_{opt}(%)	**Poids volumique sec maximal γd_{max}(kN/m3)**
0C0N	22,58	1,63
4C0N	24,76	1,47
4C2N	24,90	1,46
4C4N	25	1,60
0C2N	23,27	1,66
0C4N	23,48	1,67

Toutes les courbes Proctor normale sont regroupées dans la figure IV.7

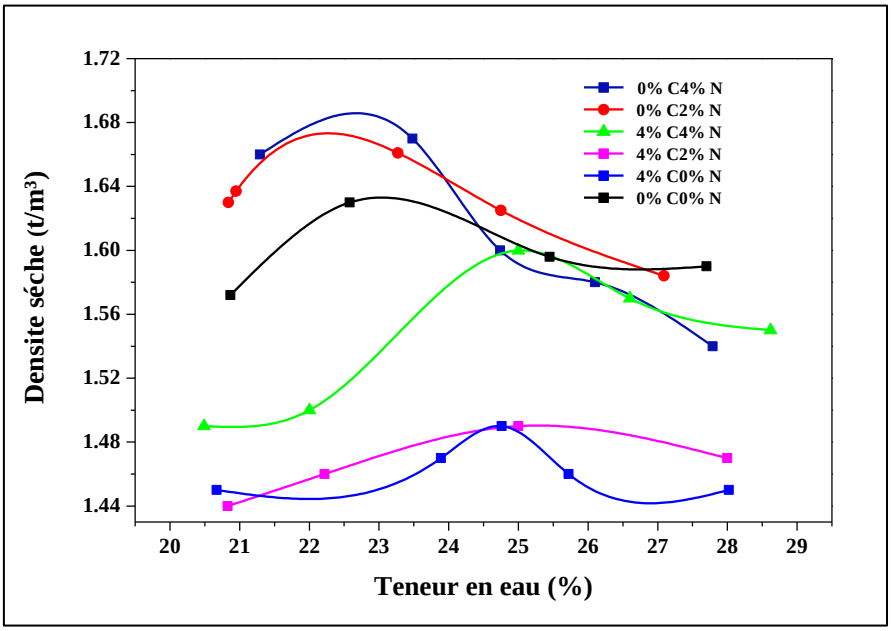


Figure IV.7 :Effet de chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur les paramétre de proctor Normale.

A la lumière des résultats des courbes Proctor normale, on observe que l'ajout de chaux produire une diminution la densité sèche avec l'augmentation du dosage en chaux. Cette action s'explique par la dissociation des $Ca(OH)_2$ de la chaux . Il va se produire des ions Ca^{+2} nécessaires pour les réactions d'échange cationique. Ce résultat est conforme à ceux trouvés par différents chercheurs [Bell, 1996; Gay et al. (2000); Sivapullaiah et al. (2003;) Hossain et al. (2007); Manasseh et al. (2008);Harichane et al ., 2011a].

Après l'ajout de chlorure sodium à notre matériau, la densité sèche maximale augmente et la teneur en eau optimale aussi augmente, un comportement similaire a été observer par différant chercheurs [;Aboud et al. (2007) ;Narasimha et al. (2012) ;Hassnen,(2013); George et al. (2014),(2015); Habiba (2017) ; Ramya et al. (2018)]

a- Effet de chlore sodium(NaCl)et la chaux leur combinaison sur la teneur en eau optimale :

A la lumière des résultats obtenus sur la figure IV.8**,** on constate que l'ajout de 4% de chaux produire une augmentation la teneur en eau optimale,l'explication de ce comportement est une conséquence de réaction de la chaux avec le sol qui poséde l'échange cationique est une changement observée de la granulométrie est par suite les réaction pouzolanique.

Pour un ajout de 4% de chaux l'accroissance de la teneur en eau optimale est d'environ 10%.

On constate aussi une réduction de la taneur en eau optimale dans les mélanges (argile -chlore sodium), cette réducttion à cause de la présence de concentration des cations qui provoque la diminution de la teneur en eau optimale.

Un légère augmentation obtenus la teneur en eau optimale dans les mélanges (argile –4% chaux –(2% , 4%) chlorure sodium).

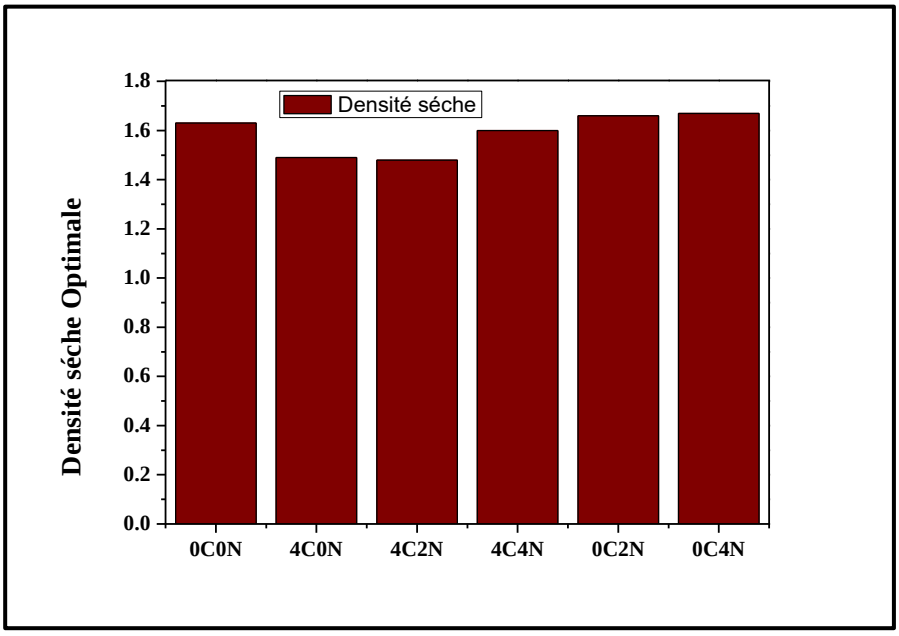


Figure IV.8 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la teneur en eau optimale .

b- Effet duchlore sodium(NaCl) et leur combinaison avec la chaux vive sur la densité séche maximale :

D'après les résultats dans la figure IV.9, on remarque une diminution la densité sèche avec l'ajout de 4% de chaux, cette réduction a été d'environ 9%.

La diminution de la densité sèche d'un sol par l'ajout de la chaux provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes.

