

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie civil  
Option : Géotechnique

## **Thème**

**Stabilisation d'un sol argileux par traitement à la chaux et au ciment**  
**cas du site : lotissement Mokadam**

***Présenté par : M<sup>lle</sup> BOUTOUCHE SILYOUNA***

Soutenu devant le Jury composé de :

Mr *BOUDLAL Omar*, Maître de conférences à l'UMMTO.....Président  
M<sup>me</sup> *SEKLAOUI-OUKID Ouiza*, Maître de conférences à l'UMMTO.....Promotrice  
M<sup>lle</sup> *BELHASSANI*, Maître Assistante à l'UMMTO ..... Examinatrice

***Promotion : 2017/2018***

## Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier infiniment mes chers parents qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de mes études.*

*Je tiens aussi à remercier tous ceux et celles qui ont contribué à finaliser ce modeste travail.*

*Mes remerciements les plus sincères pour ma promotrice M<sup>me</sup> SEKLAOUI-OUKID OUIZA pour m'avoir guidée tout au long de ce travail, je la remercie vivement pour sa disponibilité, pour ces conseils avisés et son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à Mr BOUDLAL Omar, docteur à l'UMMTO, qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.*

*Je tiens également à remercier Melle BELHASSANI, Maître assistante à l'UMMTO, pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Enfin, Je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants et étudiants de la faculté du génie civil de l'UMMTO de TIZI OUZOU et de l'université Saad DAHLEB de BLIDA qui m'ont enrichis de connaissances et de savoirs.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail ...*

*A la mémoire de ma très chère grand mère Yemma Baya  
qu'elle repose en paix ;*

*A mes très chers parents qui n'ont pas cessé de me  
soutenir et me donner le meilleur d'eux même tout au long de  
mes études ;*

*A ma très chère sœur Melissa qui a toujours était  
présente pour moi ;*

*A mes frères adorés Moumouh et Cherif et leurs épouses ;*

*A mes amours : mon neveu Adam et ma nièce Lyna ;*

*A mes meilleures cousines Dila, Fafou, Maya et  
particulièrement ma très chère cousine Rabia ;*

*Et a tous mes amies particulièrement Fati et Koki.*

**SILYOUNA**

### Résumé

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

Dans ce travail, Une étude bibliographique a été menée sur les sols argileux et les principaux problèmes liés à ces sols, ainsi que les différentes techniques pour les stabiliser. Par la suite une étude expérimentale a été faite pour un sol prélevé sur un site situé au lotissement MOKADEM de la ville de Tizi-Ouzou, où de nombreux problèmes et des dégradations au niveau de la route ont été enregistrés. Après prélèvement une étude d'identification sur le matériau utilisé qui a été effectuée par une série d'essai, y compris, l'analyse granulométrique, les limites d'ATTERBERG, la valeur de bleu de méthylène, et les essais mécaniques. Ces résultats on indiqué que notre sol est moyennement gonflant et que c'est un matériau de classe A2, la valeur de l'indice portant IPI nous a permet de le classer dans l'état hydrique moyen (sous classe A<sub>2m</sub>). Les caractéristiques géotechnique du sol étudié ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles que indiquées dans le GTR, le traitement préconisé dans ce guide est le traitement à la chaux et /ou au ciment.

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

---

# Abstract

Lime and cement treatment of soils is a well-known technique that aims at improving the mechanical properties of clay soils in civil engineering. Studies have shown that lime and cement treatment can ameliorate the geotechnical properties of soils. In this work, a theoretical study was conducted on clay soils and the main issues related to these soils, as well as the different techniques to stabilize them. This was followed by an experimental study applied on a piece of soil taken from the site located in Mokadem building lot, in the city of Tizi-Ouzou, a site with many reported soil problems and road damages. After an identification study on the sample taken from the site, which carried out by a series of test, including, granulometric analysis, Atterberg liquid limits, methylene blue test, and mechanical tests. The results indicate that our soil is moderately inflating and that it is a class A2, the IPI index allowed us to classify it in an average hydric state (under class A2m).

The geotechnical characteristics of the studied soil do not satisfy the conditions of use of the materials in layer of form as indicated in the GTR without treatments, the treatment recommended in this guide is the treatment with the lime and / or the cement.

**Keyword:** Stabilization, clay soil, lime, cement.

---

# SOMMAIRE

---

## Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

### **Chapitre I :Généralités sur les sols argileux**

I.1.Introduction .....	5
I.2. Définition des sols .....	5
I.3. Formation des sols .....	5
I.4.Définition des argiles .....	6
1.5. Origine des argiles .....	6
1.6. Argiles et plasticité des sols .....	6
I.7. Les minéraux argileux.....	7
I.7.1. Formation des minéraux argileux .....	8
I.7.2. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux .....	8
I.7.3. Les principaux types de minéraux argileux .....	10
I.7.3.1. La kaolinite .....	10
I.7.3.2. La montmorillonite.....	11
I.7.3.3. L'illite.....	12
I.7.3.4. Les chlorites.....	12
I.7.4. Méthodes d'identification des minéraux argileux .....	13
I.8. Les principaux problèmes des sols argileux.....	14
I.8.1. Phénomène de gonflement .....	14
1.8.1.1. Nature du phénomène de gonflement.....	14
1.8.1.2. Conséquences du gonflement.....	15

# SOMMAIRE

---

I.8.2. Phénomène de glissement .....	16
I.8.3. Phénomène de tassement .....	17
I.8.3.1. Origines du tassement du sol.....	18
I.9. Conclusion .....	18

## **Chapitre II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol**

II.1. Introduction.....	20
II.2. Définition et but de la stabilisation des sols.....	20
II.3. les techniques de stabilisation.....	20
II.3.1. Stabilisation mécanique.....	21
II.3.1.1. Le Compactage.....	21
II.3.1.2. Les modes de compactage.....	22
II.3.1.2.1. compactage de surface.....	22
II.3.1.2.2. Compactage dynamique.....	22
II.3.1.2.3. Vibrocompactage.....	23
II.3.2. Stabilisation thermique .....	23
II.3.3. stabilisation hydrauliques.....	25
II.3.3.1. Technique de drainage.....	25
II.3.4. Stabilisation chimique.....	25
II.3.4.1. Utilisation de la chaux.....	26
II.3.4.1.1. Les différents types de chaux.....	26
II.3.4.1.2. Réaction sol-chaux.....	27

# SOMMAIRE

---

II.3.4.1.3. Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol.....	28
a. Malaxage sur place.....	28
b. Technique d'injection.....	29
c. Colonnes de chaux.....	30
II.3.4.2. Utilisation du ciment .....	30
II.3.4.2.1. Types de ciment.....	31
II.3.4.3. Traitement mixte (chaux et ciment).....	32
II.3.4.4. Utilisation des cendres volantes.....	32
II.3.4.5. Influence de la chaux sur le sol.....	32
II.3.4.5.1. Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	32
II.3.4.5.2. Influence de la chaux sur les caractéristiques du compactage..	33
II.3.4.5.3. Influence de la chaux sur les paramètres de la résistance au cisaillement.....	34
II.3.4.6. Influence du ciment sur le sol .....	35
II.3.4.6.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg.....	35
II.3.4.6.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage...	35
II.4. Conclusion.....	36

## **Chapitre III : Identification de sol étudié**

III.1. Introduction.....	37
III.2. Situation géographique de site étudié.....	37
III.3. Préparation de l'échantillon.....	38
III.4. Essais d'identification.....	39

# SOMMAIRE

---

III.4.1. Paramètres d'état.....	39
III.4.1.1. La teneur en eau (NF P 94-049-1).....	39
III.4.1.2. La Masse volumique.....	40
a. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols (NF P 94-054).....	40
b. Détermination de la masse volumique humide (NF P 94-053).....	41
III.4.2. Limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	42
a. Détermination de la limite de liquidité.....	42
b. Détermination de la limite de plasticité.....	44
c. Détermination de l'indice de plasticité.....	45
d. Détermination de l'indice de consistance $I_c$ .....	46
III.4.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-057).....	47
III.4.4. Les essais chimiques.....	48
III.4.4.1 Analyse chimique.....	48
III.4.4.2. L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).....	48
III.4.4.2.1. Préparation de l'échantillon.....	49
III.4.5. Les essais mécanique.....	50
III.4.5.1 Essai Proctor (NF P 94-093).....	50
III.4.5.1.1 Principe de l'essai.....	51
III.4.5.2 Essais CBR (California Bearing Ratiotest) (NF P 94-078).....	52
III.4.5.2.1. Détermination de l'indice portant immédiat (IPI).....	52
a. Principe de l'essai.....	52
b. Résultat de l'essai Indice portance Immédiat (IPI).....	53
III.4.5.2.2. Détermination de l'indice CBRI immédiat.....	54

# SOMMAIRE

---

a. Résultat de l'indice CBRI immédiat .....	54
III.4.5.2.3. Détermination ce l'indice CBR après immersion .....	55
a. Résultat de l'indice CBR après immersion .....	56
III.5. Tableau Récapitulatif des résultats .....	58
III.6.Conclusion.....	59

## **Chapitre IV : Stabilisation de sol étudié par la chaux et le ciment**

IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Caractéristiques des additifs utilisés.....	61
a. La chaux.....	61
b. le ciment.....	61
IV.3. Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	62
IV.4. Effet de la chaux sur les caractéristiques de compactage.....	64
IV.4.1. Présentation des résultats à la chaux.....	64
IV.4.1.1. Essai Proctor (5% de chaux) .....	64
IV.4.1.2. Essai Proctor (10% de chaux) .....	65
IV.5. Effet d'ajout de ciment sur les caractéristiques de compactage.....	67
IV.5.1. Présentation des résultats de ciment.....	67
IV.5.1.1. Essai Proctor (5% de ciment).....	67
IV.5.1.2. Essai Proctor (10% de ciment).....	68
IV.6. Effet d'ajout de ciment + chaux sur les caractéristiques de compactage.....	69

# SOMMAIRE

---

IV.6.1. Présentation des résultats de ciment+ chaux.....	69
IV.6.1.1. Essai Proctor (5% de chaux+ 5 % de ciment).....	69
IV.6.1.2. Essai Proctor (10% de chaux+ 10 % de ciment).....	70
IV.7 Effet d'ajout de chaux et de ciment sur IPI.....	72
IV.7.1. Indice portance Immédiat ( IPI ) a 5 % de chaux.....	72
IV.7.2. Indice portance Immédiat ( IPI ) a 10 % de chaux.....	73
IV.7.3. Indice portance Immédiat ( IPI ) a 5 % de ciment.....	75
IV.8. Effet d'ajout de chaux et de ciment sur l'indice CBR après immersion.....	77
IV.8.1. Indice CBR immersion par ajout de 5 % de chaux.....	77
IV.8.2. Indice CBR immersion par ajout de 10 % de chaux.....	78
IV.8.3. Indice CBR immersion par ajout de 5 % de ciment.....	79
IV.9. Mesure du gonflement vertical .....	81
IV.9.1. Mesure de gonflement vertical par ajout de chaux.....	81
IV.9.2. Mesure de gonflement vertical par ajout de ciment.....	82
IV.10. Tableau récapitulatif.....	83
IV.11. Conclusion.....	83
 Conclusion générale .....	 85

References bibliographiques

ANNEXES

# LISTE DES FIGURES

---

## Liste des figures :

Figure (I.1) : Limite d'Atterberg

Figure (I.2) : a) Tétraèdre de silice (d'après Grim, 1959) ; b) feuillet de silice en tétraèdre (D'aprèsGrim, 1959)

Figure (I.3) : a) octaèdre d'aluminium(ou de magnésium) (d'après Grim, 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim, 1959)

Figure (I.4) : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

Figure (I.5) : Structure de la kaolinite (Grim;1962)

Figure (I.6) : Photographie d'une kaolinite vue au microscope électronique

Figure (I.7) : Structure de la montmorillonite (Grim ;1962)

Figure (I.8) : Photographie d'une montmorillonite vue au microscope électronique

Figure (I.9) : Structure d'illite (Grim ,1962)

Figure (I.10) : Photographie d'une illite vue au microscope électronique

Figure (I.11) : Structure d'une chlorite

Figure (I.12) : Photographie d'une chlorite vue au microscope

Figure (I.13) : Retrait-Gonflement

Figure (I.14) : Dégradations et fissurations des façades de bâtiment( photo prise a Tizi Ouzou)

Figure (I.15) : désordres liés au phénomène de gonflement

Figure (I.16) : Glissement de terrain

Figure (I.17) : Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain (Azazga)

Figure (I.18) : Fissuration d'une maison lors d'un glissement de terrain (Azazga)

Figure (I.19) : Tassement uniforme

Figure (I.20) : Tassement différentiel

Figure (II.1) : Structure de sol avant et après compactage

Figure (II.2) : Courbe de compactage

Figure (II.3) : Influence des types de sols sur le compactage

Figure (II.4) : Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie)

Figure (II.5) : Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).

Figure (II.6) : Vibrocompactage

## LISTE DES FIGURES

---

- Figure (II.7) : Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation
- Figure (II.8) : Drain filtre
- Figure(II.9): Transformation du calcaire en chaux vive
- Figure (II.10) : Cycle de la chaux
- Figure (II.11) : Traitement par malaxage
- Figure (II.12) : Technique par injection (cas a, cas b)
- Figure (II.13) : Processus de fabrication de ciment
- Figure (II.14.) : Malaxage de sol avec le ciment
- Figure (II.15) : Mise en œuvre de sol ciment
- Figure (II.16) : Variation des caractéristiques de compactage des mélanges sol-chaux [Eren and Filiz 2009]
- Figure (II.17) : Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991]
- Figure (II.18) : Effet du ciment sur les limites d'Atterberg [Osula1991]
- Figure (III.1) : Le site de prélèvement
- Figure (III.2) : Réalisation de mur de soutènement sur le site étudié
- Figure (III.3) : Des échantillons soumis au séchage (a) ; une étuve (b)
- Figure (III.4.) : Un Concasseur
- Figure (III.5) : Argile avant concassage (a), argile après concassage et tamisage (b)
- Figure (III.6) : Pycnomètre utilisé
- Figure (III.7) : Échantillon paraffiné (a) ; Pesée hydrostatique (b)
- Figure (III.8) : Dispositif d'essai de limite de liquidité
- Figure (III.9) : Détermination de la limite de liquidité
- Figure (III.10) : La limite de liquidité
- Figure (III.11) : Détermination de la limite de plasticité
- Figure (III.12.) : Diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert.1997)
- Figure (III.13) : L'analyse granulométrique par sédimentométrie
- Figure (III.14) : Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation
- Figure (III.15) : Agitateur
- Figure (III.16) : Test de la tache sur papier filtre
- Figure (III.17) : Dispositif de l'essai Proctor
- Figure (III.18). Principe de l'essai Proctor
- Figure (III.19) : Courbe essai Proctor

## LISTE DES FIGURES

---

- Figure (III.20) : Appareil de poinçonnement
- Figure (III.21) : Eprouvette après poinçonnement
- Figure (III.22.) : Courbe (effort – enfoncement) pour IPI
- Figure (III.23) : Courbe (effort – enfoncement) pour CBR immédiat
- Figure (III.24) : Dispositif du montage pour calculé le gonflement [norme afnor]
- Figure (III.25) : Immersion de l'éprouvette dans l'eau
- Figure (III.26) : Courbe (effort – enfoncement) pour CBR après immersion
- Figure (IV.1) : La chaux utilisée
- Figure (IV.2) : Le ciment utilisé
- Figure (IV.3): Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg
- Figure (IV.4) : Histogramme de la réduction des indices de plasticité en fonction des teneurs en chaux
- Figure (IV.5) : Courbe essai Proctor a 5% de chaux
- Figure (IV.6) : Courbe essai Proctor à 10% de chaux
- Figure (V.7) : Influence de la chaux sur les paramètres de compactage
- Figure (IV.8) : Courbe essai Proctor à 5 % de ciment
- Figure (IV.9) : Courbe essai Proctor à 10% de ciment
- Figure (IV.10) : Variation de courbe Proctor par ajout de ciment
- Figure (IV.11) : Courbe essai Proctor a 5 % de ciment+ 5% de chaux
- Figure (IV.12) : Courbe essai Proctor a 10 % de ciment+ 10% de chaux
- Figure (IV.13) : Variation de la courbe Proctor par ajout de chaux et ciment
- Figure (IV.14) : Courbe Proctor pour 5% d'ajout
- Figure (IV.15) : Courbe Proctor pour 10 % d'ajout
- Figure (IV.16) Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 5 % de chaux
- Figure (IV.17) Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 10 % de chaux
- Figure (IV.18) Courbes IPI (effort de poinçonnement- enfoncement) par variation de la chaux
- Figure (IV.19) Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 5% de ciment
- Figure (IV.20) Courbes IPI (effort de poinçonnement- enfoncement) par variation de ciment

## **LISTE DES FIGURES**

---

Figure (IV.21) Courbe C.B.R (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement)  
par ajout 5% de chaux

Figure (IV.22) Courbe C.B.R( effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement)  
par ajout 10% de chaux

Figure (IV.23) Courbe C.B.R (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement)  
par variation de chaux

Figure (IV.24) Courbe C.B.R (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement)  
par ajout de 5% de ciment

Figure (IV.25) Courbes CBR (effort de poinçonnement- enfoncement) avant et après  
traitement

Figure (IV.26) variation du gonflement vertical en fonction de chaux

# LISTE DES TABLEAUX

---

## Liste des tableaux :

**Tableau I.1 :** Caractéristiques de quelques minéraux argileux

**Tableau II.1 :** Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg [George et al. 1992]

**Tableaux II.2 :** Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg [Ola 1977]

**Tableau III.1:** Les résultats de la teneur en eau

**Tableau III.2 :** Résultats de la masse volumique des particules solides

**Tableau III.3 :** Les résultats de la masse volumique  $\rho_h$

**Tableau III.4 :** Résultats de la limite de liquidité

**Tableau III.5 :** Résultats de la limite de plasticité

**Tableau III.6 :** Résultats de l'indice de plasticité

**Tableau III.7 :** Classification de sol selon l'indice de plasticité

**Tableau III.8 :** Etat du sol en fonction de l'indice de consistance (J.M. TCHOUANINANA (1999))

**Tableau.III.9 :** Résultats de l'analyse chimique

**Tableau III.10 :** classification de sol selon La teneur en  $\text{CaCO}_3$  ( S.LEROUIL, J.P MAGMAN et F.TAVEN)

**Tableau III.11 :** Résultat de l'essai de bleu de méthylène

**Tableau III.12 :** Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène [d'après la norme française (NF P 11-300) et le GTR

**Tableau III.13 :** Les résultats de l'essai Proctor

**Tableau III.14 :** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat

**Tableau III.15 :** Résultat de l'indice portant immédiat max

**Tableau III.16 :** Résultat de poinçonnement pour l'essai ICBR immédiat

**Tableau III.17 :** Résultat de l'indice CBR immédiat max

**Tableau III.8 :** Les résultats de poinçonnement pour l'essai poinçonnement après immersion

**Tableau III.19 :** Résultat de l'indice CBR immersion max

**Tableau III.20 :** Caractéristiques d'identification du sol

**Tableau III.21 :** Potentiel de gonflement d'après[le Building Research Establishment BRE (1980)]

**Tableau III.22 :** Classification du gonflement d'après [Dakshanamurthy et Raman (1973)]

**Tableau VI.1 :** Caractéristiques techniques de ciment utilisé

**Tableau IV.2 :** Variation des limites d'Atterberg en fonction de la chaux

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

**Tableau IV.3 :** Les résultats de Proctor ( 5% de chaux)

**Tableau IV.4 :** Les résultats de Proctor (10% de chaux)

**Tableau IV.5 :** Les résultats de Proctor ( 5% de ciment)

**Tableau IV.6 :** Les résultats de Proctor ( 10% de ciment)

**Tableau IV.7 :** Les résultats de Proctor ( 5% chaux+ 5% ciment)

**Tableau. IV.8 :** Les résultats de Proctor ( 10% chaux+ 10% ciment)

**Tableau. IV.9 :** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 5 % de chaux

**Tableau IV.10 :** Résultat de l'indice portant immédiat à 5 % de chaux

**Tableau. IV.11 :** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 10 % de chaux

**Tableau IV.12 :** Résultat de l'indice portant immédiat à 10 % de chaux

**Tableau IV.13 :** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 5% de ciment

**Tableau IV.14 :** Résultat de l'indice CBR immersion à 5 % de ciment

**Tableau IV.15 :** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 5 % de chaux

**Tableau IV.16 :** Résultat de l'indice CBR immersion à 5 % de chaux

**Tableau IV.17 :** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 10 % de chaux

**Tableau IV.18 :** Résultat de l'indice CBR immersion à 10 % de chaux

**Tableau IV.19 :** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 5 % de ciment

**Tableau IV.20 :** Résultat de l'indice CBR immersion à 5 % de ciment

**Tableau IV.21 :** Résultat de ICBR immersion traité par le ciment [ *Modou DIOP-2001* ]

**Tableau IV.22 :** Mesure de gonflement vertical par variation de chaux

**Tableau IV.23 :** Mesure de gonflement vertical par ajout de 5% de ciment

**Tableau IV.24 :** Tableau récapitulatif des résultats trouvés

# **Introduction général**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies.

Les sols argileux sont constitués de différents minéraux telles que les Illites, les Smectites et les kaolinites, dont la sensibilité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autre leurs structures en feuillet. Quand ces sols argileux subissent des influences extérieures, à titre d'exemple variation de la teneur en eau, ils peuvent engendrer des dégâts importants difficiles à maîtriser.