L'ajout de 2% et 4% chlore sodium à notre materiau augmente la densité séche maximale comme montre la figure au dessous.

on passe d'une densité sèche maximale 1.63 t/m³ à 0% chlore sodium à environ 1,66t/m³, 1,67t/m³ pour un pourcentage en chlore sodium de 2%,4% respectivement.

d'apres la figure au dessous , on remaque une accroissnace de la densité séche maximale dans les mélanges (argile -4% chaux ,2-4 %) chlore sodium.

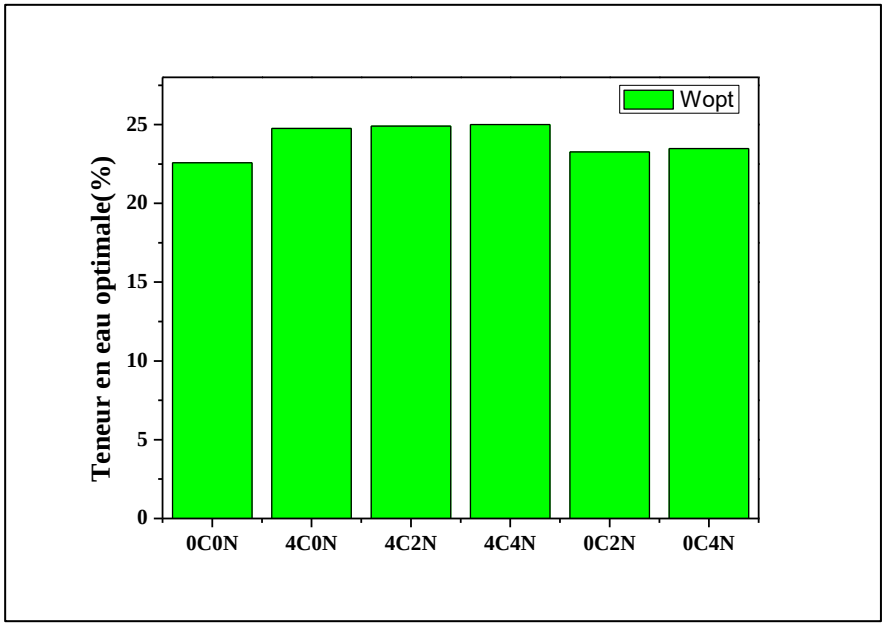


Figure IV.9 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur la densité séche maximale.

IV.5.3.Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la résistance au cisaillement la boite :

a- Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux vive sur la cohésion :

la figure ci-dessous montre la variation de la cohésion en fonction de dossage de la chaux et le chlore sodium avec leur combinaisson

L'ajout de la chaux au matériau argileux a amené une modification de la cohésion comme la montre le figure au-dessous.

On passe d'une cohésion101,1 KPA à 0% de chaux à environ 171,2 pour un pourcentage en chaux de 4%. Cette évolution cause une augmentation du PH du sol argileux qui favorise la dissolution de la silice et de l'alumine. Ces derniers interagissent avec le calcium pour former des produits cimentaires. Les mêmes tendances ont été observées par différant chercheur [Gay et al. (2000) ; Harichane et al. (2011)].

L'addition de chlorure sodium

au sol argileux entraine une réduction de la cohésion, On passe d'une cohésion 101,1 KPA à 0% de chlorure sodium à environ 86,02 KPA,87 KPA, pour un pourcentage en de chlore sodium de 2%,4% respectivement.

Mais l'ajout de chaux avec 2% de chlore sodium la cohésion est presque égale à celui de témoin, par contre l'addition de la chaux avec 4% de NaCl augment la cohésion, donc on conclut que l'effet du chlore sodium augment la cohésion à pourcentage 4% à cause de la réaction chimique entre la chaux et le chlore sodium.

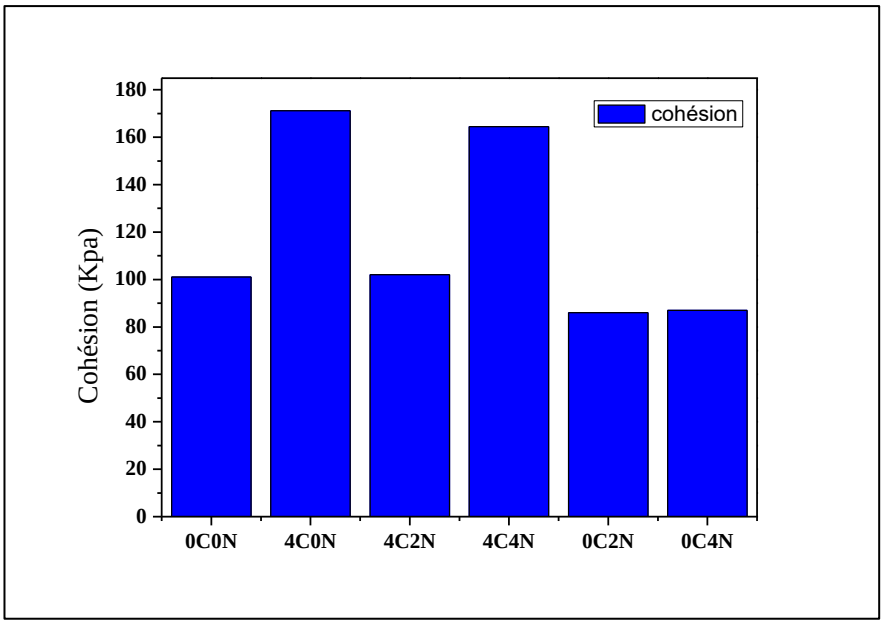


Figure IV.10 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur sur la cohésion.

b- L'effet de NaCl et leur combinaison avec la chaux vive sur l'angle de frottement interne :

Evolution de l'angle de frottement en fonction des dosages en chaux et chlore sodium sont présenté sur la figure IV.11.

On peut remarquer après l'ajout de chaux à notre sol argileux, une augmentation de l'angle de frottement comme montre la figure au-dessous.

Pour un ajout de 4% de chaux au sol argileux l'augmentation de l'angle de frottement est d'environ 8°.Ceci peut se justifier par l'augmentation du frottement entre les particules suite l'agglomération des particules argileuses et aux échanges cationiques entre le sol et la chaux (effet immédiat). Ces observations sont en bon accord avec les résultats rapportés par différents chercheur [Gay et Schad.(2000) ;Harichane et al . (2011)].

D'après la figure IV.11. , on constate une augmentation l'angle de frottement après l'ajout de chlorure sodium. En effet, on passe d'un angle de frottement de 8° à 0% de chlore sodium à environ 12°pour un pourcentage en chlorure sodium de 4%.