Les problèmes d'instabilité des structures fondées sur des sols argileux sont dus au soulèvement du sol à la saturation en période pluviale et au retrait en période estivale. Les désordres constatés sont de plusieurs types et touchent pratiquement tout genre de structure.

Un bon nombre de solutions a été proposé afin de résoudre ces problèmes, ces solutions permettent d'améliorer les propriétés géotechniques des sols, dont on peut citer : la stabilisation mécanique (compactage), la stabilisation thermique (renforcement par congélation), stabilisation hydraulique (drainage) et stabilisation chimique (chaux, ciment, cendres volantes, les solutions salines ...).

Actuellement, la technique de traitement des sols à la chaux (et/ou) au ciment est largement utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques du sol. Cette méthode de traitement des sols est anciennement reconnue et de plus en plus utilisée, elle présente beaucoup d'avantages sur les trois aspects : techniques, économiques, et environnementaux.

## Problématique

Le sol étudié est prélevé sur le site situé au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation de la commune de Tizi-Ouzou. Ce site a fait objet de provoqué des mouvements de terrain ce qui a suscité des craintes et des frayeurs pour les habitants du quartier. En effet des dégâts sont observés au niveau de la route (figure 1).

Notre étude consiste en l'étude de ce cas et de proposer une solution.

La 1<sup>er</sup> constatation est que ce site est constitué d'un remblai de volume de terre important et donc d'un poids très élevé réparti sur une zone (aire) réduite ce qui engendre des mouvements de terrain (figure 2) d'où les dégâts observés sur la route et peut provoquer à long terme des dégâts sur les constructions avoisinantes.

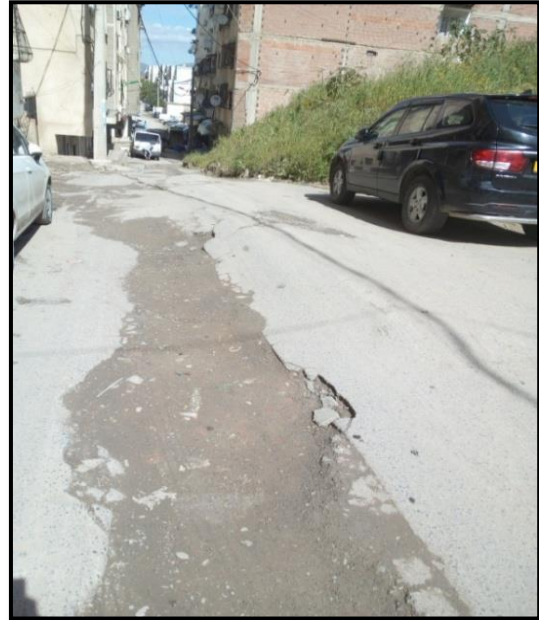
La solution que nous avons proposée est de décharger le terrain (déblayer). Pour éviter de transférer le même problème ailleurs, On propose de valoriser ce sol en le réutilisant dans d'autres projets de génie civil particulièrement en technique routière comme remblai ou en couche de forme.

# Introduction générale

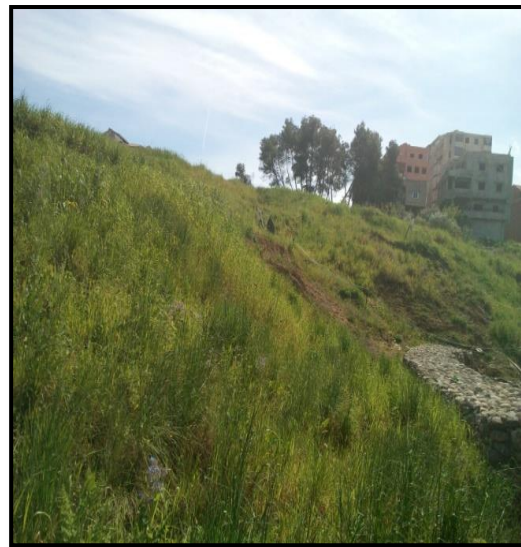
---

Ce sol ne peut pas être utilisé à l'état naturel vu que ces caractéristiques géotechniques sont faibles donc un traitement sera nécessaire.

Le traitement que nous avons envisagé est le traitement à la chaux et au ciment à différent dosage.



**Figure.1.** dégradation au niveau de la route



**Figure.2.** mouvement provoqué par le poids du remblai

# Introduction générale

---

## Organisation du mémoire

Notre travail consiste en l'étude de stabilisation d'un sol argileux par traitement à la chaux et au ciment : cas du site lotissement Mokadam.

Le travail présenté se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre intitulé « généralités sur les sols argileux » est une étude bibliographique qui consiste à décrire les sols argileux, leurs minéralogies, ainsi que les principaux problèmes liés à ces sols.

Le deuxième Chapitre « différentes techniques de stabilisation des sols » présente une synthèse bibliographique sur les techniques de stabilisation et les divers stabilisants à incorporer au sol pour améliorer ses propriétés géotechniques.

Le troisième chapitre « Identification du sol étudié » est consacré à la présentation du matériau utilisé et les différents essais d'identification et les résultats obtenus.

Le dernier chapitre « stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment » porte sur la stabilisation de sol étudié par l'ajout de (5 et 10 %) de chaux et (5 et 10 %) de ciment et mélange de chaux + ciment à différents dosages.

A la fin, une conclusion générale sera donnée qui résume tous les résultats obtenus pour cette étude.

# **Chapitre I**

---

## **Généralités sur les sols argileux**

## I.1. Introduction

Les argiles sont des sols très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les ouvrages en géotechniques. Beaucoup d'ouvrages sont érigés sur des dépôts d'argile, dont le comportement est considérablement influencé par les propriétés physico-chimiques des minéraux argileux. Certains sols argileux changent de volume en fonction de leur teneur en eau et peuvent, de ce fait, créer des désordres dans les ouvrages géotechniques.

Ce chapitre consiste en une recherche bibliographique sur les sols argileux, les types de minéraux argileux, les principaux problèmes et les désordres liés.

## I.2. Définition des sols

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

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

## I.3. Formation des sols

La formation et l'évolution d'un sol s'opèrent selon trois processus, plus ou moins simultanés [1] :

### **Processus 1:** Altération de la roche mère

La roche mère qui peut être dure (granite, schiste, grés...), tendre (craie, marne, argile...) ou meuble (sables, éboulis, loess...) est fissurée, réduite en éléments plus fins ; elle est désagrégée par l'action de la pluie, du vent, du froid et du soleil.

### **Processus 2 :** Poursuite de l'altération par les matières organiques

Le sol désagrégé et altéré, constitué de minéraux et d'éléments plus au moins pâteux est alors Colonisé par une flore et une faune qui s'enrichissent en substances chimiques et organiques, dont l'humus.

### **Processus 3 :** Migrations verticales des éléments solubles

Sous climat pluvieux, les éléments solubles migrent vers le bas : C'est le lessivage. Sous climat sec à forte évaporation, les éléments solubles migrent vers la surface et l'enrichissent. Cette migration des éléments, va créer dans le sol des couches plus ou moins distinctes et définir les horizons, qui constituent le profil pédologique d'un sol.

## I.4. Définition des argiles

Historiquement, en géologie et en science du sol, les argiles correspondent à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  dans une roche, sont des minéraux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre, obtenue par dégradation et altération des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface.

Beaucoup de définitions ont été proposées pour caractériser les argiles, mais elles se ramènent toujours à celle proposée par A. Lapparent « il s'agit d'un corps minéral caractérisé spécifiquement par la nature, le nombre et l'arrangement mutuel des atomes » [2]

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à se fissurer en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. [4]

## I.5. Origine des argiles

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et se sont déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage) et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates, Ces derniers sont des minéraux argileux. [4]

## I.6. Argiles et plasticité des sols

La teneur et la nature des argiles des sols déterminent largement leurs caractéristiques géotechniques. Le test le plus simple pour déterminer la présence d'argile est le test au bleu de méthylène qui donne une indication sur la teneur en argile des sols et matériaux.

Dans une autre approche, l'échantillon de sol est soumis au test d'Atterberg ce test permet de déterminer la sensibilité d'un échantillon de sol à l'eau sans passer par l'analyse minéralogique de sa partie fine. [4]

Selon sa teneur en eau (et la nature des minéraux), un sol argileux peut se présenter sous trois états [5] :

- **L'état solide** : Lorsque le sol à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbées sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait.
- **L'état plastique** : Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont

## CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux

beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore, le sol se déforme sans fissures. C'est un sol qu'on peut façonner à la main.

- **L'état liquide** : Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre.

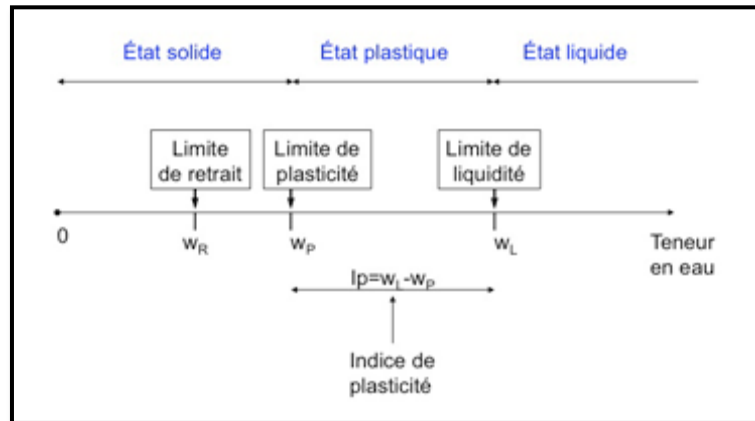


Figure I.1. Limite d'Atterberg [4]

Les teneurs en eau qui délimitent les états de consistance sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg (Figure I.1). Ces limites sont les suivantes :

- La limite de liquidité  $w_L$ : C'est la teneur en eau à partir de laquelle une argile donnée cesse d'avoir un comportement de solide et commence à s'écouler sous son poids propre comme un liquide.
- La limite de plasticité  $w_p$ : C'est la teneur en eau à partir de laquelle, une argile donnée cesse d'être plastique, c'est-à-dire aisément déformable sans fissuration, et devient fragile et sensible à la fissuration dès les petites déformations.
- L'indice de plasticité  $I_p$ : Il mesure l'intervalle de teneur en eau, compris entre  $w_p$  et  $w_L$ , à l'intérieur duquel on doit s'attendre pour le matériau à un comportement «plastique».

### I.7. Les minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des particules très fines dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,002 mm, ils appartiennent à la famille des phyllosilicates. Ce sont pour la plus part des, silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopique, qui portent le nom de feuillets. [2]

### I.7.1. Formation des minéraux argileux [6]

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

#### a. Altération

L'altération physique des roches est l'une des origines des minéraux argileux. Ceux qui en résultent sont différents de par la nature des roches mères et du climat.

En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche mère (illite et chlorite), en climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et des Smectites en milieu confiné. En climat tempéré et humide, l'altération est modérée, il apparaît des interstratifiés, des illites, des chlorites dégradées et des vermiculites.

#### b. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure.

On trouve la transformation par dégradation (soustraction d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que pendant la sédimentation et la diagenèse.

#### c. Néoformation en milieux confinés

Les minéraux argileux sont formés par précipitation d'ions en solution (silicium, aluminium et potassium) susceptibles de réagir entre eux quand ils sont mis en contact par diffusion ou mélange, les types de néoformations sont les suivants:

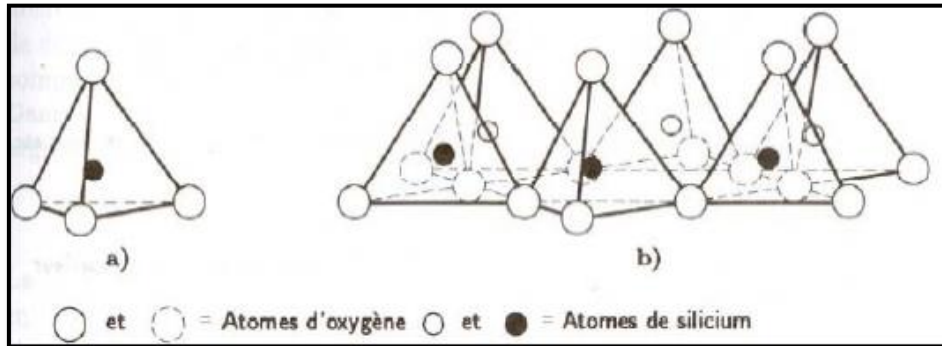
- Néoformation de sépiolite par concentration des ions par évaporation.
- Néoformation de glauconie (illite ferrifère) dans les vases littorales
- Néoformation des "argiles rouges des grands fonds" (smectites ferrifères provenant Des vases calcaires et siliceuses et des cendres volcaniques).

### I.7.2. Structures cristallines fondamentales des minéraux argileux [5]

Les feuillets sont l'unité de base des minéraux argileux, ils ont une apparence similaire à celle d'une lame ou d'une feuille extrêmement mince, Ils sont constitués d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures fondamentales à environ 0,5 nm. Il existe deux structures fondamentales :

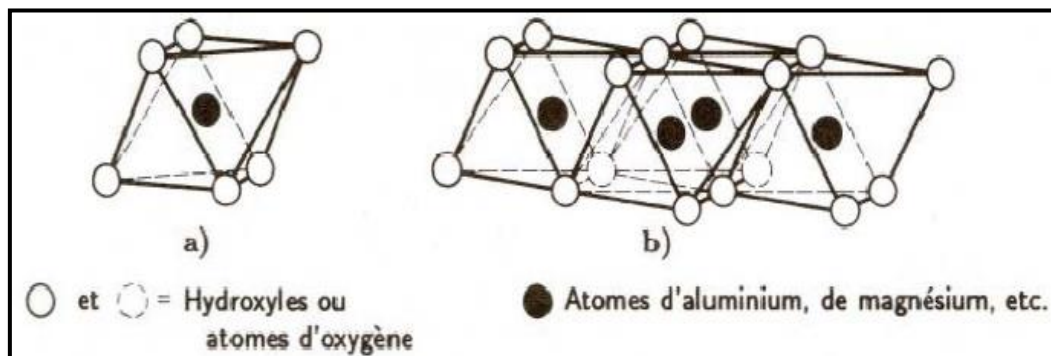
## CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux

▪ La structure fondamentale tétraédrique : est composée de quatre atomes d'oxygène (O) formant un tétraèdre avec en son centre un atome de silicium ( $\text{SiO}_4$ ) (Figure I.2). Un feuillet tétraédrique simple résulte d'un arrangement des structures fondamentales tétraédriques. Ces tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques.



**Figure I.2.** a)Tétraèdre de silice [d'après Grim, 1959] ; b) feuillet de silice en tétraèdre [D'après Grim, 1959].

▪ La structure fondamentale octaédrique : est une combinaison de six atomes d'oxygène (O) ou molécule d'hydroxyle (OH), placés au sommet d'un octaèdre qui renferme un atome métallique l'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg) (Figure I.3), Chacun de ces deux atomes peut être remplacé par un atome métallique de fer (Fe), de titane (Ti), de nickel (Ni), de chrome (Cr) ou de lithium (Li).Un feuillet octaédrique se forme par l'arrangement de structures fondamentales octaédriques. Lorsque les deux tiers des atomes métalliques sont des atomes d'aluminium, la structure octaédrique porte le nom de gibbsite. Si ce sont pour la plupart des atomes de magnésium, la structure portera le nom de brucite.



**Figure I.3 :** a)octaèdre d'aluminium(ou de magnésium) [d'après Grim, 1959] ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre [d'après Grim, 1959].

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme (**Figure I.4.**) :

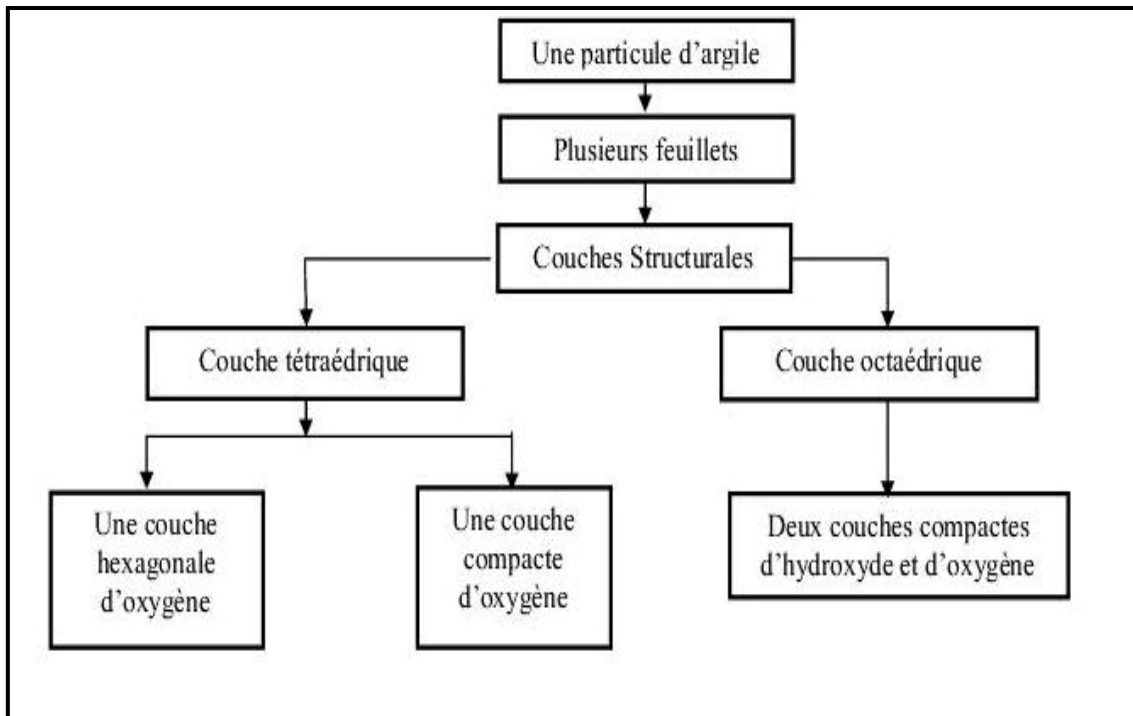


Figure I.4. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [7]

### I.7.3. Les principaux types de minéraux argileux

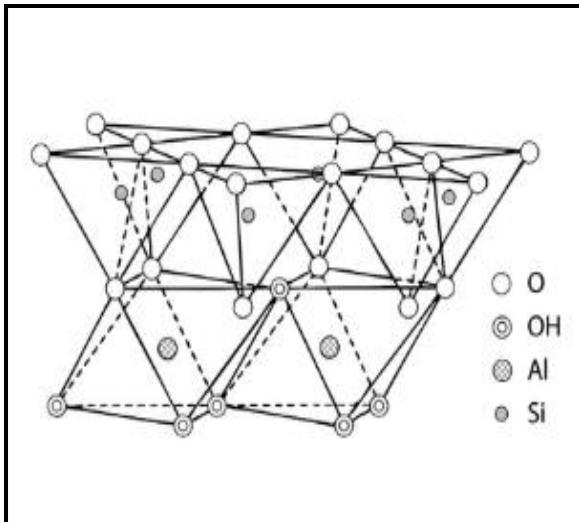
#### I.7.3.1. La kaolinite [5]

La kaolinite C'est une argile blanchâtre se forme dans les sols bien drainés, son feuillet est de type 1/1 elle est formée d'un feuillet tétraédrique (silice) et un feuillet octaédrique (aluminium) (Figure I.5), Les particules de kaolinite contiennent habituellement entre 70 et plus de 100 couches élémentaires, ce qui se traduit par une épaisseur variant entre 50 et 100 nm et qui peut même, dans certains cas, atteindre 2000 nm.

Les couches sont maintenues ensemble par des liens d'hydrogène<sup>1</sup> et les forces de Van der Waals<sup>2</sup>. Ces liens d'hydrogène étant très forts, l'eau qui est toujours présente dans les dépôts d'argile s'infiltrer difficilement entre les couches, qui peuvent alors s'empiler pour former des minéraux argileux très stables et relativement épais. C'est pourquoi la kaolinite à une surface Spécifique inférieure à celle de la plus part des minéraux argileux.

<sup>1</sup>Les liaisons hydrogène sont les liaisons intermoléculaires les plus intenses. Elles ne se créent que lorsque les molécules présentent une liaison covalente entre un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène, d'azote ou de fluor.