La même tendance a été observé dans les mélanges (4% chaux- 2-4% chlorure sodium) par l'augmentation de l'angle de frottement.

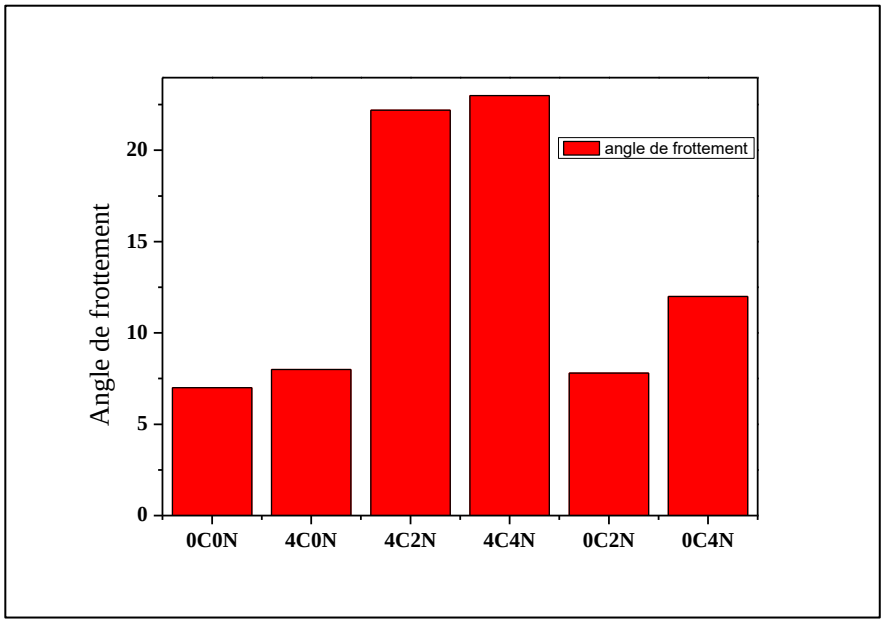


Figure IV.11 : Effet du chlore sodium et leur combinaison avec la chaux sur sur l'angle de frottement interne.

IV.6.Conclusion

Plusieurs essais ont été effectués au laboratoire pour étudier l'effet de chlore sodium sur les Propriétés physico-mécaniques d'un sol argileux plastique. A partir des résultats obtenus Durant cette étude on sorte par les conclusions suivantes :

- L'étude montre que le dosage 4% c'est dosage optimale de notre matériau étudié
- L'ajout de chaux au sol argileux entraine une réduction de plasticité la diminution de l'indice de plasticité de 27,80% à 20% pour ajout de 4% de chaux.
- L'addition de chlorure sodium au sol argileux produit une diminution significative de l'indice de plasticité.

- Les mélanges (argile –chaux -chlorure sodium) entrainent aussi une réduction de plasticité.
- Une diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimales a été obtenus après l'ajout de 4% de chaux.
- Une accroissance la densité sèche maximale et la teneur en eau après l'ajout de chlorure sodium.
- Dans le cas de combinaison chaux- chlorure sodium la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale augmente.
- Une augmentation considérable dans les paramètres de cisaillement de l'échantillon traité à la chaux est observée.
- L'ajout de chlorure sodium au sol argileux diminué la résistance au cisaillement.
- Dans le cas de combinaison chaux- chlorure sodium les paramètres résistance au cisaillement sont augmente.

Conclusion générale

Conclusion générale :

La majorité des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur caractéristique géotechnique et d'améliorer leur performance. En plus, l'évolution actuelle du contexte socioéconomique dans le domaine génie civil en générale et les ouvrages géotechnique en particulier est marquée par la nécessité de réutiliser au maximum les matériaux situés dans l'emprise des projets, même ceux dont les caractéristiques de mise en œuvre, notamment mécaniques, sont très faibles. Bien que plusieurs chercheurs aient démontrés qu'il est possible de traiter efficacement les mauvais sols avec de la chaux, du ciment et/ou combinés aux différents ajouts minéraux.

En premier lieu, une méthodologie a été suivie pour la collecte, la sélection et la Caractérisation des mauvais sols fins et ceci pour une éventuelle amélioration par addition d'ajouts cimentaires (chaux vive).

En second lieu, un protocole expérimental a été établi et basé sur des normes internationales pour effectuer des essais géotechniques au laboratoire. Parmi ces essais on cite les limites d'Atterberge, le compactage (Proctor normale), et le cisaillement à la boite.

A partir des résultats obtenus durant cette étude on peut conclure que quand la chaux sont ajoutées au sol un changement remarquable dans le comportement de plasticité a été observé (une réduction considérable de l'indice de plasticité). Autre part, la chaux fait diminuer la densité sèche maximale et fait augmenter la teneur en eau optimale.

Les échantillons traités avec la chaux présentent souvent une amélioration rapide et importante des propriétés mécanique (cisaillement). .

L'addition de chlorure sodium au sol argileux produit une diminution significative de l'indice de plasticité.

Les mélanges (argile –chaux - chlorure sodium) entrainent aussi une réduction de plasticité.

Un changement significatif des paramètres de Proctor normale lors l'addition de la chaux ou bien combiner avec le chlorure sodium.

Références bibliographiques

Références bibliographique :

Afes, M. & Didier.(1999). Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). Bull Eng Geol Env, vol. 59, pp 75–83.

Ali bouafia, Mouna Mir.(2010).Introduction à la mécanique de sol. ISBN :978-9947-850-71-8.

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J.F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in Lime-treated expansive soil at 20 °C. Applied Clay Science.

Aissiou, F Z. (2010) ,Étude du phénomène de gonflement d'un sol argileux, Thèse de magister, USTHB.

Amer Ali Al-Rawas. (2006).Expansive Soils Recent advances in characterization and treatment, College of Engineering, Sultan QaboosUniversity Sultanate of Oman. ISBN : 3 978–0–415–39681–3.

Amroune Abderraouf .(2016) Caractérisation du fluage d'une argile expansive reconstituée à faible énergie de compactage, Mémoire master université Mohamed boudiaf-M'sila .

Ansary, M.A., Noor, M.A., Islam, M. (2006). Effect of fly ash stabilization on geotechnical properties of Chittagong coastal soil. Paper presented at the geotechnical symposium on soil stress-strain behavior, Roma, Italy, pp. 443-454.

B. D. MARKS .(1967) Sodium chloride and sodium chloride-lime treatment of cohesive okμahoma. Soils Mémoire master université Stillwater, Oklahoma

Bengraa, L., Hachichi, A., Bourokba, A., et Benaissa, A. (2005) Etude de la Stabilisation des Argiles par Ajout de Sable de Carière‖, 2ème Journées d'Études sur les Sols Gonflants

Ben messoud Ahmed,(2017).Types de solutions de construction sur sols gonflants. Mémoire de Master.