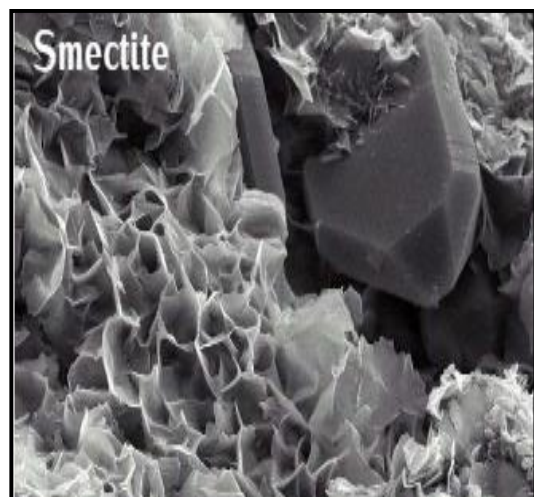
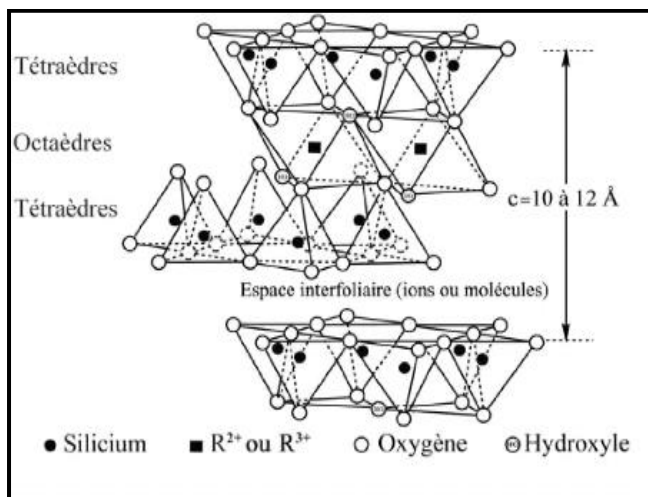
<sup>2</sup>Liaison de van der Waals est une interaction électrique de faible intensité entre atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal. Bien qu'il soit possible de décrire sommairement cette interaction en considérant les forces électriques qui sont présentes entre tous les couples de charges électriques qui forment ces atomes et ces molécules en définitive, c'est un phénomène qui ne peut bien se comprendre que dans le cadre de la physique quantique. Ces forces ont été nommées en l'honneur du physicien néerlandais Johannes Diderik van der Waals (1837 — 1923)



**Figure I.5.**Structure de la kaolinite (Grim;1962) **Figure I.6.**Photographie d'une kaolinite vue au microscope électronique

### I.7.3.2. La montmorillonite

C'est un minéral abondant. Elle est formée de couches élémentaires constituées de deux feuillets tétraédriques placés de part et d'autre d'un feuillet octaédrique (Figure I.7) contenant des atomes d'aluminium (gibbsite), c'est un feuillet 2 :1. Elle porte parfois le nom de smectite. Des molécules d'eau fortement attirées vers les surfaces chargées des feuillets tétraédriques assurant les liens entre les couches. Ces liens demeurent cependant plutôt faibles, car lorsque la quantité d'eau augmente dans le sol, les molécules d'eau peuvent s'infiltrer très facilement entre les couches et les séparer. Les particules de montmorillonite comptent généralement entre une et quelques couches élémentaires et ont une épaisseur variant de 1 à 10 nm ; elles se rangent parmi les plus fines chez les minéraux argileux. [8]



**Figure I.7.**Structure de la montmorillonite (Grim ;1962)

**Figure I.8.**Photographie d'une montmorillonite vue au microscope électronique

## I.7.3.3.L'illite

La structure de base des minéraux de cette famille résulte de l'association d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques, qui l'entourent (Figure I.9). Elle ressemble donc à la structure des Smectites. Ce pendant, le quart des cations  $Si^{4+}$  est remplacé par des cations  $Al^{3+}$ . Il en résulte un déficit de charges, compensé par l'adsorption d'ion de potassium  $K^+$ , qui s'intercalent entre les feuillets. [6]

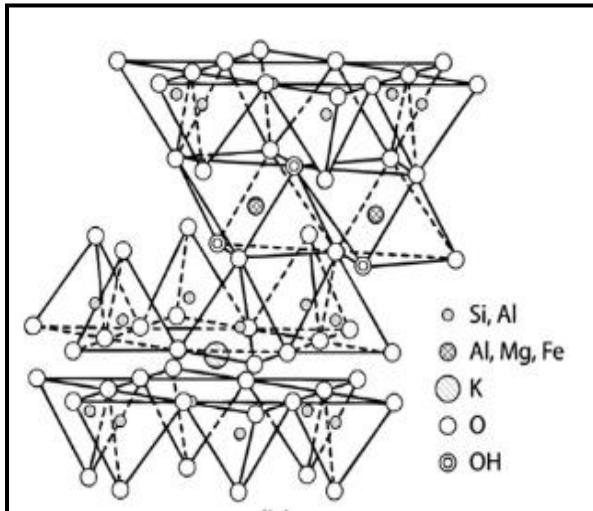


Figure I.9. Structure d'illite (Grim ,1962)

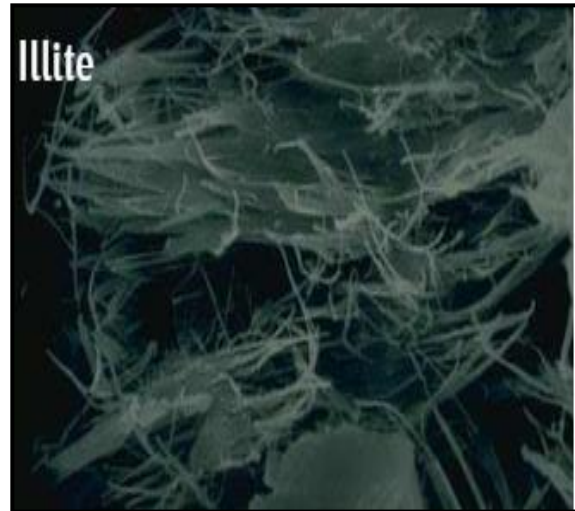


Figure I.10. Photographie d'une illite vue au microscope électronique

## I.7.3.4. Les chlorites

Les chlorites sont des argiles de composition semblable à celle des smectites. L'espace interfoliaire contient une couche composée de magnésium ( $Mg^{2+}$ ) et d'ions hydrogène ( $OH^-$ ). L'Aluminium ( $Al^{3+}$ ) est remplacé localement par le fer ( $Fe^{2+}$ ). La liaison interfoliaire est de ce fait, affaiblie, ce qui permet une infiltration d'eau. Les chlorites existent parfois souvent dans les roches magmatiques. Elles sont également rencontrées dans les roches sédimentaires. [9]

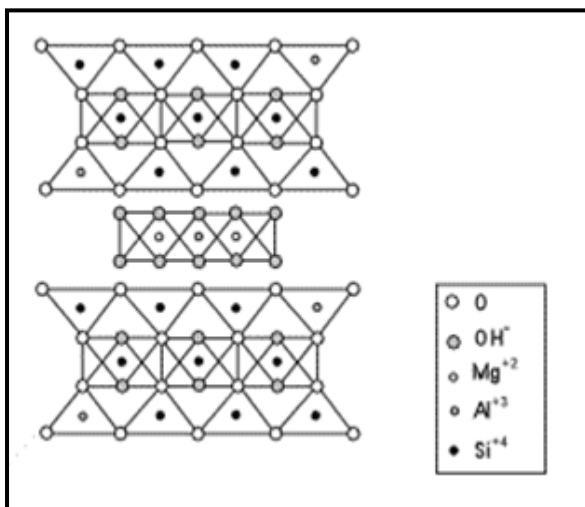


Figure I.11. Structure d'une chlorite

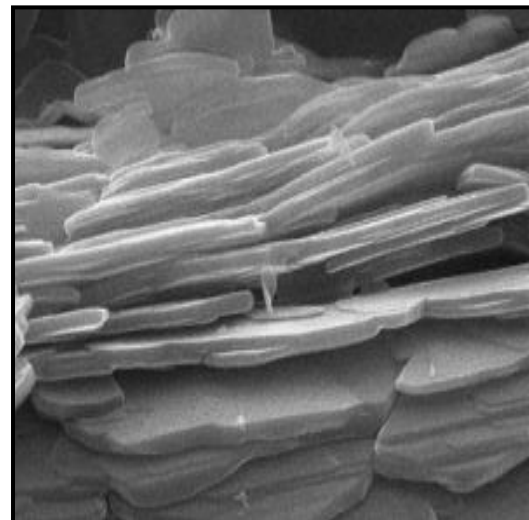





Figure I.12. Photographie d'une chlorite vue au microscope électronique

## CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux

Les caractéristiques de quelques minéraux argileux sont cités le tableau suivant :

**Tableau I.1.** Caractéristiques de quelques minéraux argileux [10]

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

### 1.7.4. Méthodes d'identification des minéraux argileux

L'identification des minéraux argileux nécessite le recours à un ensemble de moyens expérimentaux, chacun d'eux permettant de cerner tels ou tels paramètres spécifiques des minéraux.

#### a. Analyse par diffraction aux rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes, chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raie de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure cristalline [2]

#### b. L'analyse par différentielle thermique

C'est une technique qui consiste à chauffer continuellement un échantillon de sol inconnu en présence d'une substance inerte de référence, dans un four électrique, à une température d'environ cent degré Celsius. La structure particulière des minéraux argileux déterminera des variations thermiques à des températures bien définies pour des minéraux donnés; les variations enregistrées peuvent ensuite être comparées avec celles des minéraux connus. [8]

#### c. Analyse chimique

Sur les matériaux calcaires très purs, l'analyse chimique peut se faire par attaque de l'échantillon à l'acide diluée (HCl 1/20).

## CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux

---

Pour les sols non calcaires l'attaque sera effectuée par fusion alcaline à température élevée. [6]

### d. Spectrométrie infrarouge

La méthode apporte des informations qualitatives sur l'identification des espèces, l'évolution de la structure lors d'un traitement approprié et l'étude des hydrates. La préparation des échantillons s'effectue selon les techniques adaptées à l'étude des poudres. Chaque espèce argileuse peut être identifiée par son spectre d'absorption caractéristique. [8]

## I.8. Les principaux problèmes des sols argileux

### I.8.1. Phénomène de gonflement

Le gonflement de sol est un terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente, lié aux changements d'humidité des sols très argileux, qui sont capables de fixer l'eau disponible, mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse (phénomène de retrait).(figure I.13)

Le phénomène de retrait et de gonflement des sols argileux occasionne des dégâts considérables aux bâtiments. Il est à l'origine de tassements différentiels des terrains d'assise des constructions qui provoquent des désordres parfois très importants.

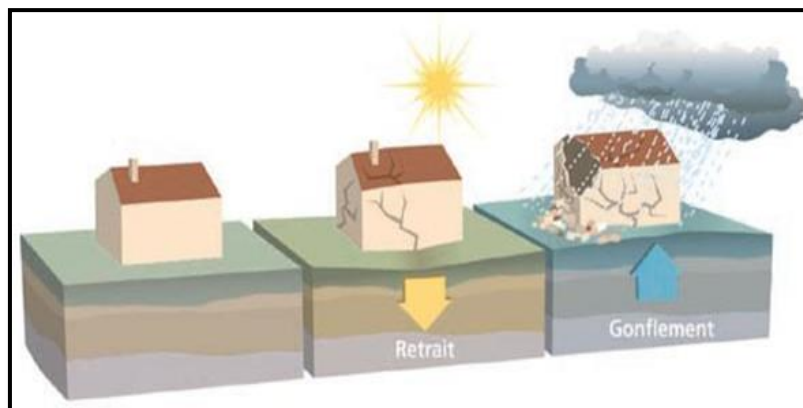


Figure I.13. Retrait-Gonflement

#### 1.8.1.1. Nature du phénomène de gonflement

En général, le retrait/gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols argileux lorsque leur teneur en eau se modifie. Cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Les limons sableux présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais d'une amplitude bien plus petite.

## CHAPITRE 1 : Généralités sur les sols argileux

---

Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité, elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche. [11]

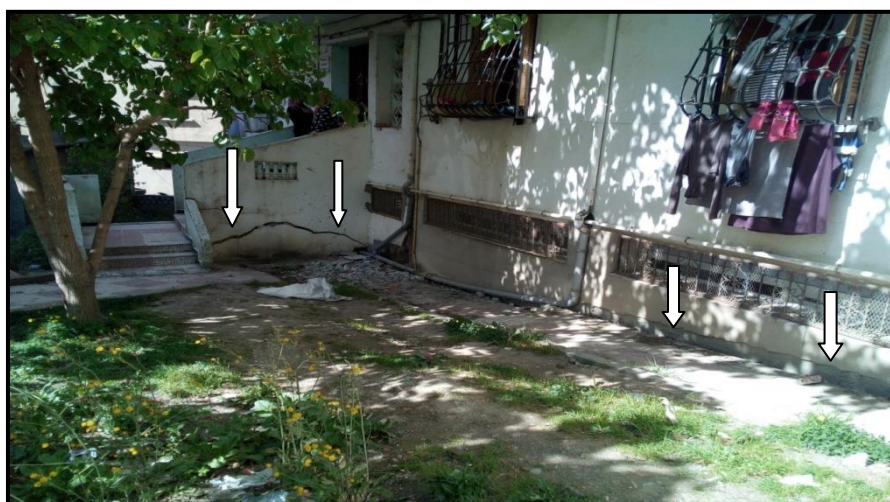
Les propriétés de gonflement des sols argileux dépendent fortement, de leur composition minéralogique, des pourcentages des différents minéraux ou des types de minéraux dominants, et de leur caractère dispersé. La structure du réseau cristallin des minéraux et leur capacité d'échange ionique joue également un rôle important. Les réseaux cristallins des minéraux argileux sont constitués de deux éléments structurels principaux, des silicates et des aluminates. [12]

### 1.8.1.2. Conséquences due au gonflement

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage.

#### ▪ Cas des bâtiments

Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants, présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radié... qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs. [13]



**Figure I.14.** Dégradations et fissurations des façades des bâtiments  
(Photo prise à Tizi-Ouzou)

#### ▪ Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée (Dégradation des routes). Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol .d'après Jennings (1962) il peut être attribue au climat et a la surcharge.

Autre désordres provoqués par se phénomène :

- Distorsion des portes et fenêtres ;
- Dislocation des dallages et des cloisons ;
- Rupture des canalisations enterrées ;
- Dés encastrement des éléments de charpente ou de chainage ;
- Décollement des éléments composites (carrelage, plâtre,...).

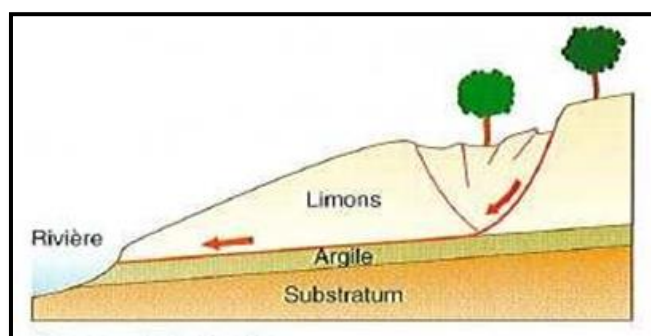


**Figure I.15.** Désordres due au gonflement (Photo prise à Tizi-Ouzou)

### I.8.2. Phénomène de glissement

Le glissement de terrain est un déplacement lent par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. Il peut-être superficiel ou profond.

Les glissements se caractérisent par la translation latérale d'une certaine masse de matériaux au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée et se produisent généralement dans des matériaux faiblement cohérents (marnes, argiles..). Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil.



**Figure I.16.** Glissement de terrain

Quelques désordres provoqués par ce phénomène

- Fissuration des maisons individuelles ;
- Déversement des structures, décollement, affaissement des terrasses, des escaliers...
- Décollement, fissuration des dallages intérieurs et extérieurs ;
- Déformation des réseaux enterrés ;
- Fissuration des murs de soutènement



**Figure I.17.** Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain (Azazga) [14]



**Figure I.18.** Fissuration d'une maison lors d'un glissement de terrain (Azazga) [15]

### I.8.3. Phénomène de tassement

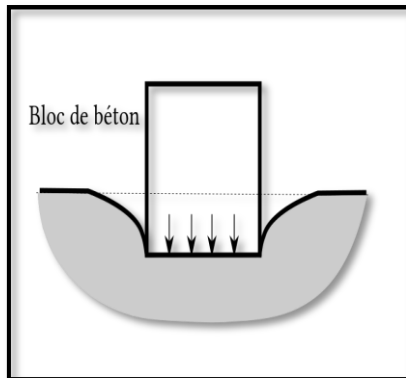
Le tassement par définition est la variation de hauteur d'une couche de sol sous l'effet d'une charge, C'est la déformation verticale du sol due à l'application des contraintes extérieures, Cette déformation dépend de plusieurs paramètres :

- ✓ Les charges appliquées ;
- ✓ La nature du sol ;
- ✓ Les dimensions et la forme des fondations ;
- ✓ Le temps ;
- ✓ La nature des fondations et de la structure.

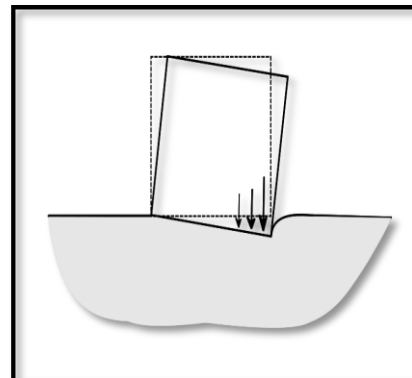
Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place.

**Le tassement uniforme :** les tassements uniformément repartis affectent peu la structure les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires tels les conduites d'eau et les passages souterrains.

**Le tassement différentiel** : est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations des maçonneries comme l'apparition de fissures. C'est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable.



**Figure I.19.** Tassement uniforme



**Figure I.20.** Tassement différentiel

### I.8.3.1. Origines du tassement du sol

Parmi les causes donnant naissance à des tassements différentiels, on peut citer :

- Hétérogénéité naturelle du sol.
- Approche des calculs de tassement qui donnent une valeur approchée de la valeur réelle.
- Fondations hétérogènes faites sans précautions spéciales (tassements différentiels)

## I.9. Conclusion

L'argile est un matériau complexe de par sa composition chimique; il existe de nombreuses argiles parmi lesquelles on recense la kaolinite, les smectites et l'illite. Ces trois dernières se différencient entre elles par les éléments d'insertion disposés entre les feuillets. Ces argiles sont très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions géotechniques.

## **Chapitre II**

---

### **Différentes techniques de stabilisation d'un sol**

### II.1. Introduction

Depuis quelques décennies, les sols argileux sont devenus un sujet d'intérêt des chercheurs et des ingénieurs géotechniciens, les dégâts engendrés par leur comportement sont énormes puisqu'ils se caractérisent par plusieurs propriétés qui les rendent complexe et ceci est dû principalement à leur structure minéralogique.

De nombreuses techniques ont été développées par ces ingénieurs au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols

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

Stabiliser un sol, au sens large du terme, consiste à modifier une des propriétés de ce sol en vue d'améliorer ces performances techniques, la stabilisation des sols est employée pour [16] :

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

### II.3. Les techniques de stabilisation

Une large variété de méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées sont :

- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation thermique ;
- La stabilisation hydraulique ;
- La stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Les considérations économiques ;
- La nature du sol à traiter ;
- La durée de l'opération ;
- La disponibilité des matériaux à utiliser ;
- Et les conditions d'environnement.

### II.3.1. Stabilisation mécanique

#### II.3.1.1. Le Compactage

Le compactage est une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont déterminées par l'essai Proctor normal, Les caractéristiques mesurées (La teneur optimale en eau ( $W_{OPN}$ ), et la densité sèche du sol la plus élevée ( $\rho_{OPN}$ )) sont utilisées lors des études de la stabilisation et aussi lors du chantier.

Les objectifs du compactage sont :

1. Limiter ou supprimer les vides (rapprochement des grains en modifiant leur arrangement) (Figure. II.1) ;
2. Diminue la perméabilité du sol compacté ;
3. Améliorer les caractéristiques mécaniques du sol.

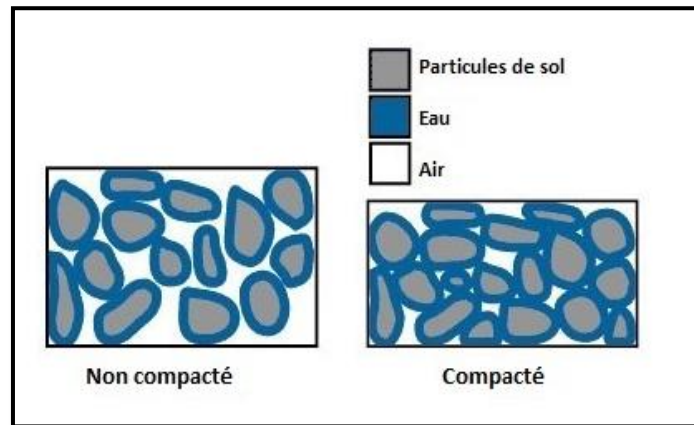


Figure II.1. Structure de sol avant et après compactage

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profit, par contre lorsque la teneur en eau est faible, l'eau a un rôle important, et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (Figure. II.2), les courbes de compactage varient avec la nature du sol (Figure. II.3)

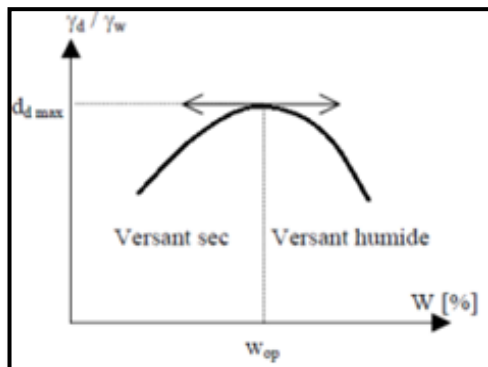


Figure II.2. Courbe de compactage

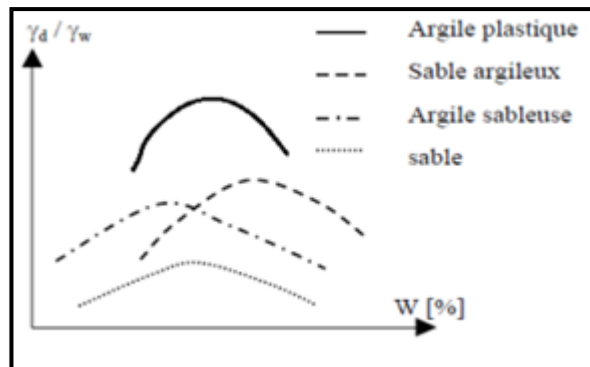


Figure II.3. Influence des types de sols sur le compactage

### II.3.1.2. Les modes de compactage

Les modes de compactage sont nombreux, les plus importants peuvent être dynamique, statique et par vibration.

#### II.3.1.2.1. compactage de surface

Le compactage de surface est utilisé généralement pour une profondeur maximale d'environ 3m. Il peut être exécuté sur des sols excavés ou des remblais placés en des couches minces. Les vibrations peuvent produire une densification additionnelle dans les sols présentant une cohésion. Le compactage provient d'un accroissement de la compacité du sol, et celui-ci est dû à un meilleur arrangement des grains et élimination des vides. Des études expérimentales montrent qu'un compactage approprié des sols réalisé sur des remblais ne tassera pas ou tassera très peu. Il y a donc un optimum de compactage à réaliser, c'est cet optimum que le laboratoire se propose de déterminer. [18]



**Figure II.4.** Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie)

#### II.3.1.2.2. Compactage dynamique

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes (Figure II.5). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées [18]



**Figure II.5.** Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).

### II.3.1.2.3. Vibrocompactage

La technique du vibrocompactage (ou compactage par résonance vibratoire) consiste en la vibration de profilés spécialement développés à l'aide de vibreurs verticaux fortement puissants à fréquence variable, installés et adéquatement fixés à la tête du profilé (Figure II.6), l'énergie vibratoire est transmise sur toute la longueur du profilé et provoquant le compactage du sol en place, sans qu'un matériau de remplacement soit nécessaire. Ce type de compactage fonctionne de façon optimale dans des sols sableux saturés, les vibrations font développer alors des pressions interstitielles. La mobilité des particules de sable augmente et elles se réorganisent donc plus facilement. [19]



**Figure II.6.** Vibrocompactage

Il est important de signaler que les nuisances vibratoires liées à l'utilisation des compacteurs vibrants doivent être prises en considération par les concepteurs d'infrastructures

### II.3.2. Stabilisation thermique [17]

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a pour

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

---

effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

**Cas des sols fins :** La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

**Cas des sols grenus :** La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet à une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée. (Figure II.7)

Le problème majeur de cette technique c'est que l'augmentation du volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut engendrer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.



**Figure II.7.** Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation

### II.3.3. stabilisations hydrauliques

#### II.3.3.1. Technique de drainage

Le drainage est la technique la plus simple, c'est une méthode classique et ancienne, les systèmes de drainage sont fabriqués de filtres d'agrégats poreux pour collecter l'eau et ensuite la drainer ailleurs. Les drains doivent être capables de drainer toute l'eau qui s'y infiltre sans provoquer une accumulation excessive de la charge (Figure II.8)

Les drains doivent être aussi conçus pour prévenir la migration des fines des sols adjacents et par la suite colmater les vides. Il est donc désirable de réduire la perte de charge due au flux à travers le filtre à une valeur basse compatible avec la granulométrie dictée. Le drain filtre d'agrégats peut être conçu par une couche d'agrégat fin gradué pour filtrer et d'une couche d'agrégat grossier à forte perméabilité pour drainer l'eau.

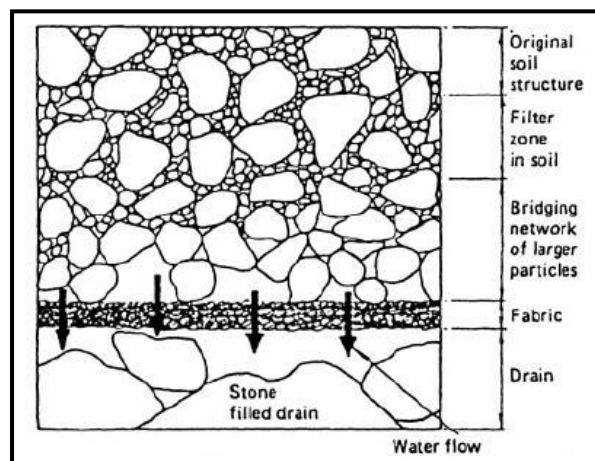


Figure II.8. Drain filtre [Bell, 1978].

### II.3.4. Stabilisation chimique

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que, les réactions d'échange de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (capacité portante) et de durabilité. [17]

Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé sur tout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en œuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

- Le ciment ;
- La chaux ;
- Les cendres volantes, laitier, pouzzolane naturelle et fumée de silice.....etc).

#### II.3.4.1. Utilisation de la chaux

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

La chaux est utilisée depuis l'antiquité, obtenue par la cuisson du calcaire ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) à une température d'environ  $900^\circ\text{C}$ . L'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente, cette technique permet : [20]

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

### II.3.4.1.1. Les différents types de chaux

- **La chaux vive** : est le produit direct de la combustion du calcaire, essentiellement de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), c'est la chaux la plus utilisée dans le traitement des matériaux humide.

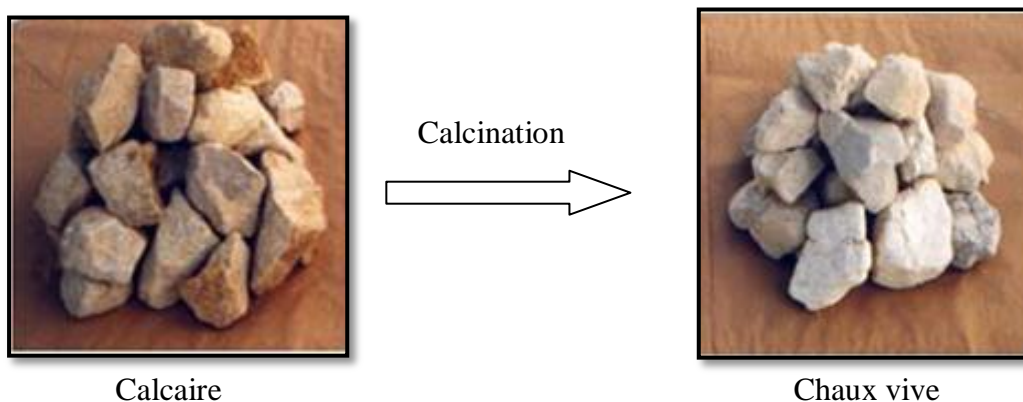
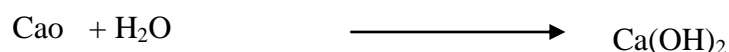
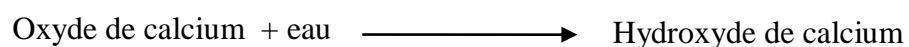
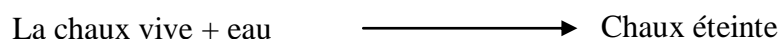


Figure II.9. Transformation du calcaire en chaux vive

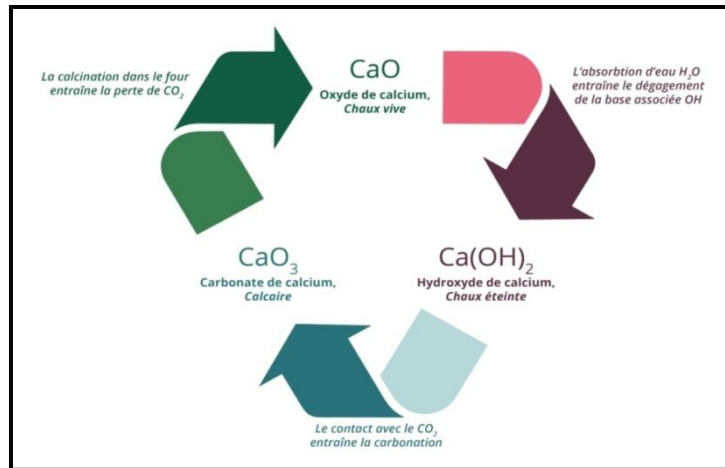
- **La chaux éteinte** : est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée en particulier d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), ce type de chaux est utilisée pour le traitement de matériaux à faible teneur en eau.



## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

- **Le lait de chaux** : c'est la chaux en forme plus concentrée et plus liquide et sa prise est très lente, elle est obtenue par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau comme elle peut être préparé à partir de la chaux vive, Elle est utilisée pour les traitements de matériaux secs. Son emploi a l'avantage est de supprimer la poussière et d'humidifier les ces sols

Le schéma suivant représente les étapes de fabrication de la chaux, depuis l'extraction du calcaire jusqu'à ce que la chaux éteinte fasse sa prise (Figure II.10)



**Figure II.10.** Cycle de la chaux

Le choix de la chaux s'effectue en se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient. Généralement, c'est la chaux vive qui est préférée car elle fournit plus d'ions de Ca<sup>2+</sup>, elle donne un produit plus dense et un abaissement de la teneur en eau important [20]

### II.3.4.1.2. Réaction sol-chaux

L'interaction entre le sol et la chaux dépend, entre autres, du pH du sol, de la quantité du carbone organique contenu dans le sol, des mouvements d'infiltration, et de la teneur du sol en calcaire, en gypse et en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) [22]

Les types de réactions pouvant se produire sont : l'échange cationique, la floculation, la carbonatation et la réaction pouzzolanique.

#### a. L'échange cationique

L'addition de chaux engendre un excès de cations de calcium divalents qui tendent à remplacer les cations monovalents (Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>). Les ions de calcium non échangés seront adsorbés, ce qui conduit à augmenter la densité en ions. C'est à dire une baisse dans la capacité d'échange des particules [21]

#### b. Floculation

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

---

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

---

d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation et de sa perméabilité [22]

L'échange cationique et la floculation : modifient la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol, et réduisent l'indice de plasticité [23]

### **c. Réaction pouzzolanique**

Cette réaction se produit entre la silice et/ou l'alumine du sol et la chaux pour former certains types d'agents de cimentation ou de solidification. Le résultat de ces réactions donne la part la plus importante dans l'augmentation de la résistance du mélange sol-chaux ; les propriétés acquises par le sol peuvent durer des années. Ce phénomène est la cause principale qui assure la bonne stabilisation du mélange sol chaux [24]

### **d. Carbonatation**

La carbonatation (formation de la calcite) de la chaux est une conséquence de la réaction produite entre la chaux et le CO<sub>2</sub>. Cette réaction pourrait se produire pendant la maturation des sols traités. [25]

#### **II.3.4.1.3. Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol [20]**

##### **a. Malaxage sur place**

Le procédé d'ajout de la chaux par malaxage avec le sol (Figure II.11) est utilisable pour des profondeurs de traitement inférieure à 50cm. La mise en œuvre est réalisée en période où le sol est sec ou peu humide. Le malaxage peut s'effectuer avec répétition pour améliorer le résultat. L'eau peut être introduite au fur et à mesure du malaxage si un compactage spécifique est requis. De même, l'utilisation de l'eau permet de stabiliser la chaux malaxée contre les vents après mise en place.

D'une manière générale, le traitement par malaxage en place présente les avantages suivants:

- Homogénéité du mélange;
- Réduction des émissions de poussière.



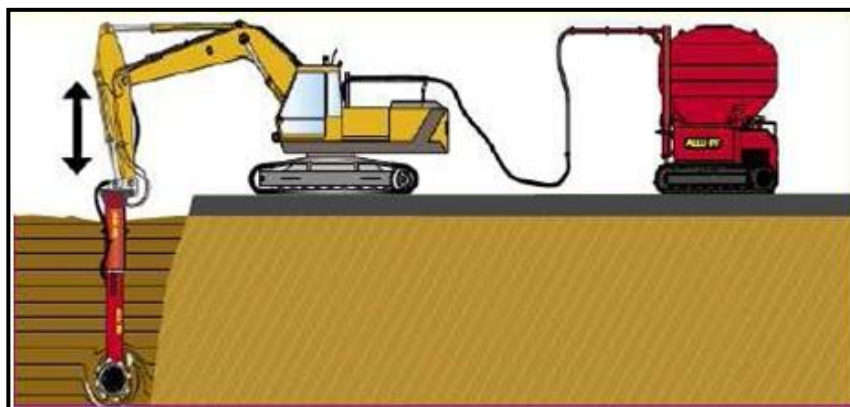
Figure II.11. Traitement par malaxage

### b. Technique d'injection

Le procédé de traitement par injection (Figure II.12) est utilisable en surface (cas a) ou en profondeur si le terrain est suffisamment meuble (cas b). L'injection en profondeur est souvent utilisée pour réduire la déformabilité du sous-sol.



(Cas a)



(Cas b)

Figure II.12. Technique par injection (cas a, cas b)

### c. Colonnes de chaux

La réalisation de colonnes de chaux dans le sol vise l'objectif d'absorber l'humidité pouvant atteindre le sous-sol. La mise en œuvre des colonnes de chaux est similaire à tout autre procédé de réalisation de pieux forés. Les diamètres des colonnes de chaux sont de l'ordre de 25 cm à 50 cm. Leurs profondeurs peuvent atteindre 5m à 8m selon la fermeté des sols. Les espacements entre les axes des pieux réalisés sont variables selon l'humidité dans le sol.

La réalisation de chaque colonne peut s'effectuer en battant un cylindre métallique creux. Le sol contenu dans le moule métallique est ensuite retiré pour être remplacé par de la chaux. A l'extraction du tube moule du sol, la chaux est mise directement en contact avec le sol. Elle commence à réagir si ce dernier lui permet l'humidité. Un dégagement de chaleur s'effectue à mesure que la chaux s'hydrate, ce qui permet de réduire l'humidité du sol par évapotranspiration.

#### II.3.4.2. Utilisation du ciment

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

D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

L'utilisation des ciments permet d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques par liaison des grains du sol.



Figure II.13. Processus de fabrication de ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques présentant une faible adaptation à la chaux. Le ciment rigidifie mieux et plus rapidement les sols comparativement à la chaux. De même, sa résistance au gel est meilleure. (Mitchell et

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

---

Raad (1973) ) remarquent que le faite d'appliquer les ciments portlands à des argiles très plastiques, sont moins efficaces comparativement à la chaux. En effet, les argiles gonflantes ont une affinité à l'eau tellement grande que le ciment ne peut pas s'hydrater suffisamment au point que les réactions pouzzolaniques s'achèvent complètement. Généralement, le ciment est avantageux d'être utilisé lorsque les sols ne sont pas réactifs à la chaux (Chen, 1988; Nelson et al, 1992).

Le mélange du ciment à l'eau initie un processus chimique d'hydratation qui forme une pâte dure. Quand les particules de ciment subissent l'hydratation, un gel cimentaire fin se forme autour des particules. Puisque le gel cimentaire est poreux et contenant de l'eau de cristallisation, son volume va augmenter plus que celui du ciment avant la réaction. Ainsi, dès que la réaction entre le ciment et l'eau se produit, les vides entre les particules du ciment se remplissent graduellement avec le gel. En même temps, la pâte du ciment augmente de densité et devient plus résistante [26]



**Figure II.14.** Malaxage de sol avec le ciment



**Figure II.15.** Mise en œuvre de sol ciment

### II.3.4.2.1. Types de ciment

La norme NF- EN 197-1 subdivise le ciment en cinq type en fonction de leur composition à savoir:

---

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

---

- Le ciment Portland (CEM I) ;
- Le ciment Portland composé (CEM II) ;
- Le ciment de haut-fourneau (CEM III) ;
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV) ;
- Et le ciment composé (CEM V).

### II.3.4.3. Traitement mixte (chaux et ciment)

Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux) et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire. Le traitement préalable à l'ajout du Ciment conjointement avec la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité.

Généralement, le sol est traité dans un premier temps avec la chaux. En préparation à l'ajout du ciment. Cette première étape permet d'assécher le sol par absorption et évaporation de l'eau et nécessite seulement une faible application de chaux de l'ordre de 1 %. Ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité rendant le sol friable et donc plus maniable. L'ajout du ciment vient ensuite fournir au mélange les pouzzolanes nécessaires afin que le sol puisse gagner de la résistance mécanique dans le temps. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de cet apport en ciment si les réactions pouzzolanique (stabilisation) sont désirées [20]

### II.3.4.4. Utilisation des cendres volantes

Les cendres volantes sont une poudre très fine se composant de particules sphériques d'un diamètre inférieur à 50 micromètres. Elles sont l'une des pouzzolanes les plus couramment utilisées dans l'industrie de la construction. Les pouzzolanes sont des matières siliceuses et alumino-siliceuses capables de former des composés cimentaires lorsqu'ils sont mélangés à la chaux [hydroxyde de calcium -  $\text{Ca(OH)}_2$ ] et à l'eau. [20]

L'addition des cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Par conséquent. Tout dépendant du type de sol, l'addition de cendres volantes et de chaux peut donner de meilleurs résultats qu'avec la chaux seule (Davidson et al, 1962). Ainsi, un mélange de cendres volantes et de chaux semble avoir les propriétés d'un liant hydraulique, soit d'être capable de durcir non seulement dans l'air, mais également dans l'eau (Lav et al, 1997). Avec un bon dosage. L'addition des cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques d'un sol notamment sa résistance au cisaillement [20]

La stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes permet de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement avec une amélioration de la texture. [23]

### II.3.4.5. Influence de la chaux sur le sol [17]

#### II.3.4.5.1. Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg

Les travaux effectués par George et al. (1992) ont permis d'observer que lorsqu'un sol est traité avec la chaux il ya une diminution notable de l'indice de plasticité. De plus, la limite

## CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol

de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité (Tableau II.1).

**Tableau II.1.** Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg [George et al. 1992].

	Chaux (%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)
sol A	0	55.0	30.0	25.0
	6	56.1	39.3	16.8
Sol B	0	26.5	19.4	7.1
	9	28.0	24.5	3.5

Les travaux effectués par Ola (1977) montrent que l'indice de plasticité après addition de 10 % de chaux au sol instable a montré une diminution de 17.8 % à 1.3 % (Tableau II.2)

**Tableaux II.2-** Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg [Ola 1977].

Chaux (%)	Limite de liquidité(%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)
0	36.0	18.2	17.8
2	36.5	22.8	13.7
4	37.2	28.0	9.2
6	38.0	31.8	6.2
8	38.5	36.5	2.0
10	41.5	40.2	1.3

### II.3.4.5.2. Influence de la chaux sur les caractéristiques du compactage

Plusieurs études ont été conduites par différents chercheurs [Ola 1977, George et al. 1992, Eren and Filiz 2009, Bozbey and Garaisayev 2010] pour étudier l'effet de l'addition de la chaux au sol à traiter sur les caractéristiques de compactage à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Ajouter de la chaux au mauvais sol provoque une réduction de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale (Figure II.16)

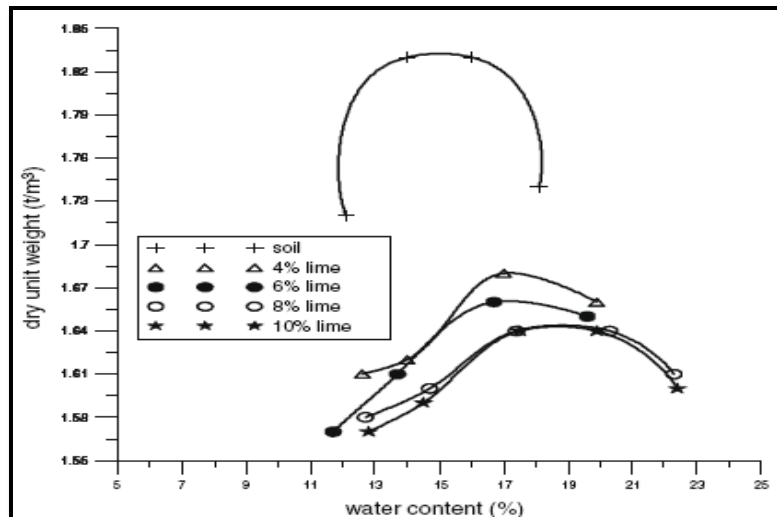


Figure II.16. Variation des caractéristiques de compactage des mélanges sol-chaux [Eren and Filiz 2009].

### II.3.4.5.3. Influence de la chaux sur les paramètres de la résistance au cisaillement

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols instables à traiter. Plusieurs chercheurs [Osula 1991, Gay and Schad 2000, Muntohar and Hantoro 2000, Bagherpour and Choobbasti 2003, Lin et al. 2007] ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la chaux provoque une augmentation de la résistance au cisaillement de ces sols traités par rapport aux sols naturels. La période de cure est un facteur important dans l'évolution de la résistance au cisaillement des échantillons traités. L'augmentation de la cohésion est attribuée à la cimentation des particules tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules (Figure II.17) [3]

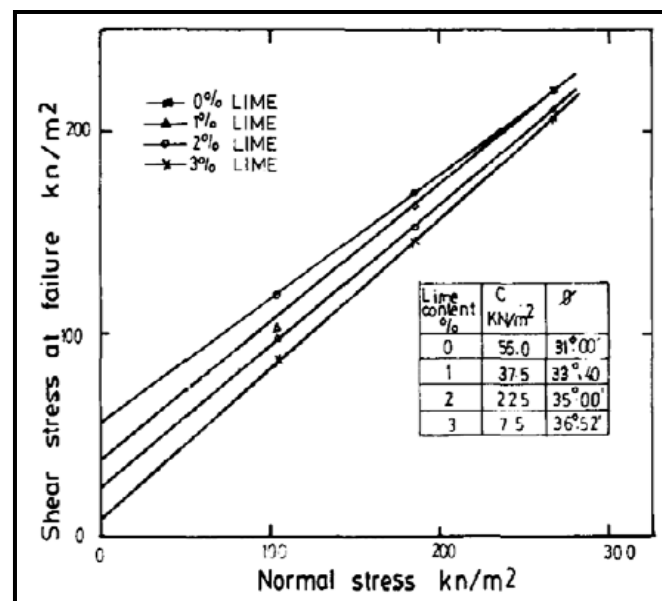


Figure II.17. Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991].