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

Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, Vol. 42, pp. 223-237.

Boardman, D. I., Glendinning, S., et Rogers, C. D. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. Géotechnique, vol. 50, n°6, pp. , 533-543.

Bousbaa , K .(2015) «Etude de la pathologie des glissements de terrain à travers différents cas d'étude ».Mémoire master géotechnique ,Université de Blida.

Cabane, N. (2004). Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne.

Derrichen Z; Iguechtal. L ,(2018) Damage due to swelling soils in the region of In amenas: Algeria, , ISRM International Symposium, 19-24 November, Melbourne, Australia 2000.

Djaani.M , Ben Mansour.S .(2011).(Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment)), Mémoire de Master.

Draou.N,NEBAT.F.(2016).(stabilisation des sols fins).Mémoire de Master. Université Tlemcen

Eades, J. L., et Grim, R. E. (1960). Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. *Highway Research Board, Bulletin 262*, 51-63.

Errais , E .(2011),Réactivité de surface d'argile naturelles étude de l'adsorption de colorants anioniques , Thèse de doctorat, université de strasbourg.

Farooq, K., Virk, K.A, (2009).Improvement of engineering characteristics of expansive clays by sand mixing, Proceedings of the 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering , Alexandria,

Gaafer , M., Bassioni, H., Mostafa, T. (2015). Soil Improvement Techniques. International Journal of Scientific & Engineering Research. ISSN 2229-5518.

Gay, G., Schad, H. (2000). Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils. Otto-Graf Journal, Vol. 11, pp. 19-31.

George Rowland Otoko, Amah Inemeowaji Simon. (2015). Stabilization of a Deltaic Marine Clay (Chikoko) with Chloride Compounds. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 02 Issue: 03 . ISSN: 2395 -0056

G.Songlérat, J.Costet.(1981).,cour pratique de mécanique de sol.vol (276p).ISBN 2-04-015793-X.

GLEN, L (2001) «Étude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestière». Mémoire maitrisée génie de la construction école de technologie supérieure université du québec (canada).

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

Harichan,K et al.(2018). 14^{th} ASEC conference in Jordan 12-15 April 2018 Jordan University of Science & Technology.

Harichane, K. and Ghrici, M. (2009). Effect of combination of lime and natural pozzolana on the plasticity of soft clayey soils. 2nd International Conference of New Développements in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 30 May 2009, Near East University,Nicosia, North Cyprus.

Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011a). Effect of curing period on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana, International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 90–96.

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

Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Easa, S. (2007). Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea. Resources,Conservation and Recycling, Vol. 51, pp. 711-731.

Hassnen Mosa Jafer .(2013). Stabilization of Soft Soils Using Salts of Chloride, Journal of Babylo University/Engineering Sciences/ No.(5)/ Vol.(21): 2013

Habiba Afrin.(2017) . Stabilization of Clayey Soils Using Chloride Components. American Journal of Civil Engineering.Vol. 5, No. 6, 2017, pp. 365-370. doi: 10.11648/j.ajce.20170506.18

Khelifa harichane et al. (2017) ,effet du sable de dunes et de la chaux sur les proprietes geotechnique des sols argileux Algérie Equipment.

Kaoua , F., Derriche, Z., Laradi N., (1994).Contribution à l'étude de la stabilisation des sols gonflants par ajout de sable. Revue technique de l'Ecole national des travaux publics, Algérie Équipement 15, pp p. 12-15 .

Lauafi.B, Bahar,R , (2012). Sand an additive for stabilization of swiling clay soil, international journal of geosciences, 2012,3,719-725

Locat, J., Berube, M.A. and Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime

stabilization of sensitive clays: shear strength development. Canadian Geotechnical
Le Borgne, T. (2010). Effects of potential deleterious chemical compounds on soil stabilisation. Doctoral dissertation, Ph.D thesis, Nancy-Université, France.
M.H Davoudi , E Kabir .(2011) interaction of lime and sodium chloride in a low plasticity fine grain soils Journal of applied sciences 11 (2) : 330-335.
Mellal,F.,Lamri,B. (2009). Etude du comportment d'une Marne argileuse traitée à la chaux pour son réemploi dans la construction d'un remblai routier. Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 »
Miller, G.A., Azad, S. (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction and Building Materials, Vol. 14, pp. 89-97.
Manasseh, J., Olufemi, A.I. (2008). Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale shale. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 13, pp. 1-12.
Marrot, L. (2010). Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique
Mateo, M. (1964). Recherches sur la stabilisation des sols par la chaux en les cendres volantes. Publié dans les comptes-rendus du congrès, Madrid, Espagne. Journal.
Mtallib, M., et Bankole, G. (2011). The Improvement of the Index Properties and Compaction Characteristics of Lime Stabilized Tropical Lateritic Clays with Rice Husk Ash (RHA)Admixtures.
Nalbantuglo, Z. & Gucbilmez, E. (2002.)Utilization of an Industrial Waste in Calcareous Expansive Clay Stabilization. Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, pp. 78–84.
Nalbantoglu, Z. (2006). Lime stabilization of expansive clay. Expansive soils-recent advances in characterization and treatment. Taylor & Francis group, London, pp. 341–348.Volume 6, ISSN: 2348-9812
Narasimha Rao AV, Chittaranjan M. (2012) Effect of certain industrial effluents on compaction characteristics of an expansive soil–a comparative study. Inter J Eng Inv 1: 22-8.
NF P 18-560. Analyse chimique sommaire.
NF P 94-068. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu méthylène d'un sol.
NF P 94-056. Analyse granulométrique par tamissage.
NF P 94-057.Analyse granulométrique par sédimentométrie.
NF P 94-054. Essai de poids volumique des grains solides.
NF P 94-050. Essai de Teneur en eau.
NF P 94-051. Essai de Limite d'Atterberg.
NF P 94-09. Essai de Proctor normale.
NF P 94-071-1. Essai de cisaillement rectiligne à la boite de Casagrande.
Omar sadoui et al .(2012), Analyse d'un cas pathologique de silos de stockage sur sols compressible à bejaia. 1^{st}International Conference on Civil Engineering, 8-9 May 2012, Laghouat University, Algeria.
Osula, D.O.A. (1991). Lime modification of problem laterite. Engineering Geology, Vol. 30, pp. 141-154.
Osula, D.O.A. (1996). A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. Engineering Geology, Vol. 42, pp. 71-81.

Prasad, C.R.V., Sharma, R.K., (2014). Influence of sand and fly ash on clayey soil stabilization. Journal of Mechanical and Civil Engineering 4, 36–40.

Rao, S. M., et Shivananda, P. (2001). Swelling behaviour of lime-stabilized specimens after wetting and drying cycles. Workshop in clay behaviour: chemico-mechanical coupling from nanostructures to engineering applications, vol.2, Italy.

Ramya HN, Umesha TS, and Lalithamba HS, (2018) Effect of Sodium Chloride on Geotechnical Properties of Black Cotton Soil, Journal of Materials Science &Nanotechnology

Rogers, et Glendenning. (1996). Modification of clays soils using lime. *In Lime stabilization. Homas Telford, London*, 99-112.

Rogers, C. D., et Glendinning, S. (2000). Lime requirements for stabilization. Transportation Research Record, n°1721, 9-18

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

Sivapullaiah, P.V., Lakshmikantha, H., Kiran, K.M. (2003). Geotechnical properties of stabilised Indian red earth. Geotechnical and Geological Engineering,
Vol. 21, pp. 399-413.

Srikanth T, Harnadh KLAV. (2013) Effect of sodium chloride on some geotechnical properties of an expansive soil. Inter J Conceptions Mech Civil Eng 2357- 760.

Thi-Thanh-Hang Nguyen .(2015), Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel, thése de doctorat, université paris-Est.

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I. and Higgins, D.D. (1998). Effect of partial subsitution of lime with ground granular furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime stabilised sulphate-bearing clay soils. Engineering Geology.

Annexes

a- **Analyse chimique sommaire –ACS- NF P 18-560**

Afin d'étudier les caractéristiques chimiques de l'argile étudier, nous avons mené une série d'expériences chimiques sur les échantillons d'argile, selon la norme française NF P 18-560.

1. Détermination le pourcentage des insolubles (Silice + Silicates)

L'essai a pour objet de déterminer le pourcentage du (Silice + Silicates)
En prendre 1g du sol tamisé au tamis 0,08mm, puis en ajoute dans un fiole contient 100 ml de solution HCl (20%) + chaleur, après la filtration dans un filtre blanc ensuite la calcination se fait à 950°C, puis pesez et calculé le pourcentage des insolubles selon la formule suivant :

$$\% INS = 100*\Delta p$$



Figure 1 : Détermination des insolubles.

2. Détermination les pourcentages les sulfates et les hydroxydes

Le but de cet essai est déterminé le pourcentage de sulfates et hydroxydes le protocole expérimentale a été effectué comme suite : On prendre 1g du sol tamisé au tamis 0,08mm, puis on ajoute dans un fiole contient 100ml de solution HCl (20%) + chaleur, par la suite la filtration dans un filtre jaugée à 250 ml. En divise le solution en deux partie, chaque partie contient de 100 ml pour un essai , nous avons ajoutez 50 ml de BaCl2, laissez reposer 12h puis filtrez (filtre blanc) pendent 12h, en suite nous la prenons et mettons dans un four pour calcinez à 950°C, à fin nous calculons le pourcentage des sulfates.

$$\% Sul = 184{,}23*\Delta p$$

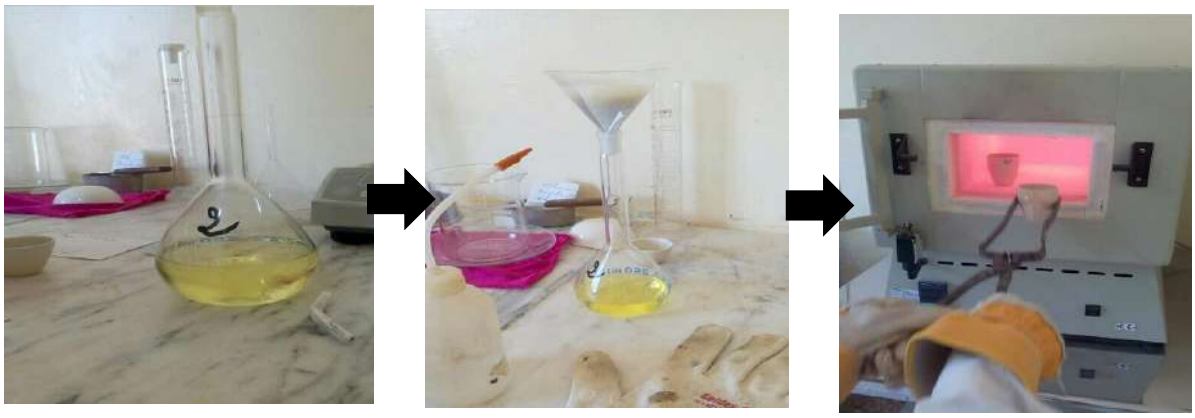


Figure 2 : Détermination le pourcentage de sulfate.

Par la suite le deuxième protocole se fait comme suite pour déterminer le pourcentage des hydroxydes (fer + Alumine), en ajoute de l'acide Nitrique + quelques gouttes de bleu de bromothymol + amoniaque + chaleur, la réaction s'arrête lorsque la couleur se transforme en bleu puis nous filtrant dans un filtre blanc et calcinez à 950°C, à fin nous détermine le pourcentage des hydroxydes.

$$\%Hyd = 250^{*} \Delta p$$



Figure 3 : Détermination le pourcentage des hydroxydes.

3. Détermination le pourcentage des chlorures (sel, NaCl)

En prend 1g d'argile tamisé à la fraction 0/0,08 mm, en remplit avec l'eau dans un bécher + chaleur, après la filtration (filtrat + dichromates de potassium), nous remplir une burette avec

de $AgNO_3$ et mettre le filtrat et l'indicateur au-dessous, ouvrir le robinet. La réaction s'arrête lorsque la couleur se transforme en rouge brique.

Don le calcul de pourcentage se fait comme suite :

$$\%NaCl = 0{,}58 * \Delta v$$



Figure 4 : Détermination du pourcentage de Nacl.

4. Détermination le pourcentage des carbonates ($CaCO_3$)

On prend 0,5g d'argile tamisé à la fraction 0/0,08mm, dans un tube en ajoute l'eau plus le HCl pur, on mélange l'argile avec la solution préparer dans un erlenmeyer avec une agitation, en suite nous liront la lecture Δv (CO_2) pour déterminé le pourcentage du carbonate.

$$\%CaCO_3 = \Delta v\,(CO_2)/\Delta v\,(CaCO_3)$$



Figure 5: Détermination du pourcentage des carbonates .