### II.3.4.6. Influence du ciment sur le sol [7]

#### II.3.4.6.1. Influence du ciment sur les limites d'Atterberg

Le ciment portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories des sols considérés comme instables. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment portland comme stabilisants certaines distinctions doivent être identifiées en passant en revue des travaux de recherche effectués à travers le monde sur l'influence du ciment sur la plasticité des sols. Plusieurs chercheurs [Osula 1991, Al Rawas et al. 2005, Basha et al. 2005, Kalkan 2006, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] ont postulé que l'addition du ciment au sol fait diminuer l'indice de plasticité d'une façon remarquable.

De plus, Osula (1991) a montré que l'addition du ciment a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution de l'indice de plasticité indique une amélioration de la maniabilité du sol instable. Pour cela une addition de 3% de ciment est suffisante pour augmenter la maniabilité en réduisant l'indice de plasticité de 21.7% à 12.7%. Le même comportement est observé par Basha et al. (Figure II.18)

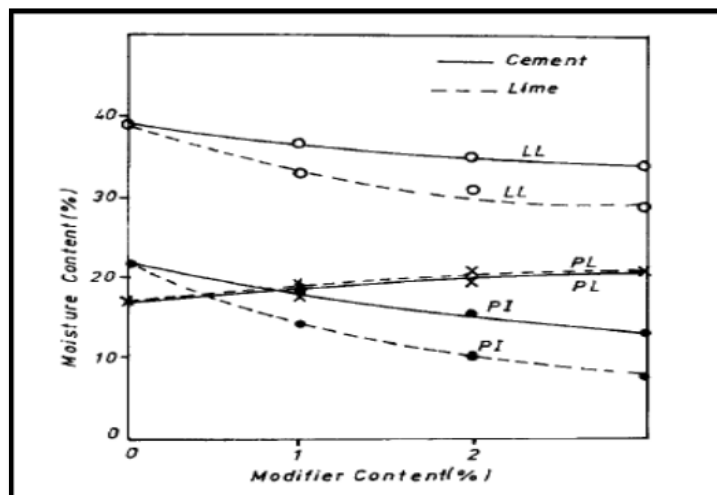


Figure II.18. Effet de la chaux et de ciment sur les limites d'Atterberg [Osula1991]

#### II.3.4.6.2. Influence du ciment sur les caractéristiques du compactage

Plusieurs chercheurs [Rahman 1986, Bell 1994, Osula 1996, Gay and Schad 2000, Basha et al. 2003, Sivapullaiah et al. 2003, Basha et al. 2005, Hossain et al. 2006, Hossain et al. 2007, Mu'Azu 2007, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009] se sont penchés sur l'étude de l'effet de l'addition du ciment comme stabilisant aux sols à traiter sur les caractéristiques de compactage de ces sols améliorés. Le même comportement est constaté que pour les sols traités à la chaux. Autrement dit, la réduction de la densité sèche maximale est due à la floculation et l'agglomération des particules d'argile tandis que l'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'eau nécessaire pour l'hydratation et pour la réaction pouzzolanique à prendre effet. Miller and Azad (2000) ont observé le même comportement.

## **CHAPITRE II : Différentes techniques de stabilisation d'un sol**

---

Les auteurs ont constaté une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale pour différentes teneurs du stabilisant.

### **II.4. Conclusion**

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

Pour l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode de stabilisation il faut penser à des techniques pratiques de mise en œuvre sur le site et celles dont le prix revient sont les moins élevés, afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

# **Chapitre III**

---

## **Identification du sol étudié**

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'identification de matériau étudié et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil pour un sol prélevé dans une zone située à la wilaya de TIZI OUZOU.

### III.2. Situation géographique de site étudié

Le sol étudié est prélevé dans une zone située au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation de la commune de Tizi-Ouzou. Ce sol est prélevé à la surface mais comme le site a subi des terrassements, et des travaux ont été effectués pour la réalisation d'un mur de soutènement (figure III.2) alors on peut estimer la profondeur du sol comprise entre 5 à 8 m.



**Figure III.1.** Le site de prélèvement



**Figure III.2.** Réalisation de mur de soutènement sur le site étudié

### III.3. Préparation de l'échantillon

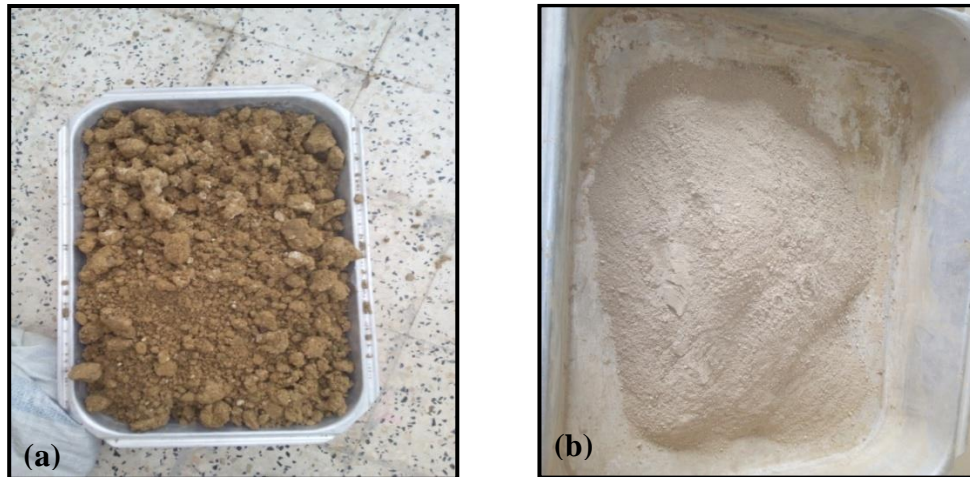
Le matériau est préparé de manière à ne pas modifier ces caractéristiques, Après prélèvement du sol, des échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température de 50°C. Ensuite concassé et tamisé.



**Figure III.3.** Des échantillons soumis au séchage (a) ; une étuve (b)



**Figure III.4.** Un Concasseur



**Figure III.5.** Argile avant concassage (a) ; Argile après concassage et tamisage (b).

Par la suite, une série d'essai à été réalisée au laboratoire de mécanique des sols de la faculté de génie civil-MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou permettant l'identification du sol étudié. Cette étude comporte les différents essais suivants :

- La détermination des paramètres d'état (teneur en eau, poids volumiques humide et sec) ;
- Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et de plasticité, indice de plasticité) pour caractériser la consistance du sol et permettre de ce fait de le classer ;
- Analyse granulométriques par sédimentation ;
- Essais à la tache au bleu de méthylène ;
- Les essais mécaniques.

### III.4. Essais d'identification

#### III.4.1. Paramètres d'état

##### III.4.1.1. La teneur en eau (NF P 94-049-1)

Selon la norme (NF P 94-049-1), la teneur en eau pondérale (W) est rapport de la masse de l'eau interstitielle ( $m_w$ ) par la masse des grains solides ( $m_d$ ).

$$W (\%) = \frac{m_w}{m_d} * 100 = \frac{m - m_d}{m_d} * 100$$

Avec :

m : masse de sol humide

$m_w$  : masse d'eau

$m_d$  : masse de sol sec

Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau III.1

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

Tableau III.1. Les résultats de la teneur en eau

N° d'Echantillons	Masse humide + tare	Masse sèche + tare	Masse de la tare	Teneur en eau W (%)	La moyenne W (%)
1	320.1	280.6	97.8	21.60	22.14
2	308.0	268.8	96.2	22.71	
3	335.2	291.0	98.9	23	
4	666.5	591.4	234.6	21.25	

### III.4.1.2. La Masse volumique

#### a. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols (NF P 94-054)

Selon la norme NF P 94-054. La masse volumique des particules solides est déterminée à l'aide du pycnomètre (Figure III.6), elle s'applique sur des échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2 mm.



Figure III.6. Pycnomètre utilisé

La densité des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{\rho_w (m_2 - m_1)}{m_4 + m_2 - m_1 - m_3}$$

Avec :

$m_1$  : masse du pycnomètre vide + bouchon ;

$m_2$  : masse du pycnomètre + bouchon + échantillon ;

$m_3$  : masse du pycnomètre + bouchon + eau + échantillon ;

$m_4$  : masse du pycnomètre + bouchon + eau ;

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau égale à 1000kg/m<sup>3</sup>.

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

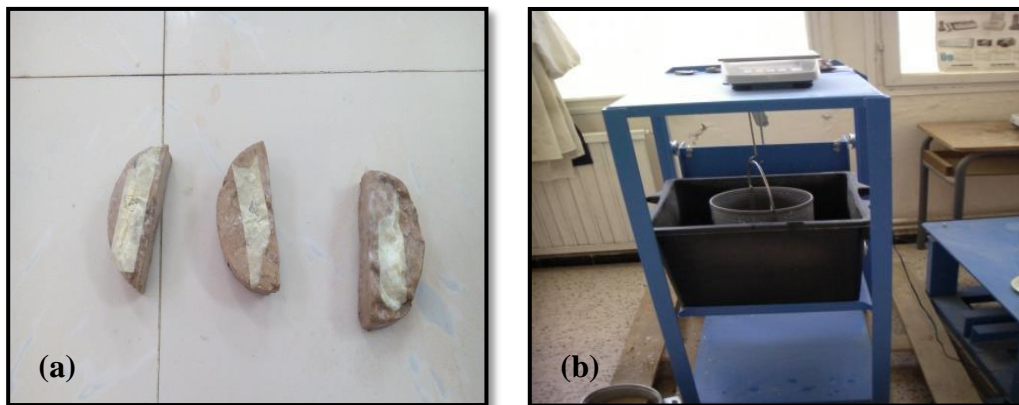
Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau III.2.

**Tableau III.2.** Résultats de la masse volumique des particules solides

$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$m_4$ (g)	$\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
202.4	252.4	785	761.6	1	1.879

### b. Détermination de la masse volumique humide (NF P 94-053)

L'échantillon soumis à l'essai doit avoir une forme simple afin de pouvoir être paraffiné facilement. Au besoin, il est taillé, afin d'avoir une masse comprise entre 0,1 et 0,5 kg (Figure III.7)



**Figure III.7.** Échantillon paraffiné (a) ; Pesée hydrostatique (b)

Les résultats de la masse volumique humide sont présentés dans le tableau III.3

**Tableau III.3.** Les résultats de la masse volumique ph

N	1	2	3
Masse de l'échantillon humide (g)	161.936	187.095	193.646
Masse humide d'échantillon Paraffiné à l'air (g)	167.464	192.492	201.587
Masse de l'échantillon paraffiné immergé(g)	78.5	91.5	89.3
Masse de la paraffine (g)	5.528	5.397	7.941
Volume brut (cm <sup>3</sup> )	88.964	100.992	112.287
Volume de la Paraffine(cm <sup>3</sup> )	6.211	6.064	8.922
Volume net (cm <sup>3</sup> )	82.753	94.928	103.365
$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.95	1.97	1.87
$\rho_h$ moy(g/cm <sup>3</sup> )	1.93		

### III.4.2. Limite d'Atterberg (NF P 94-051)

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

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité ( $W_l$ ),
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité ( $W_p$ ).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec. La différence

entre la limite de liquidité et de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité.



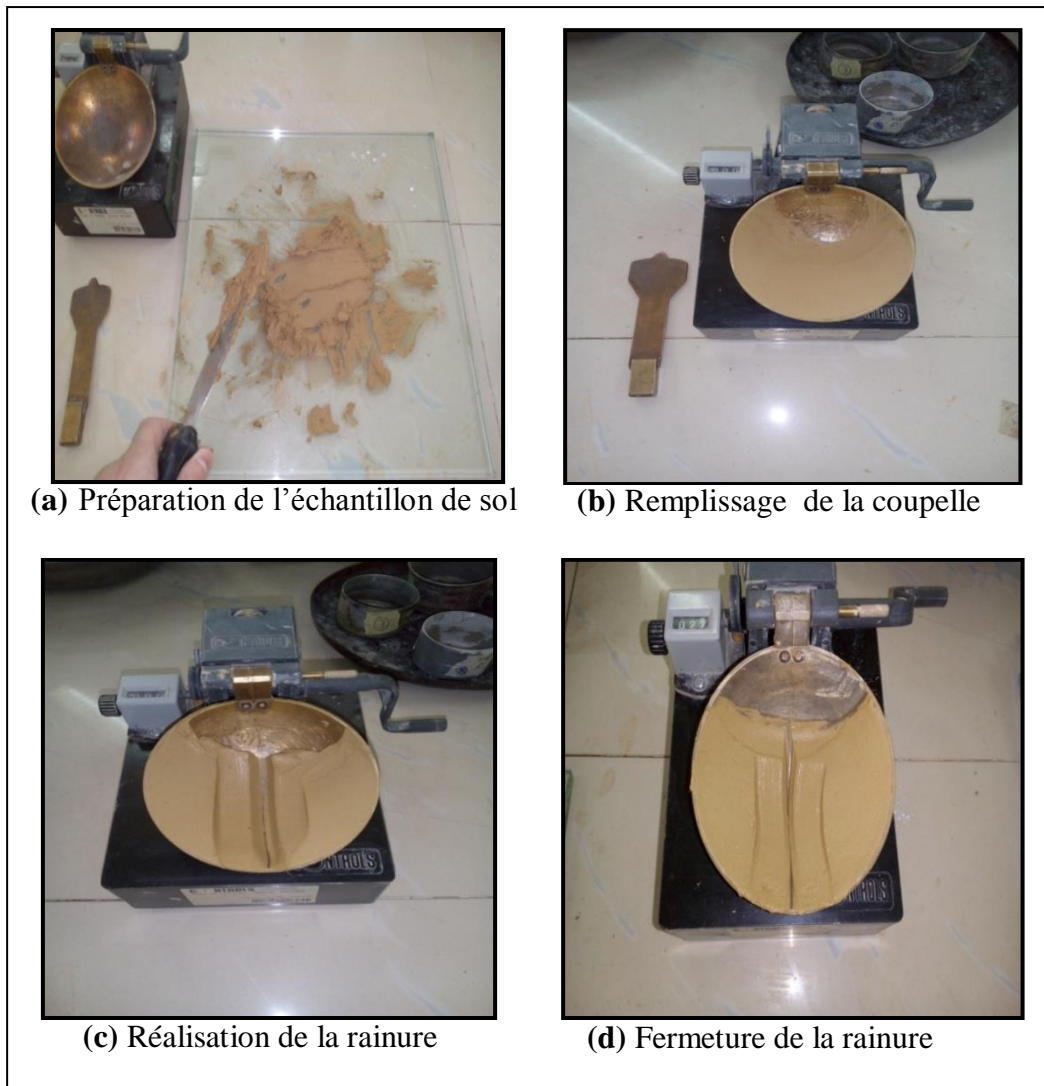
Figure III.8. Dispositif d'essai de limite de liquidité

#### a. Détermination de la limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à fermeture d'un cm (1cm) des lèvres de la rainure après 25 chocs.

La limite de liquidité se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est constitué d'une coupelle dans laquelle on met l'échantillon et d'une came mue par une manivelle qui soulève la coupelle et la laisse brusquement retomber sur un socle rigide. On étale environ 70g de sol dans la coupelle (**b**), puis avec l'outil à rainure on creuse au milieu de la coupelle un sillon dans la pâte (**c**). On soumet alors la coupelle à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1(cm) (**d**).

### CHAPITRE III : Identification du sol étudié



**Figure III.9.** Détermination de la limite de liquidité

Les résultats d'essai obtenus au laboratoire sont présentés dans le tableau III.4

**Tableau III.4.** Résultats de la limite de liquidité

N° de la tare	Nombre de coup	Masse de la tare	Masse humide + tare	Masse sèche+ tare	Teneur en eau (%)
1	20	17.567	22.402	20.905	44.84
2	22	17.845	26.743	24.062	43.12
3	29	20.959	31.864	28.681	41.21
4	34	26.945	33.424	31.587	39.57

On trace la courbe de la teneur en eau en fonction de nombre des coups, on tire  $W_L$  à 25 coups à l'échelle logarithme :

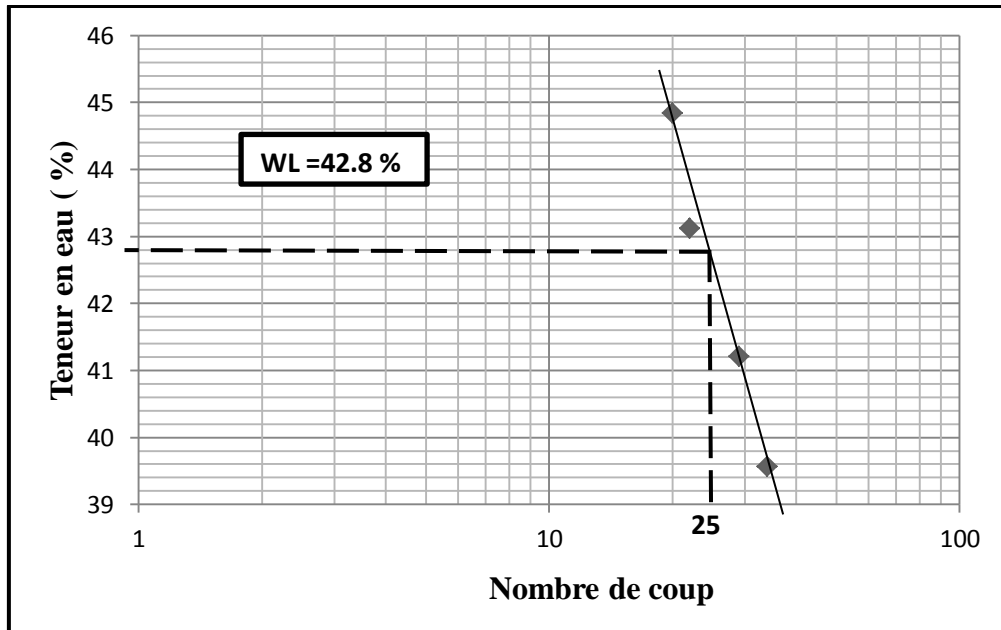


Figure III.10. La limite de liquidité

### b. Détermination de la limite de plasticité

On prélève une portion d'échantillon préparée auparavant afin de former une boule. Celle-ci est roulée à la main sur une plaque lisse, le but d'obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. Au moment où il atteint 3 mm de diamètre, le rouleau doit mesurer environ 10 à 15 cm de long (Figure III.11). La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément le rouleau se fissure et que son diamètre est de 3 mm  $\pm 0.5$  mm

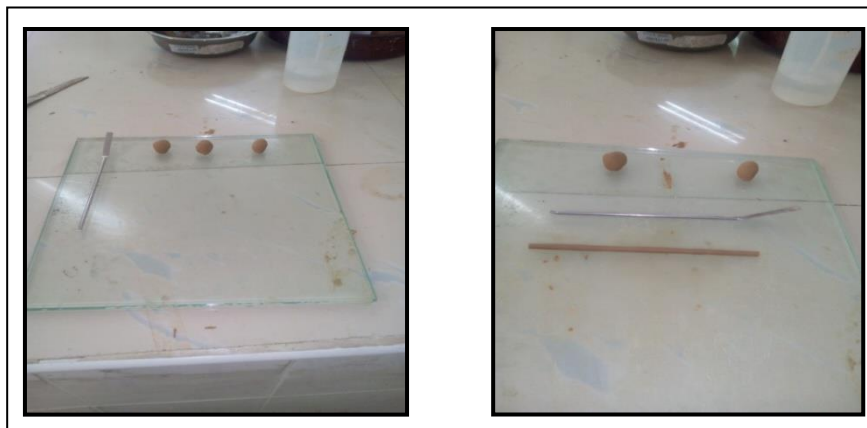


Figure III.11. Détermination de la limite de plasticité

Une fois les fissures apparues, le central du rouleau est prélevé et placé dans une boîte et peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.

Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

Les résultats d'essai obtenus au laboratoire sont présentés dans le tableau III.5

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

**Tableau III.5.** Résultats de la limite de plasticité

N° de la tare	Masse de la tare (g)	Masse humide + tare (g)	Masse sèche+ tare(g)	Wp (%)	Wp(%) moyenne
1	84.95	9.847	9.577	24.953	23.97
2	8.570	10.142	9.841	23.682	
3	26.967	27.920	27.740	23.285	

### c. Détermination de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité (IP) représente la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité, cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p (\%) = W_L - W_p$$

**Tableau III.6.** Résultats de l'indice de plasticité

<b>La limite de liquidité <math>W_L</math>(%)</b>	42.8%
<b>La limite de plasticité <math>W_P</math> (%)</b>	23.97%
<b>L'indice de plasticité <math>I_p</math></b>	18.83 %

Selon le diagramme de Casagrande (Figure III.12) et le tableau III.7 on peut classer le sol étudié comme étant sol argileux peu plastique.

**Tableau III.7.** Classification de sol selon l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Sol non plastique
$5 < IP < 30$	Sol peu plastique
$30 < IP < 50$	Sol plastique
$< IP < 50$	Sol très plastique

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

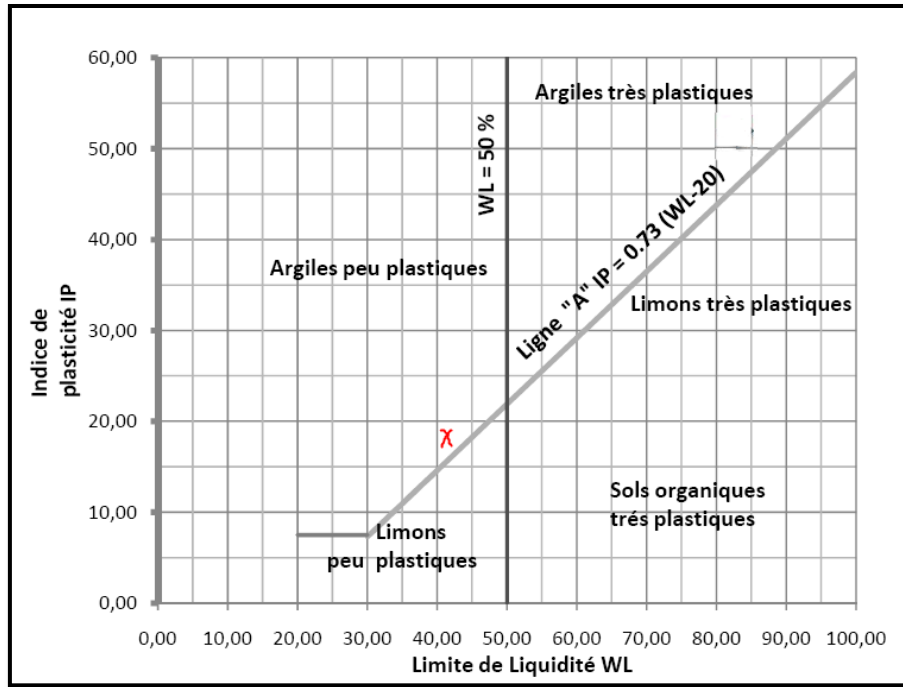


Figure III.12. Diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert, 1997).

### d. Détermination de l'indice de consistance $I_c$

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

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$$

Avec :

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

$$I_c = \frac{42,8 - 22,14}{18,83} = 1,09$$

Tableau III.8. Etat du sol en fonction de l'indice de consistance (J.M. TCHOUANINANA (1999))

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

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

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

### III.4.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-057)

L'analyse granulométrique est un essai qui consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à  $80 \mu\text{m}$ , la séparation se fait par tamisage. Au delà on utilise le tamisage par sédimentométrie.

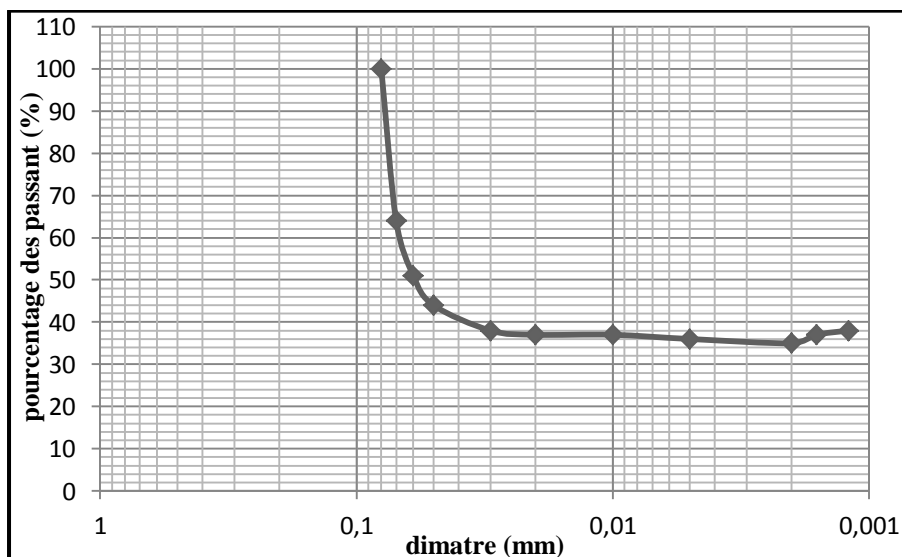
L'analyse granulométrique par sédimentométrie, complète le tamisage pour déterminer la répartition selon le diamètre des grains de fraction fine de sol inférieure à  $80 \mu\text{m}$



Figure III.13. L'analyse granulométrique par sédimentation

Cette analyse a été effectuée au laboratoire LCTP (Laboratoire Central Des Travaux Publics) de TIZI OUZOU

Les résultats d'essai sont présentés ci-dessous :



Tamis (mm)	Tamisats %
0.08	100
0.07	64
0.06	51
0.05	44
0.03	38
0.02	37
0.01	37
0.0016	37
0.0012	38
0.005	36
0.002	35

Figure III.14. Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

---

### III.4.4. Les essais chimiques

#### III.4.4.1 Analyse chimique

L'analyse chimique est une méthode d'identification d'un sol qui nous permet de déterminer la quantité de :

- Sulfates ;
- Chlorures ;
- Carbonates;
- Et Anhydride carbonique

Cette analyse a été effectuée au laboratoire LCTP (Laboratoire Central Des Travaux Publics) de TIZI OUZOU

Les résultats de l'analyse chimique sont donnés dans le tableau III.9

**Tableau III.9.** Résultats de l'analyse chimique (2018)

Composants	Pourcentage %
Sulfates( $\text{CaSO}_4$ , $2\text{H}_2\text{O}$ )	Traces
Chlorures (NaCl)	0.29 %
Carbonates ( $\text{CaCO}_3$ )	17.24 %
Anhydride carbonique	7.59 %

**Tableau III.10.** classification de sol selon La teneur en  $\text{CaCO}_3$  ( S.LEROUIL, J.P MAGNAN et F.TAVEN)

$\text{CaCO}_3$ (%)	Nature de sol
0 à 10%	Argile
10 à 30%	Argile marneuse
30 à 70%	Marne
70 à 90%	Calcaire marneux
90 à 100%	Calcaire

D'après le taux de carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) trouvé, le sol étudié est une argile marneuse

#### III.4.4.2. L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

Cet essai (NF P 94-068) est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par absorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à la saturation.

### III.4.4.2.1. Préparation de l'échantillon

L'essai a été effectué sur un échantillon de fraction inférieure à 5mm car ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 50 g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 400 ml d'eau déminéralisée et dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes tournant à 600 tr/min pendant au moins 10 minutes (Figure III.15). Pour la suite de l'essai, la vitesse de rotation est maintenue à 300 tr/min. Le dosage consiste à injecter successivement des quantités précises de bleu de méthylène dans la suspension jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test à la tache permet de repérer l'instant de cette saturation.

On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm) (Figure III.16)

Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif,
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu; le test est positif.



Figure III.15. Agitateur

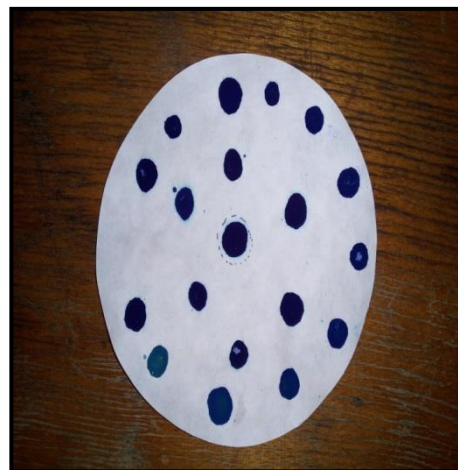


Figure III.16. Test de la tache sur papier filtre

Pour les matériaux dont le  $D_{\max}$  est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = 100 * \frac{B}{m_0}$$
$$B = V_b * 0.01$$

Avec :

$m_0$  : Masse sèche de la prise d'essai

$V_b$  : Le volume de la solution de bleu utilisée

Les résultats d'essai à la tache au bleu sont présentés dans le tableau III.11

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

**Tableau III.11.** Résultat de l'essai de bleu de méthylène

Mh (g)	$m_0$	$V_b$	$B=V_b * 0.01$	VBS
70	57.311	380	3.8	6.63

selon la classification des sols [Norme NF P 11 300 et G.T.R ] (Tableau III.12) . Le sol étudié est classé comme sol argileux

**Tableau III.12.** Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène [d'après la norme française (NF P 11-300) et le GTR

Valeur de bleu de méthylène VBS	Catégorie de sol
$VBS < 0.1$	Sol insensible a l'eau
$0.2 \leq VBS < 1.5$	Sol sablo limoneux, sensible a l'eau
$1.5 \leq VBS < 2.5$	Sol sablo argileux, peu plastique
$2.5 \leq VBS < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq VBS < 8$	Sol argileux
$VBS < 8$	Sol très argileux

### III.4.5. Les essais mécanique

#### III.4.5.1 Essai Proctor (NF P 94-093)

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté au laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau ( $w$  exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche  $\rho_d$  en  $g/cm^3$  ou en  $kg/m^3$ ). Pour l'essai Proctor normal, le remplissage se fait en 03couches

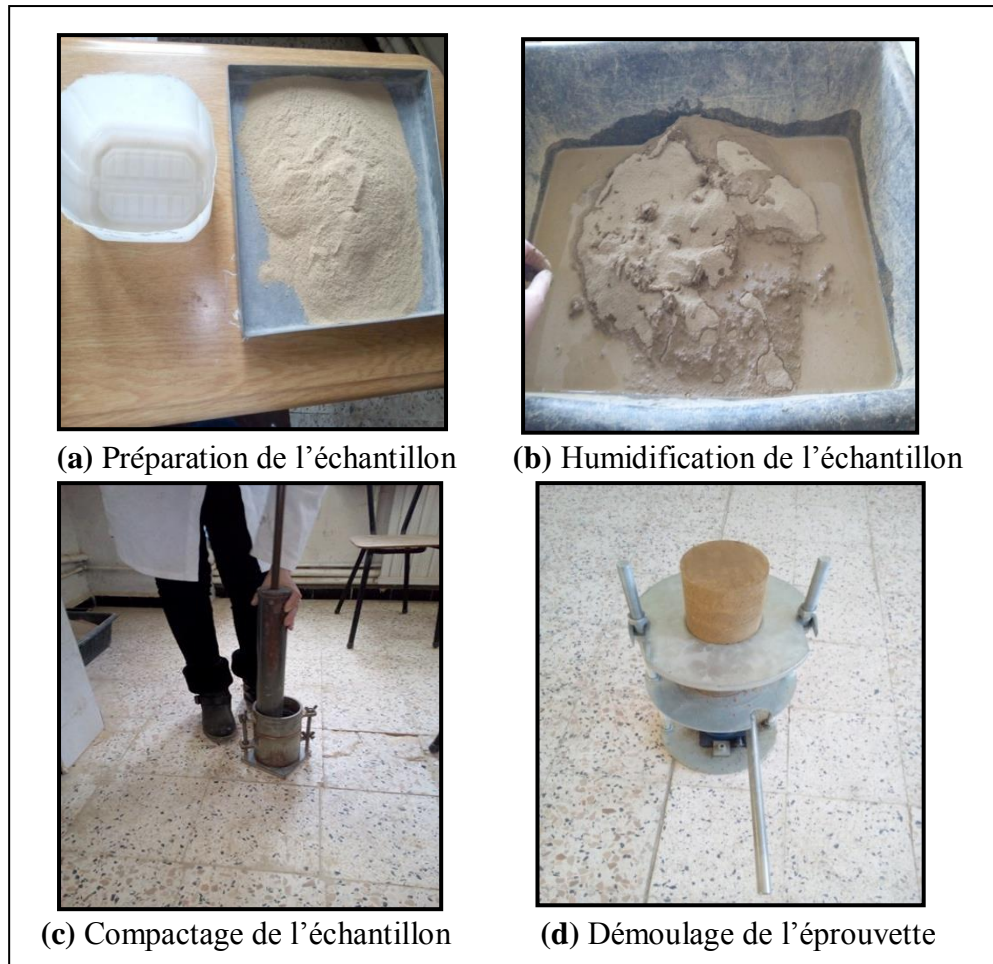


**Figure III.17.**Dispositif de l'essai Proctor

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

### III.4.5.1.1. Principe de l'essai

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et le compacter à chacune de ces teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.



**Figure III.18.** Principe de l'essai Proctor

Les résultats de l'essai Proctor sont présentés dans le tableau III.13

**Tableau III.13.** Les résultats de l'essai Proctor

Pourcentage d'eau ajouté (%)	Masse humide (g)	Masse sèche (g)	Teneur en eau (%)	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
14	1843	1617	13.97	1.712
16	1896	1652	14.76	1.75
18	1919	1642	16.86	1.739
20	1897	1640	15.67	1.737

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

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

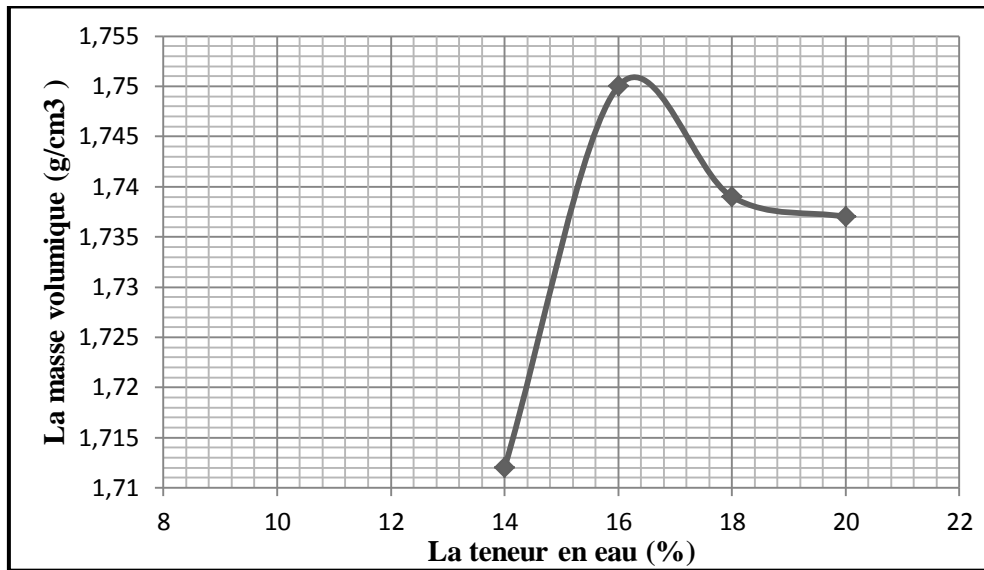


Figure III.19. Courbe essai Proctor

La courbe Proctor du sol étudié présente une forme en cloche (pointue) (Figure III.19) ce qui montre la sensibilité du matériau à l'eau. La valeur de la densité sèche  $\gamma_{dmax} = 1,751$  (g/cm<sup>3</sup>), et la teneur en eau optimale correspondante égale à 16,3 %.

### III.4.5.2 Essais CBR (California Bearing Ratiotest) (NF P 94- 078 )

Le C.B.R est un essai de poinçonnement réalisé dans des conditions bien définies, sur des échantillons moulés suivant la méthode de Proctor modifié, avec des énergies et des teneurs en eau déterminées.

Cet essai a pour but, d'évaluer la portance d'un sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou les assises de chaussées et pour la confection des remblais et les couches de forme, en fonction de sa teneur en eau.

#### III.4.5.2.1. Détermination de l'indice portant immédiat (IPI)

##### a. Principe de l'essai

L'essai consiste à poinçonner par un piston des échantillons de sol compactés selon la norme NF P 94-078, l'échantillon est ensuite soumis à un poinçonnement par application à vitesse constante (1,27mm/min), d'un piston cylindrique de 4,9cm de diamètre, et on mesure la relation (effort de poinçonnement – enfoncement).

### CHAPITRE III : Identification du sol étudié



Figure III.20. Appareil de poinçonnement



Figure III.21. Eprouvette après poinçonnement

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2.5 et 5 m, sont alors rapportées aux valeurs 13.35 et 20 KN, qui sont les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. Par convention, l'indice portant immédiat IPI exprimé en pourcentage, est la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$I (2.5) = \frac{\text{effort de penetration à 2.5 mm d'enfoncement(en KN)}*100}{13.35}$$

$$I (5) = \frac{\text{effort de penetration à 5 mm d'enfoncement(en KN)}*100}{20}$$

#### b. Résultat de l'essai Indice portant Immédiat (IPI)

Les résultats de poinçonnement pour l'essai IPI pour une teneur en eau de 16.3 % sont présentés dans le tableau III.14

Tableau III.14. Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat

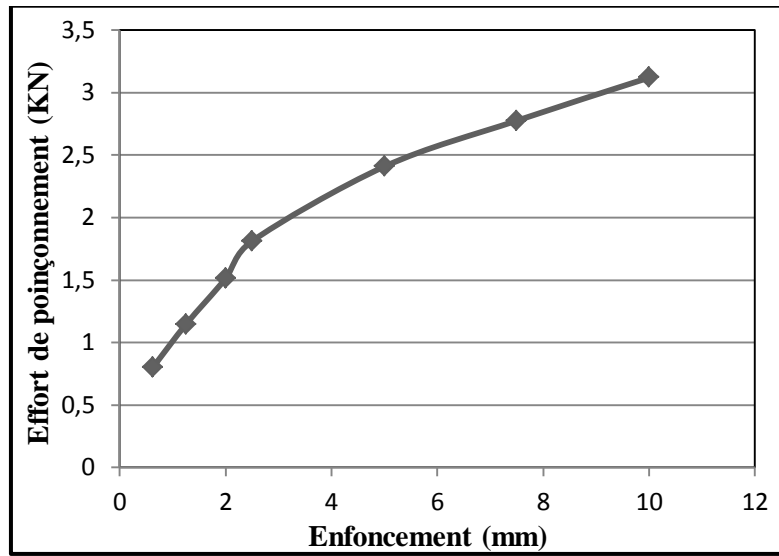
DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	35	0.8027
1.25	20	1.1467
2	66	1.5137
2.5	79	1.8119
5	105	2.4082
7.5	121	2.7752
10	136	3.1192

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

**Tableau III.15.** Résultat de l'indice portant immédiat max

Indice portant immédiat à 2,5 mm	Indice portant immédiat à 5 mm	Indice portant immédiat max
13.572 %	12.041 %	13.527 %

Le résultat de l'essai de portant Immédiat est rapporté sur le graphe (Figure III.22)



**Figure III.22.** Courbe (effort – enfoncement) pour IPI

### III.4.5.2.2. Détermination de l'indice CBR immédiat

Cet essai est réalisé pour montrer l'effet des surcharges sur la portance.

Le protocole de cet essai est le même que l'indice portant immédiat (IPI) seulement avant d'effectuer le poinçonnement, on dispose d'une charge annulaire (deux disques de 2.3 kg chacun) afin de simuler les contraintes apportées par les couches supérieures de la chaussée.

#### a. Résultat de l'indice CBR immédiat

Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR immédiat pour une teneur en eau de 16.3 % sont présentés dans le tableau III.16

### CHAPITRE III : Identification du sol étudié

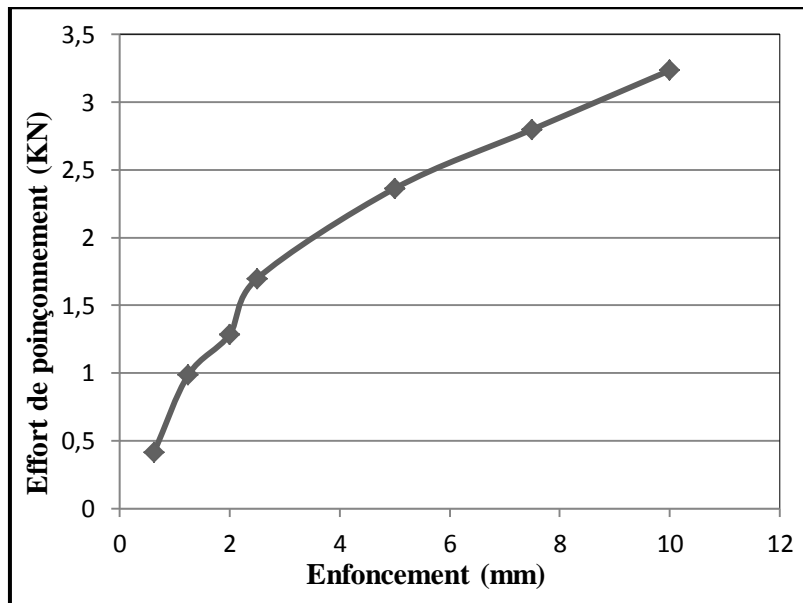
**Tableau III.16.** Résultat de poinçonnement pour l'essai CBR immédiat

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0.625	18	0.4128
1.25	43	0.9862
2	56	1.2844
2.5	74	1.6972
5	103	2.3623
7.5	122	2.7981
10	141	3.2339

**Tableau III.17.** Résultat de l'indice CBR immédiat max

Indice CBR immédiat à 2,5 mm	Indice CBR immédiat à 5 mm	Indice CBR immédiat max
12.713 %	11.811 %	12.713 %

Le résultat de l'essai CBR immédiat est rapporté sur le graphe (Figure III.23)



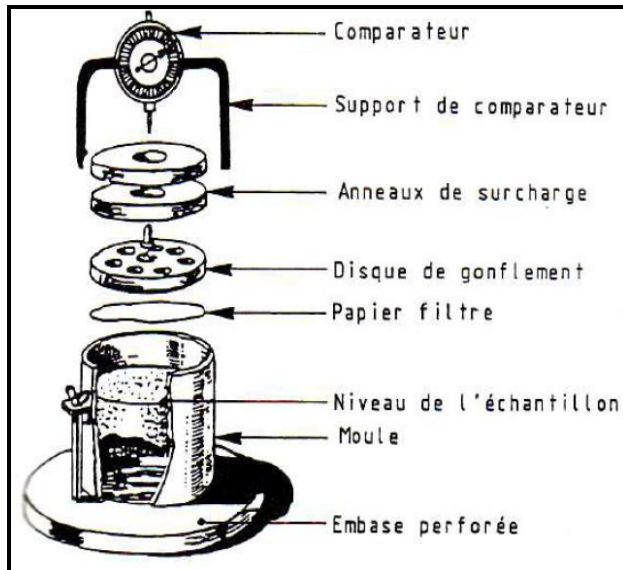
**Figure III.23.** Courbe (effort – enfoncement) pour CBR immédiat

#### III.4.5.2.3. Détermination de l'indice CBR après immersion

L'essai consiste à mesurer l'indice CBR après immersion, c'est la même procédure que la détermination de l'indice C.B.R Immédiat. Sauf que l'échantillon de sol préalablement compactés et soumis à l'imbibition pendant quatre jours (Figure III.25) selon la norme

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

(NF P 94-078), après quatre (4) jours d'immersion on mesure la hauteur de gonflement ( $\Delta h$ ) indiquée par le comparateur.