5. Détermination du la perte au feu (PAF)

On prend 2g d'argile tamisé à la fraction 0/0,08mm pesée dans un creuset, nous prenons et mettant dans un four à 950°C, pendant une durée de 45 minutes après la fin durée en pèse le creuset et calculer la perte de masse ;

PAF= 50*Δp

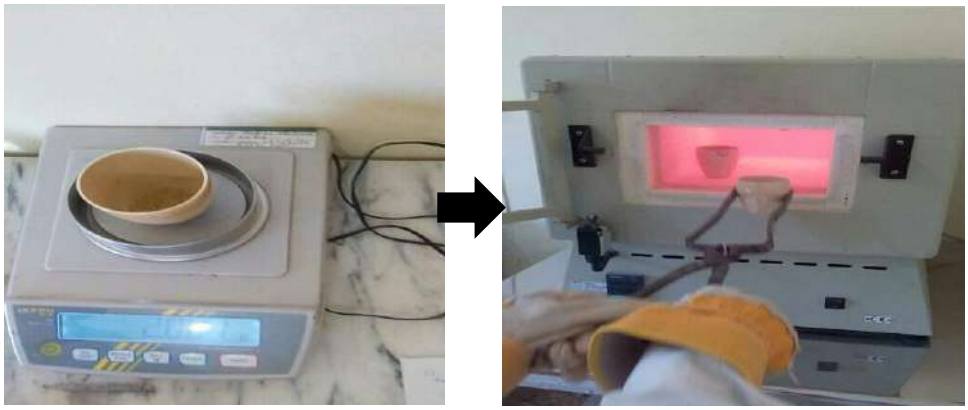


Figure 6 : Détermination de la perte au feu.

6. Détermination de la matière organique

On prend 50g d'argile tamisé à la fraction 0/2mm pesée dans un creuset, nous prenons et mettant dans un four à 950°C, pendant une durée de 3h, après la fin durée en pèse le creuset et calculer la perte de masse;

Mmoc= 2* Δp

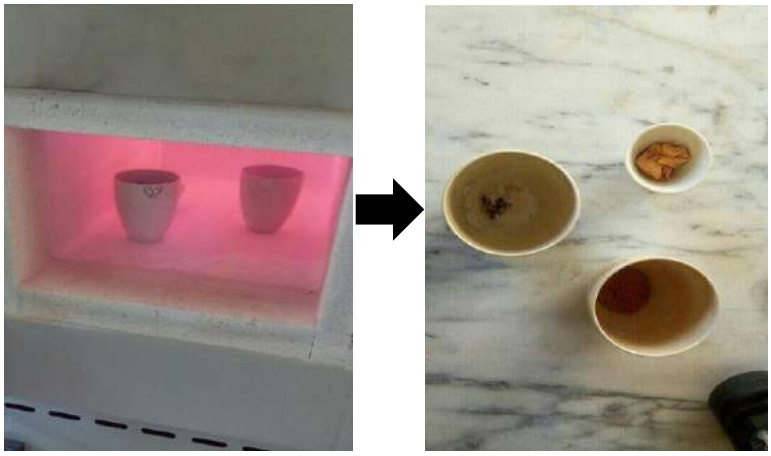


Figure 7 : Détermination de la matière organique .

Essais de cisaillement à la boite

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

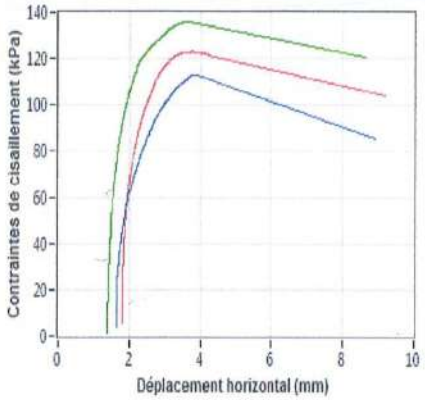
Site :	médéa	Date de prélevement :	06/05/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	06/05/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :	01	Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	argile ocon	Niveau d'eau (m) :	

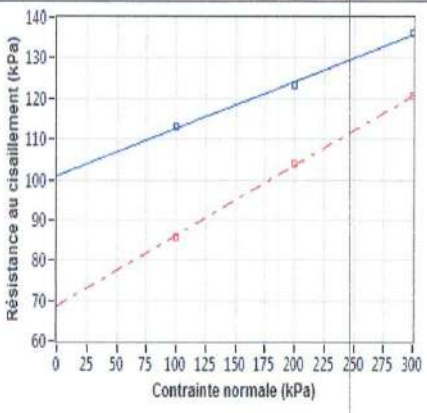
Eprouvettes avant / après essai

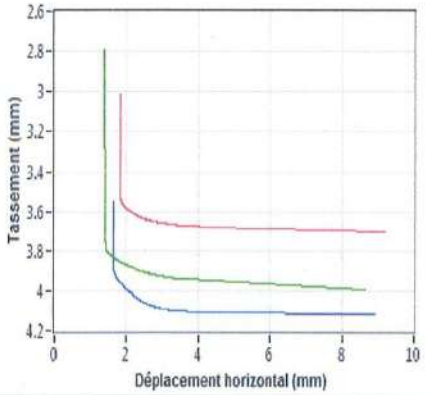
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρs, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
svo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	110	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
s'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	110	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	175.5	2031	1662	22.2	0.625	96.1	0.0	1662	22.2	100.0	113.1	3.83	85.8	8.91
2	24.00	161.5	1869	1529	22.2	0.765	78.4	0.0	1529	22.2	200.0	123.3	3.74	103.9	9.20
3	24.00	160.5	1858	1520	22.2	0.776	77.3	0.0	1520	22.2	300.0	136.1	3.54	120.6	8.64

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
101,1	68,70	6,576	9,849

Commentaires

Visa :

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

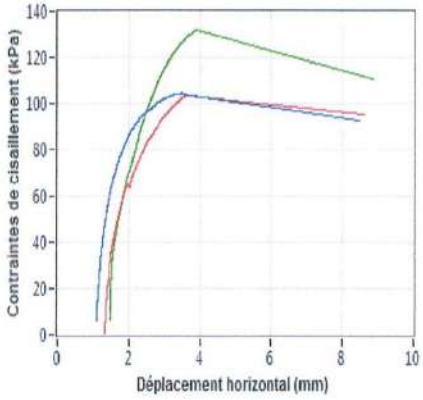
Site :	médéa	Date de prélevement :	30/04/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	30/04/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :	01	Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	argile +oc2n	Niveau d'eau (m) :	

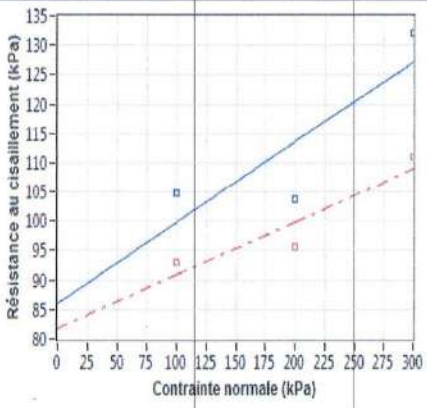
Eprouvettes avant / après essai

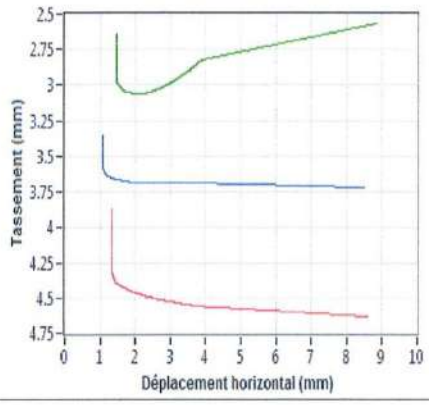
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρs, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
svo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	101	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
s'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	101	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	φ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	162.5	1881	1478	27.3	0.827	89.0	0.0	1478	27.3	100.0	104.7	3.47	93.1	8.49
2	24.00	162.5	1881	1478	27.3	0.827	89.0	0.0	1478	27.3	200.0	103.6	3.61	95.6	8.61
3	24.00	162.5	1881	1478	27.3	0.827	89.0	0.0	1478	27.3	300.0	132.2	3.87	111.1	8.86

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
86	81	7,8	5

Commentaires

Visa :

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

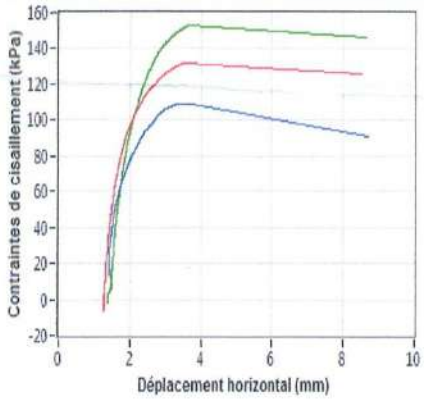
Site :	médéa	Date de prélevement :	02/05/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	02/05/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :	01	Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	OCUN	Niveau d'eau (m) :	

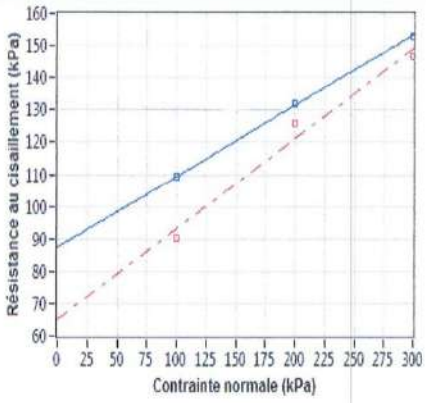
Eprouvettes avant / après essai

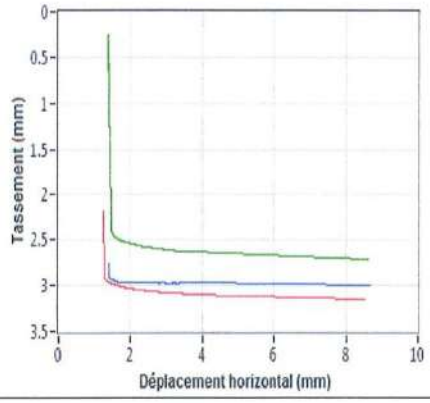
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρs, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
σvo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	108	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
σ'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	108	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	173.5	2008	1619	24.0	0.667	97.1	0.0	1619	24.0	100.0	109.2	3.41	90.6	8.70
2	24.00	174.2	2016	1626	24.0	0.661	98.1	0.0	1626	24.0	200.0	131.9	3.51	126.1	8.52
3	24.00	172.5	1997	1610	24.0	0.677	95.7	0.0	1610	24.0	300.0	153.1	3.64	146.7	8.63

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
87	65	12	15

Commentaires

Visa :

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

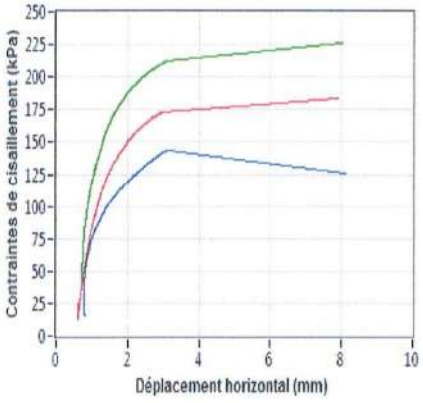
Site :	médéa	Date de prélevement :	16/05/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	16/05/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :	01	Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	argile 2n4c	Niveau d'eau (m) :	

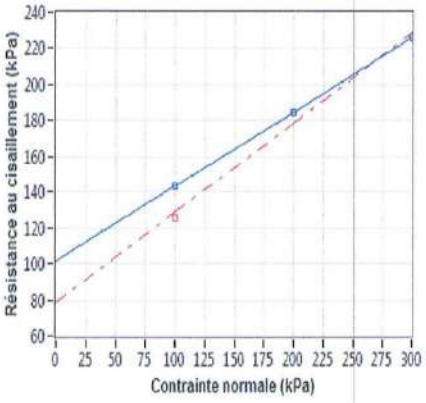
Eprouvettes avant / après essai

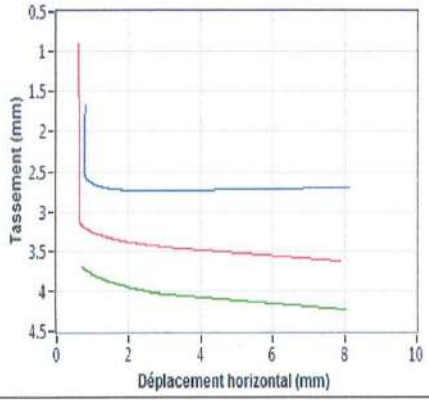
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρs, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
svo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	101	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
s'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	101	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	162.5	1881	1505	25.0	0.794	85.0	0.0	1505	25.0	100.0	143.6	3.15	126.1	8.14
2	24.00	161.5	1869	1495	25.0	0.806	83.8	0.0	1495	25.0	200.0	184.2	7.89	184.2	7.89
3	24.00	167.5	1939	1551	25.0	0.741	91.1	0.0	1551	25.0	300.0	226.7	8.03	226.7	8.03