**Figure III.24.** Dispositif du montage pour calculé le gonflement [norme afnor]



**Figure III.25.** Immersion de l'éprouvette dans l'eau

Le but de l'immersion dans l'eau est de placer le sol (le matériau) dans les plus mauvaises conditions hygrométriques qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique.

La valeur de déformation de l'éprouvette G, exprimé en pourcentage :

$$G = \frac{\Delta h}{H} * 100$$

Avec :  $\Delta h$ : gonflement mesuré [mm] ;

H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116.4 mm.

Le poinçonnement est effectué après avoir retiré le dispositif de l'eau, le trépied ainsi que le comparateur du moule, les surcharges annulaires étant maintenues

### a. Résultat de l'indice CBR après immersion

Les résultats de poinçonnement de l'essai CBR après immersion pour une teneur en eau de 16.3 % sont présentés dans le tableau III.18

### CHAPITRE III : Identification du sol étudié

**Tableau III.18.** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	4	0.0917
1.25	10	0.2293
2	16	0.3669
2.5	21	0.4816
5	33	0.7568
7.5	40	0.9174
10	47	1.0779

**Tableau III.19.** Résultat de l'indice CBR immersion max

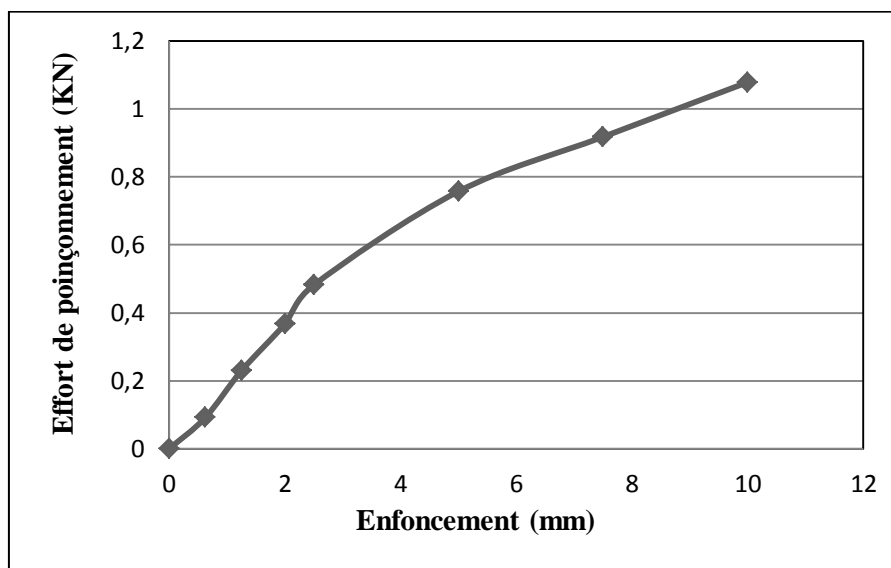
Indice CBR après immersion à 2,5 mm	Indice CBR après immersion à 5 mm	Indice CBR après immersion max
3.60 %	3.78 %	3.78 %

La valeur de la déformation de l'éprouvette G :

$$G = \frac{DH}{H} * 100$$

$$G = \frac{3}{116.4} * 100 = 2.57 \%$$

Le résultat de l'essai CBR immergé est rapporté sur le graphe (Figure III.26)



**Figure III.26** Courbe (effort – enfoncement) pour CBR après immersion

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

### III.5. Tableau Récapitulatif des résultats

Les résultats obtenus pour le sol étudié sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau III.20.** Caractéristiques d'identification du sol

paramètre	valeurs
Teneur en eau (%)	22.14
Masse volumique humide $\rho_h$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.93
Masse volumique des particules solide $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.879
$W_L$ (%)	42.8
$W_p$ (%)	23.97
$I_p$ (%)	18.83
$I_c$ (%)	1.09
Tamisats 80 $\mu\text{m}$ (%)	93
Tamisats 2 $\mu\text{m}$ (%)	34
VBS (gr/100g de sol)	6.63
Masse volumique sèche max $\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.751
Teneur en eau $w_{OPM}$ (%)	16.3
Indice portant immédiat IPI (%)	13.572
ICBR immédiat (%)	12.713
ICBR après immersion (%)	3.78
Gonflement vertical (%)	2.57

D'après ces caractéristiques, Les particules ayant un diamètre inférieur à 80  $\mu\text{m}$  est 91 %, Les particules ayant un diamètre inférieur à 2  $\mu\text{m}$  est 34 %, l'indice de plasticité IP est de 18.83 % et la valeur de bleu VBS est de 6.63 (gr/100g de sol)

D'après les tableaux (III.21, III.22) on peut déduire que notre sol est moyennement gonflant

**Tableau III.21.** Potentiel de gonflement d'après [le Building Research Establishment BRE (1980)]

IP (%)	% < 2 $\mu\text{m}$	Potentiel de gonflement
>35	>95	Très élevé
22-35	60-95	Elevé
18-22	30-60	Moyen
<18	< 30	Faible

## CHAPITRE III : Identification du sol étudié

---

**Tableau III.22.** Classification du gonflement d'après [Dakshanamurthy et Raman (1973)]

Limite de liquidité $W_L$	Classification
0-20	Non gonflant
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
>90	Gonflement critique

### III.6. Conclusion

Il nous a été possible de caractériser l'échantillon prélevé dans une zone située au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation de la commune de Tizi-Ouzou.

- D'après les résultats de l'analyse chimique, le taux de carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ) est de 17.24 % ce qui nous permet de classer notre sol comme étant une argile marneuse.
- L'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80  $\mu\text{m}$  égale à 91 % .Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe A3 selon la classification GTR
- La valeur au bleu VBS est égale à 6.64, D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux
- les résultats de l'indice de plasticité ( $I_p = 18,83\%$ ) indiquent que le sol étudié est un sol peu plastique.
- Le gonflement vertical est de 2.57 %, le sol est moyennement gonflant
- la valeur de l'indice portant IPI (13,57%) nous a permis de le classer dans l'état hydrique moyen (sous classe  $A_{2m}$ ) selon la classification des sols [Norme NF P 11 300 et G.T.R]

Les caractéristiques géotechniques du sol étudié ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles que indiquées dans le GTR sans traitements, le traitement préconisé dans ce guide est le traitement à la chaux et /ou au ciment

Le chapitre suivant est réservé à la stabilisation par ajout de chaux et de ciments pour différents dosages.

# **Chapitre IV**

---

## **Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment**

### IV.1. Introduction

Le traitement des sols est une technique qui s'est développée très rapidement et qui est encore amenée à connaître une importante évolution. Facile à mettre en œuvre, économique et efficace.

Dans le but d'obtenir un matériau de construction avec des propriétés meilleures que celles du sol original, Plusieurs auteurs ont tenté d'appliquer des techniques de stabilisation à ces sols par des additifs, parmi ces techniques on cite la stabilisation des sols à la chaux et au ciment.

Ce chapitre est consacré à la stabilisation du sol par ajout de chaux et de ciment ce choix s'explique par le fait que cette méthode possède des avantages notamment en ce qui concerne le coût, ainsi que l'amélioration des propriétés des sols et surtout la facilité d'exécution.

Dans ce qui suit on va présenter l'effet des différents dosages de chaux et de ciment sur les essais mécanique (essai Proctor normal et essai de CBR (immédiat et après immersion)). Ainsi que sur les limites d'Atterberg.

### IV.2. Caractéristiques des additifs utilisés

#### a. La chaux

La chaux utilisée dans cette étude (Figure IV.1) est une Chaux vive (CaO) fabriquée dans une usine à TIZI RACHED wilaya de TIZI OUZOU.



**Figure IV.1.** La chaux utilisée

#### b. le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude (Figure IV.2) est un ciment de type Na442 CEM II/B-L 42.5 N. Ces Caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau IV.1



Figure IV.2. Le ciment utilisé

Tableau IV.1. Caractéristiques techniques de ciment utilisé [35]

Analyse chimique	
Composition chimique	Pourcentage (%)
couleur	Ciment gris
Perte au feu	10±2
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	2.5± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1.7±0.5
Teneur en chlorures	0.02-0.05
Temps de prise a 20°	
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50
Resistance a la compression	
2 jours (MPa)	≥10.0
28 jours (MPa)	≥42.5

### IV.3. Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg

Afin d'étudier l'influence de la stabilisation sur les limites d'Atterberg pour le sol étudié, des mesures des limites de liquidité et de plasticité ont été effectuées avec la chaux à différents dosages.

De même principe que l'état naturel, Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) sont déterminées selon la norme (NF P 94-051).Après tamisage de sol des quantités prédéterminées de la chaux vive est ajoutée, le malaxage du mélange se fait à sec

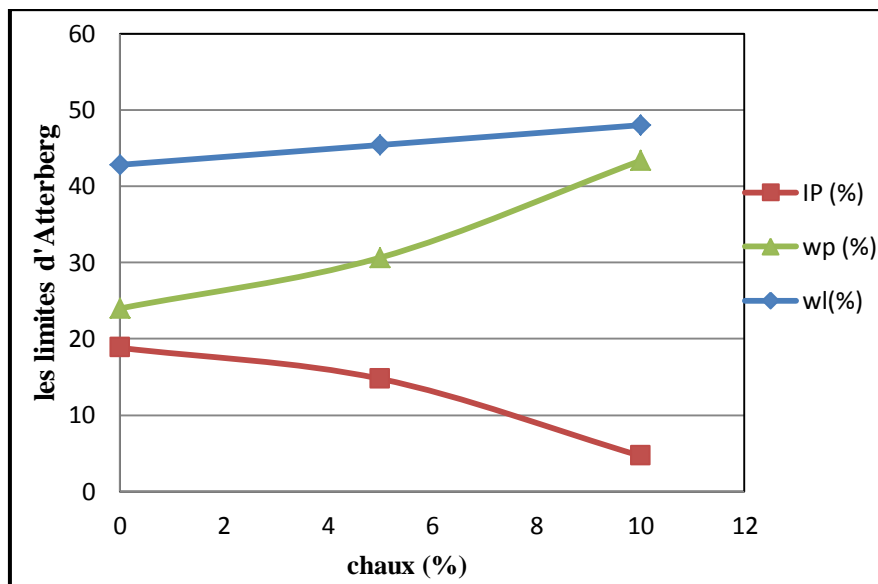
## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

jusqu'à l'homogénéisation puis une quantité d'eau est ajoutée au mélange jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

Les résultats expérimentaux concernant la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité de l'argile amélioré sont présentés dans le tableau IV.2 et la courbe (Figure IV.3)

**Tableau IV.2.** Variation des limites d'Atterberg en fonction de la chaux

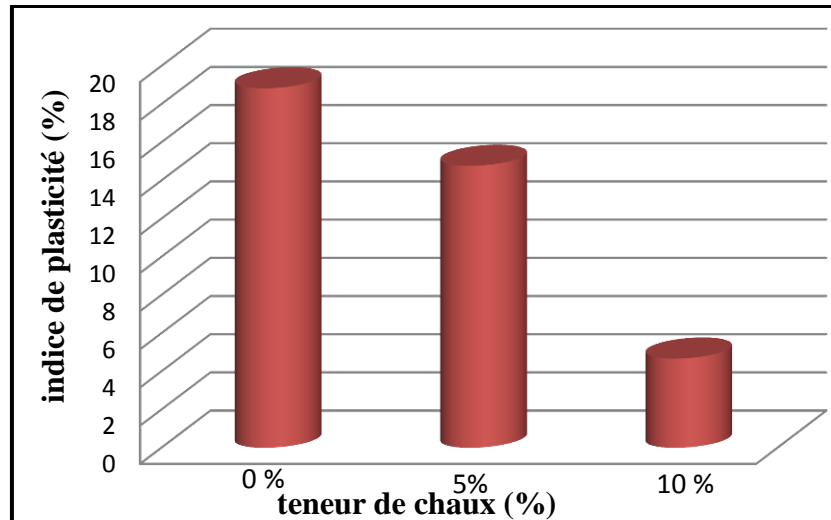
Echantillons	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	IP (%)
Sol+ 0 % de chaux	42.8	23.97	18.83
Sol+5 % de chaux	45.4	30.63	14.77
Sol +10 % de chaux	48	43.33	4.67



**Figure IV.3.** Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg

D'après les courbes (figure IV.3) on constate que l'ajout de chaux a un effet sur la plasticité du sol étudié. On observe que l'ajout de 5 et 10 % de chaux a augmenté la limite de plasticité de sol, cette augmentation immédiate est due à la floculation des particules du sol.

On remarque aussi que la limite de liquidité augmente avec l'ajout de chaux



**Figure IV.4.** Histogramme de la réduction des indices de plasticité en fonction des teneurs en chaux

Comme montré sur l'histogramme (figure IV.4) on observe une diminution importante de l'indice de plasticité après l'addition de la chaux, d'où une diminution de la sensibilité à l'eau.

La chaux agit immédiatement sur le comportement de l'argile. Les résultats des travaux rapportés par la littérature (George et al 1992 et Ola ,1977) ainsi que ceux obtenus dans cette étude, indique que l'addition de chaux réduit la plasticité des sols argileux.

### IV.4. Effet de la chaux sur les caractéristiques de compactage

De même principe que l'état naturel, la préparation des mélanges et le compactage ont été effectuées selon le principe de l'essai Proctor normal, Après tamisage de sol, un pourcentage de chaux de 5 et 10% sont ajoutés, Le mélange est mis dans un bac ; le malaxage se fait à sec jusqu' à l'homogénéisation puis humidifier à différentes teneurs en eau. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol traité . et on trace la courbe des variations de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau

#### IV.4.1. Présentation des résultats à la chaux

Les résultats obtenus au laboratoire sont représentés sous forme des tableaux et des courbes où les densités sèches sont en fonction des teneurs en eau en tenant compte des différents pourcentages d'ajout de la chaux (5% et 10%)

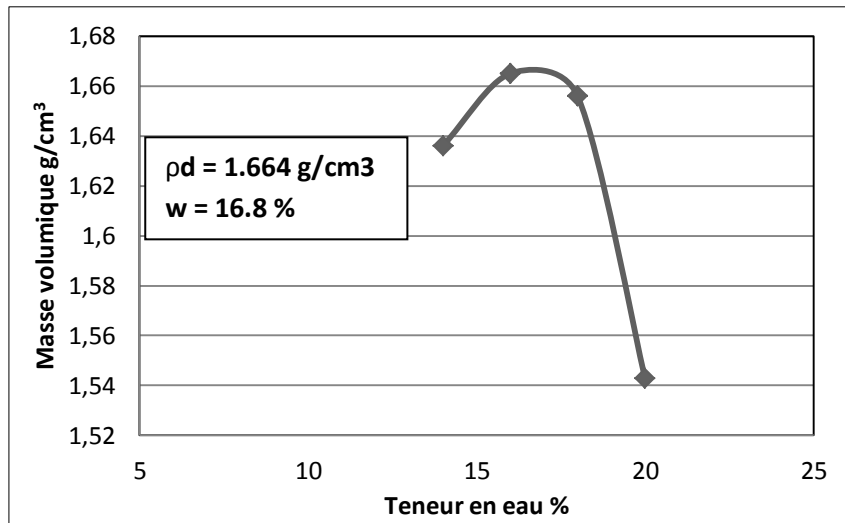
##### IV.4.1.1. Essai Proctor (5% de chaux)

Les résultats obtenus avec ajout de 5 % de chaux sont représentés dans le tableau IV.3 et sur le graphe (figure IV.5)

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

**Tableau IV.3.** Les résultats de Proctor ( 5% de chaux)

Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse sèche (g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
14	1781	1544.6	15.30	1.636
16	1846	1570	17.57	1.663
18	1865	1555.2	19.92	1.647
20	1785.7	1456.9	22.56	1.543



**Figure IV.5.** Courbe essai Proctor à 5% de chaux

D'après le graphe on constate que la densité sèche optimale maximale égale à 1.664 g/cm<sup>3</sup>, Et la teneur en eau correspondante égale a 16.8 %

### IV.4.1.2. Essai Proctor (10% de chaux)

Les résultats obtenus avec ajout de 10 % de chaux sont représenté dans le tableau IV.4 et sur le graphe (figure IV.6)

**Tableau IV.4.** Les résultats de Proctor (10% de chaux)

Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse sèche(g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
16	1825	1544	15.30	1.635
18	1837	1565	17.57	1.657
20	1845	1549	19.92	1.640
22	1847	1530	21.73	1.620

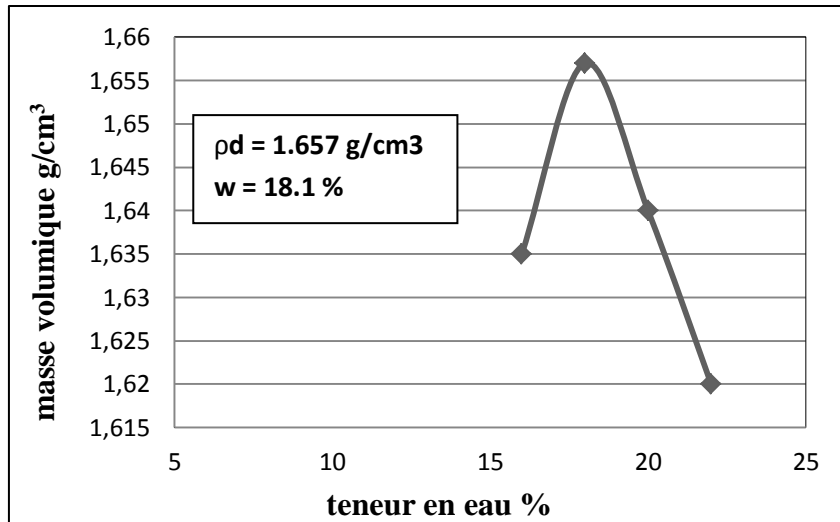


Figure IV.6. Courbe essai Proctor à 10% de chaux

D'après le graphe on constate que la densité sèche optimale maximale égale à  $1.657 \text{ g/cm}^3$ , Et la teneur en eau optimale correspondante est égale à 18.1 %

Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus pour le sol naturel et sont représentés sur la figure IV.7

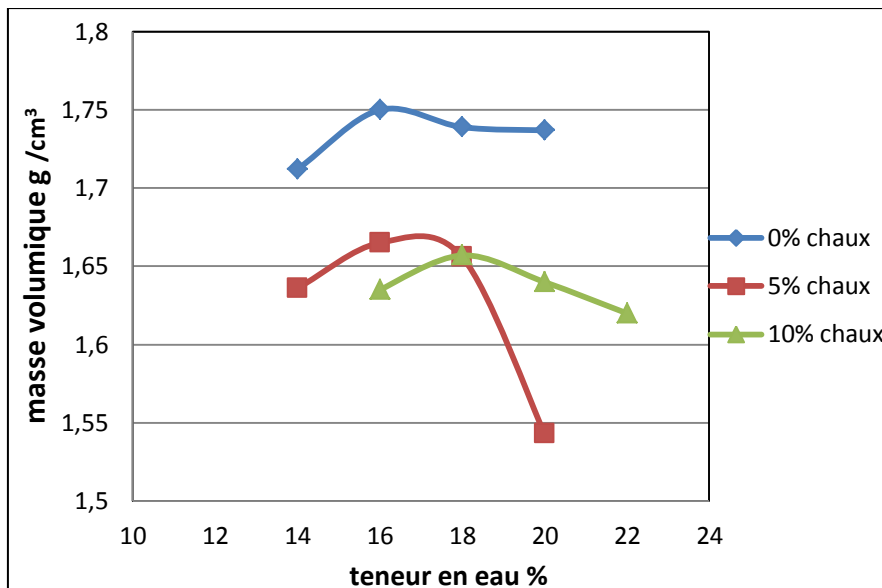


Figure IV.7. Influence de la chaux sur les paramètres de compactage

Toutes Les courbes Proctor du sol traité sont en dessous et à droite de celles du sol naturel comme le montre la figure IV.7.