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
101	78	22	26

Commentaires

Visa :

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

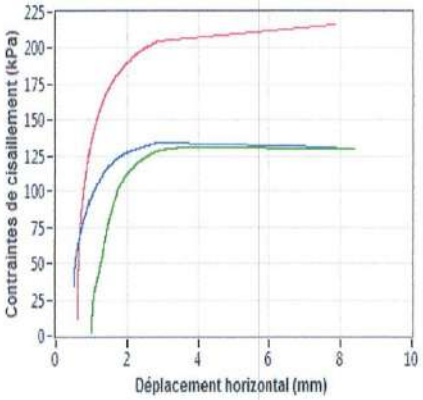
Site :	médéa	Date de prélèvement :	15/05/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	15/05/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :		Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	argile 4n4c	Niveau d'eau (m) :	

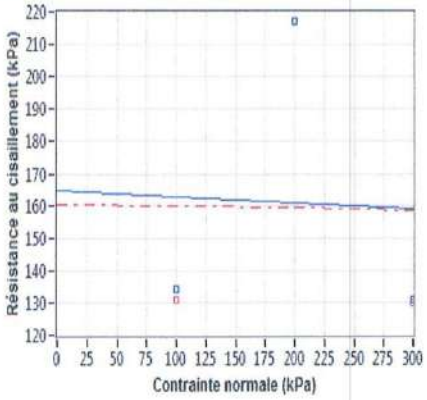
Eprouvettes avant / après essai

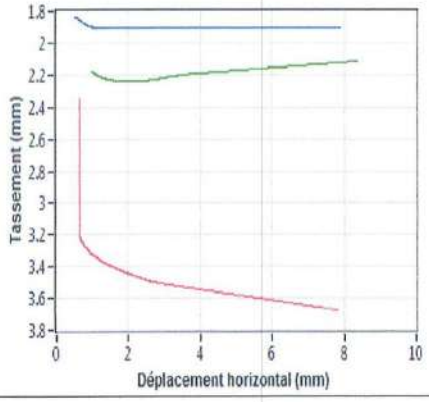
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρs, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
σvo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	101	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
σ'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	101	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	161.5	1869	1482	26.1	0.821	85.8	0.0	1482	26.1	100.0	134.4	2.87	130.8	7.88
2	24.00	162.5	1881	1492	26.1	0.810	87.0	0.0	1492	26.1	200.0	216.9	7.83	216.9	7.83
3	24.00	157.5	1823	1446	26.1	0.868	81.2	0.0	1446	26.1	300.0	130.8	3.40	129.7	8.38

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
164	160	23	22

Commentaires

Visa :

Essai de cisaillement rectiligne - Cisaillement direct
NF P94-071-1, P94-071-2

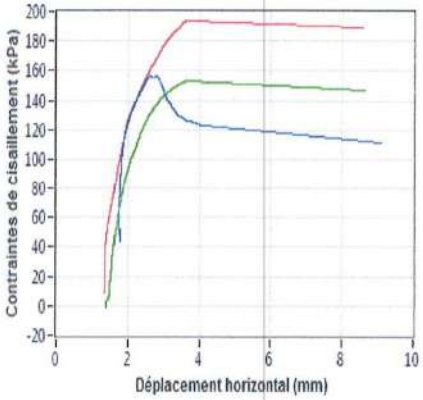
Site :	médéa	Date de prélevement :	09/05/2019
Nom du technicien :	BENDOUMA CHERIFA	Date d'essai :	09/05/2019
N° de dossier :	01	Profondeur (m) :	1.00 / 5.00
Sondage N° :	01	Cote (m) :	4.00 / 5.00
Nature du sol :	argile 4c0n	Niveau d'eau (m) :	

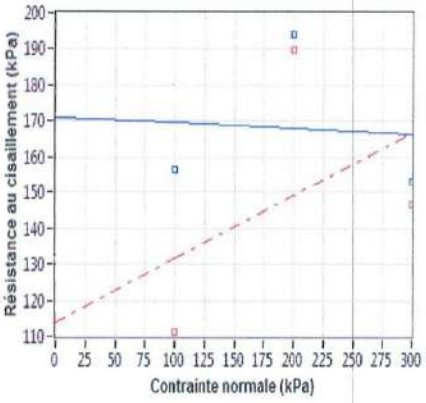
Eprouvettes avant / après essai

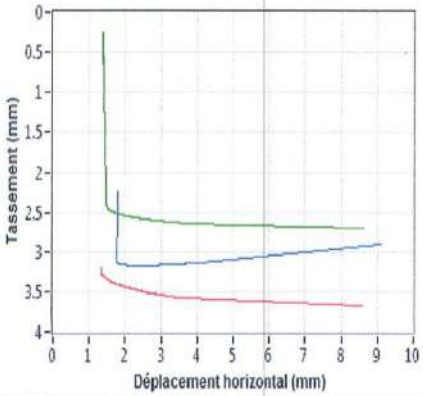
D ou L, Diamètre ou Largeur éprouvette (mm) :	60.00	ρS, Masse volumique des grains estimée (kg/m³) :	2700
svo, Contrainte verticale totale du sol en place (kPa)	86	Uo, Pression interstitielle du sol en place (kPa) :	0
s'vo, Contrainte verticale effective sol en place (kPa)	86	Vitesse de cisaillement (µm/min) :	0.5

N°	Hi (mm)	mi (g)	ρi (kg/m³)	ρdi (kg/m³)	wi (%)	ei	Sri (%)	T100 (min)	ρdf (kg/m³)	wf (%)	σ' (kPa)	τ f,p (kPa)	δl f,p (mm)	τ f,f (kPa)	δl f,f (mm)
1	24.00	137.2	1588	1276	24.5	1.117	59.2	0.0	1276	24.5	100.0	156.4	2.62	111.4	9.10
2	24.00	138.6	1604	1289	24.5	1.095	60.4	0.0	1289	24.5	200.0	194.2	3.61	189.7	8.59
3	24.00	138.0	1597	1283	24.5	1.104	59.9	0.0	1283	24.5	300.0	153.1	3.64	146.7	8.63

Courbes de cisaillement et de tassement







Résultats

C'p (kPa)	C'f (kPa)	φ'p (°)	φ'f (°)
171	114	07	10

Commentaires

Visa :