On constate que l'ajout de chaux a diminué la densité sèche maximale et a augmenté la teneur en eau optimale. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont effectué des essais de compactage sur des sols argileux améliorés par la chaux [Ola, 1977; George et al 1992, Eren and Filiz 2009, et Bozbey and Garaisayev 2010]

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

L'explication de ce comportement est probablement une conséquence des raisons suivantes [1]

- La chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces (structure plus ouverte).
- La densité spécifique de la chaux est généralement faible que celle des sols naturels testés.
- les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

### IV.5. Effet d'ajout de ciment sur les caractéristiques de compactage

De même principe que l'ajout de chaux,, Apres tamisage de sol, un pourcentage de ciment (5% ,10% ) sont ajouter a sec , puis humidifier a des teneur en. Pour chaque valeur de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique maximale sèche du sol traité et la teneur en eau.

#### IV.5.1. Présentation des résultats de ciment

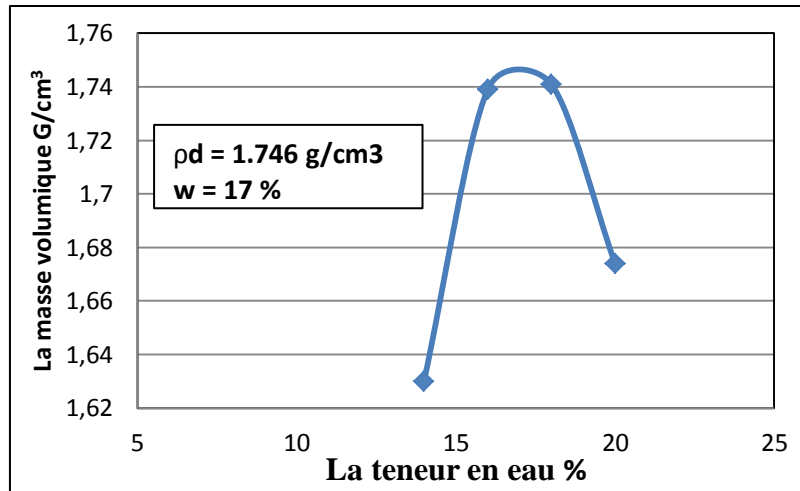
Les résultats obtenus au laboratoire sont représentés sous forme de tableaux et des courbes où les densités sèches sont en fonction des teneurs en eau en tenant compte des différents pourcentages d'ajout de ciment (5%, 10%)

##### IV.5.1.1. Essai Proctor (5% de ciment)

Les résultats obtenus avec ajout de 5% de ciment sont représenté dans le tableau IV.5 et sur le graphe (figure IV.8)

**Tableau IV.5.** Les résultats de Proctor (5% de ciment)

Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse sèche(g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
14	1852	1539	19.55	1.630
16	1896	1642	15.46	1.739
18	1892	1644	15.08	1.741
20	1876	1581	18.65	1.674



**Figure IV.8.** Courbe essai Proctor à 5 % de ciment

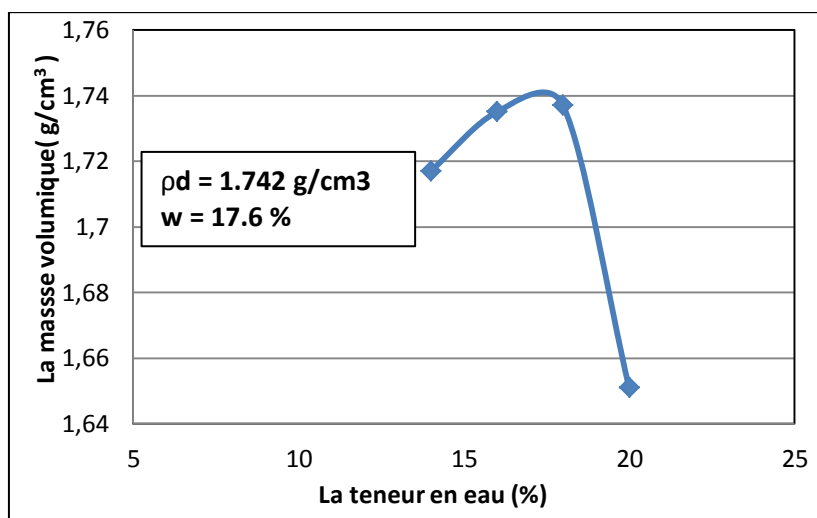
D'après le graphe on constate que la densité sèche maximale égale à 1.746g/cm<sup>3</sup>, Et la teneur en eau optimale correspondante est égale à 17 %.

### IV.5.1.2 Essai Proctor (10% de ciment)

Les résultats obtenus avec ajout de 10% de ciment sont représenté dans le tableau IV.6 et sur le graphe (figure IV.9)

**Tableau IV.6.** Les résultats de Proctor ( 10% de ciment)

Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse seche(g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
14	1876	1621	15.73	1.710
16	1892	1637	15.57	1.735
18	1908	1640	16.34	1.737
20	1885	1559	20.91	1.651

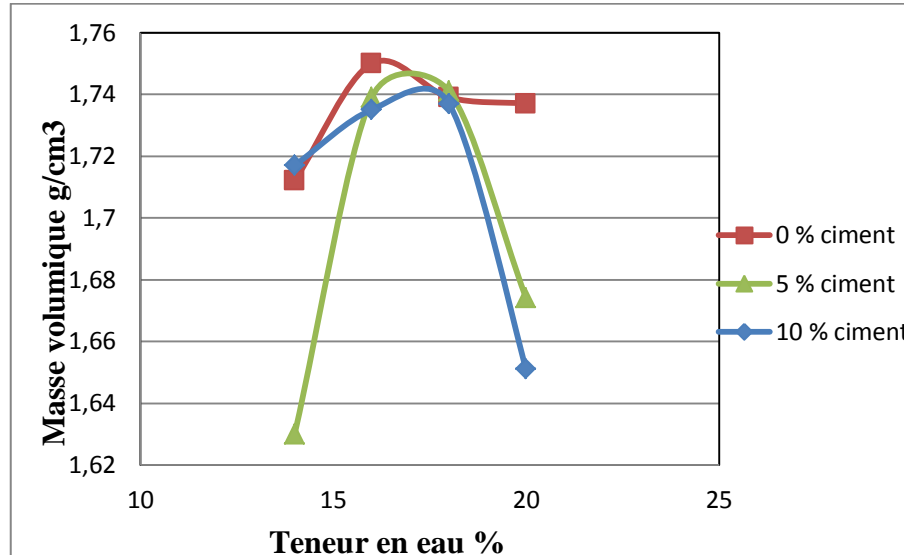


**Figure IV.9.** Courbe essai Proctor à 10% de ciment

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

D'après le graphe on constate que la densité sèche maximale égale à  $1.742\text{g/cm}^3$ , Et la teneur en eau optimale correspondante est égale à 17.6 %.

Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus pour le sol naturel et sont représentés sur la figure IV.10



**Figure IV.10.** Variation de courbe Proctor par ajout de ciment

D'après les courbes (figure IV.10) on constate que l'ajout de ciment pour différents dosages a diminué la densité sèche maximale et a augmenté la teneur en eau optimale. Ce comportement a été observé aussi par différents chercheurs qui se sont penchés sur l'étude de l'effet de l'addition du ciment comme stabilisant aux sols [Rahman 1986, Bell 1994, Osula 1996, Gay and Schad 2000, Basha et al. 2003, Sivapullaiah et al. 2003, Basha et al. 2005, Hossain et al. 2006, Hossain et al. 2007, Mu'Azu 2007, Eren and Filiz 2009, Sariosseiri and Muhunthan 2009].

### IV.6. Effet d'ajout mixte (ciment + chaux) sur les caractéristiques de compactage

Après tamisage de sol, un pourcentage de ciment et chaux est ajouté à sec, puis humidifier à des teneurs en eau. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique maximale sèche du sol traité et la teneur en eau

#### IV.6.1. Présentation des résultats de ciment+ chaux

Les résultats obtenus au laboratoire sont représentés sous forme de tableau et de courbe où les densités sèches sont en fonction des teneurs en eau en tenant compte des différents pourcentages d'ajout de ciment+ chaux (5% chaux + 5 % ciment, 10% chaux+10% ciment).

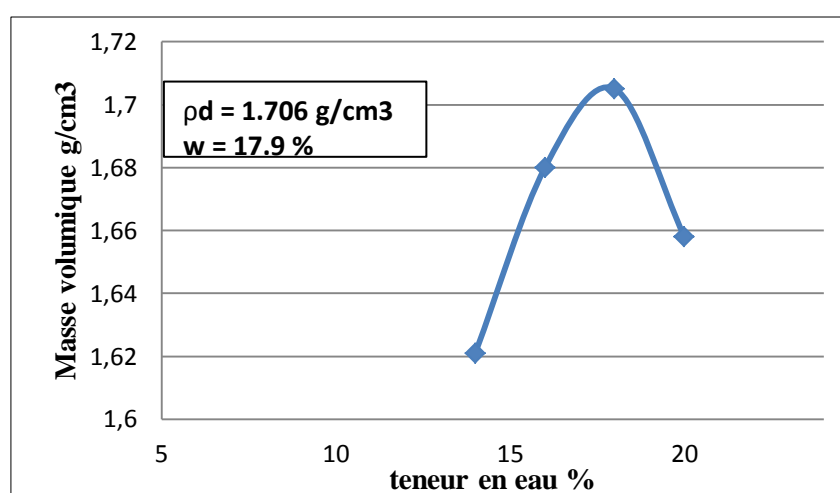
##### IV.6.1.1. Essai Proctor (5% de chaux+ 5 % de ciment)

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

Les résultats obtenus avec ajout de 10% de ciment sont représenté dans le tableau IV.7 et sur le graphe (figure IV.11)

**Tableau IV.7.** Les résultats de Proctor ( 5% chaux+ 5% ciment)

Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse sèche(g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
14	1742	1507	15.59	1.597
16	1867	1586	17.71	1.680
18	1894	1610	17.63	1.705
20	1844	1517	21.55	1.633



**Figure IV.11.** Courbe essai Proctor a 5 % de ciment+ 5% de chaux

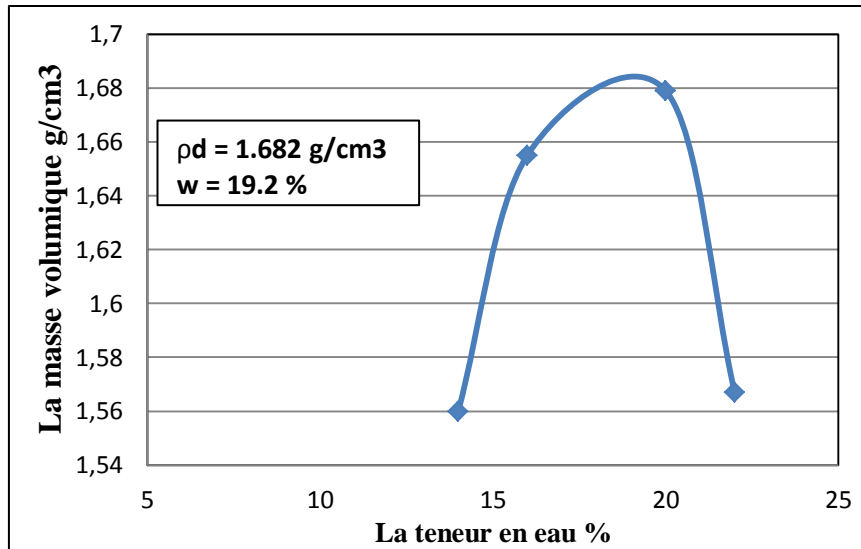
D'après le graphe (figure IV.11), on constate que la densité sèche maximale égale a  $1.706 \text{ g/cm}^3$ , Et la teneur en eau optimale correspondante égale a 17.9 %.

### IV.6.1.2. Essai Proctor (10% de chaux+ 10 % de ciment)

Les résultats obtenus avec ajout de 10% de ciment sont représenté dans le tableau IV.8 et sur le graphe (figure IV.12)

**Tableau. IV.8.** Les résultats de Proctor ( 10% chaux+ 10% ciment)

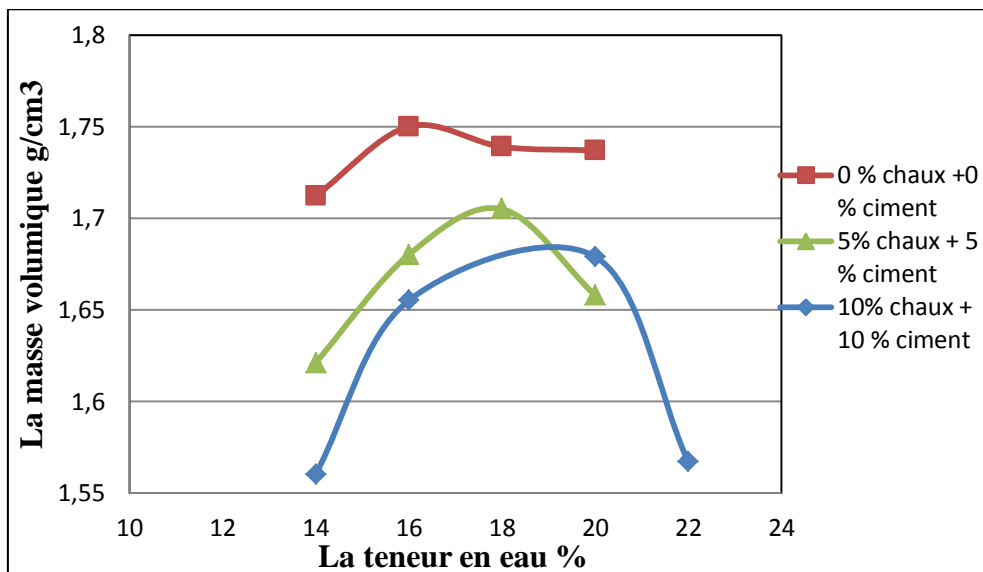
Teneur en eau	Masse humides (g)	Masse séché(g)	$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$	$\rho_d = \frac{Ms}{V}$
14	1720	1473	16.76	1.560
16	1816	1563	16.18	1.655
20	1855	1585	17.03	1.679
22	1819	1480	22.90	1.567



**Figure IV.12.** Courbe essai Proctor à 10 % de ciment+ 10% de chaux

D'après le graphe (figure IV.12), on constate que la densité sèche maximale égale à  $1.682 \text{ g/cm}^3$ , Et la teneur en eau optimale égale à  $19.2 \%$ .

Les résultats obtenu sont comparés a ceux obtenus pour le sol naturel sont représenter sur la figure IV.13



**Figure IV.13.** variation de la courbe Proctor par ajout de chaux et ciment

D'après les courbes (figure IV.13) on observe que l'ajout des liant chaux et ciment modifie les caractéristiques de compactage du sol, la teneur en eau optimale du sol traité est supérieure à celle du sol non traité par contre la densité sèche est inférieure à celle du sol non traité.

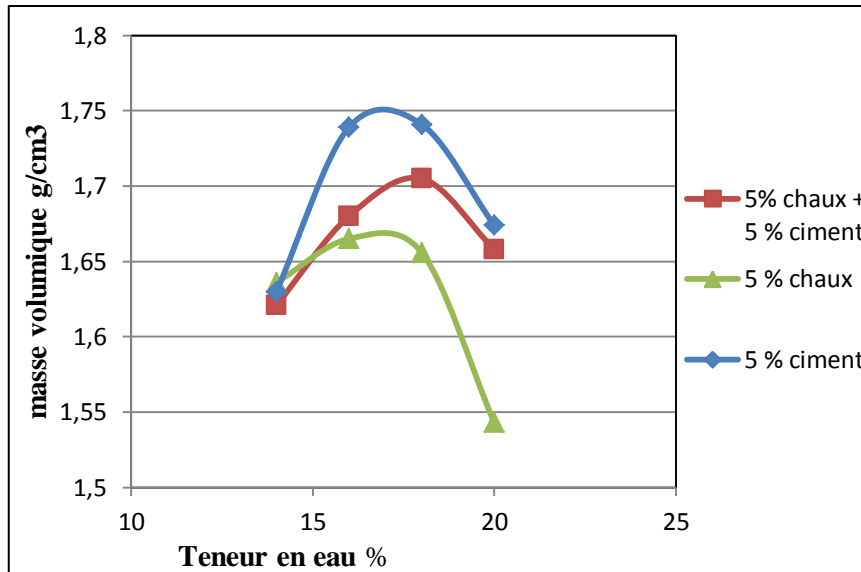


Figure IV.14. Courbe Proctor pour 5% d'ajout

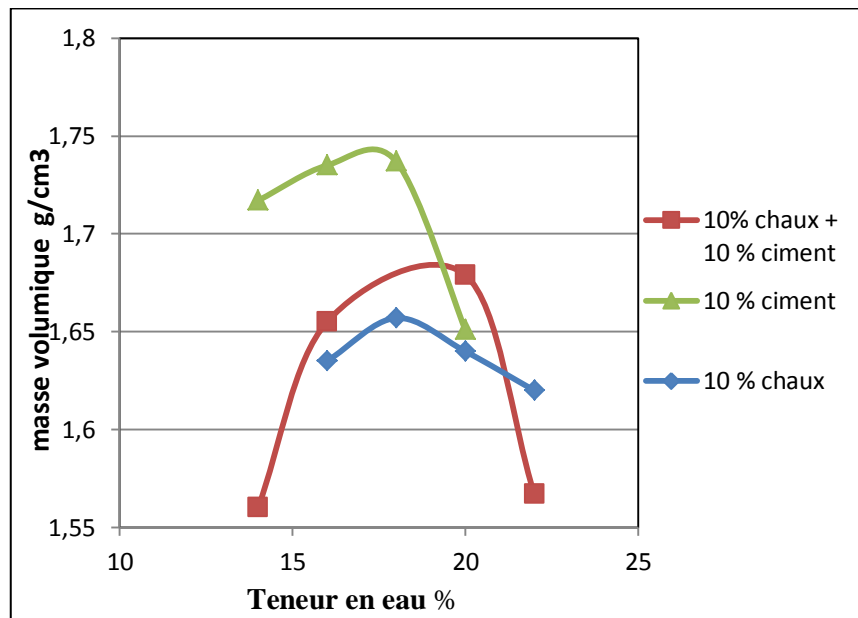


Figure IV.15. Courbe Proctor pour 10 % d'ajout

De ces deux figures (IV.14 ; IV.15) On constate que le mélange chaux et ciment pour les deux cas (5% chaux+5 ciment) et (10 % chaux+10 ciment), la courbe Proctor est situé entre les courbes d'ajout de ciment seul et de la chaux seule

### IV.7. Effet d'ajout de chaux et de ciment sur IPI

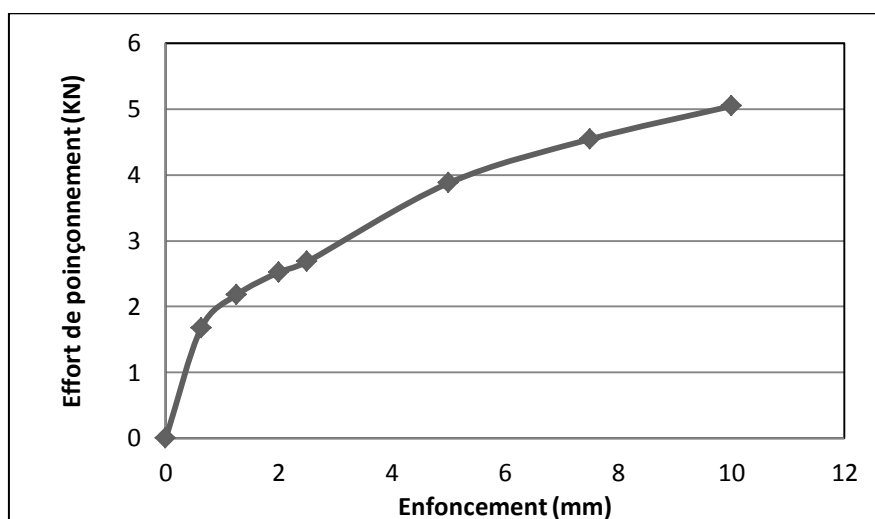
#### IV.7.1. Indice portant Immédiat (IPI) à 5 % de chaux

Les résultats d'essai (IPI) à 5 % de chaux pour une teneur en eau de 16.8 % sont présentés ci-dessous :

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

**Tableau. IV.9.** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 5 % de chaux

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	73	1.6743
1.25	95	2.1788
2	110	2.5229
2.5	117	2.6834
5	169	3.8761
7.5	198	4.5412
10	220	5.0438



**Figure IV.16.** Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 5 % de chaux

Le résultat de l'indice portant immédiat à 5 % de chaux est rapporté sur le tableau IV.10

**Tableau IV.10.** Résultat de l'indice portant immédiat à 5 % de chaux

Indice portant immédiat à 2,5 mm	Indice portant immédiat à 5 mm	Indice portant immédiat max
10.100 %	19.380 %	19.380 %

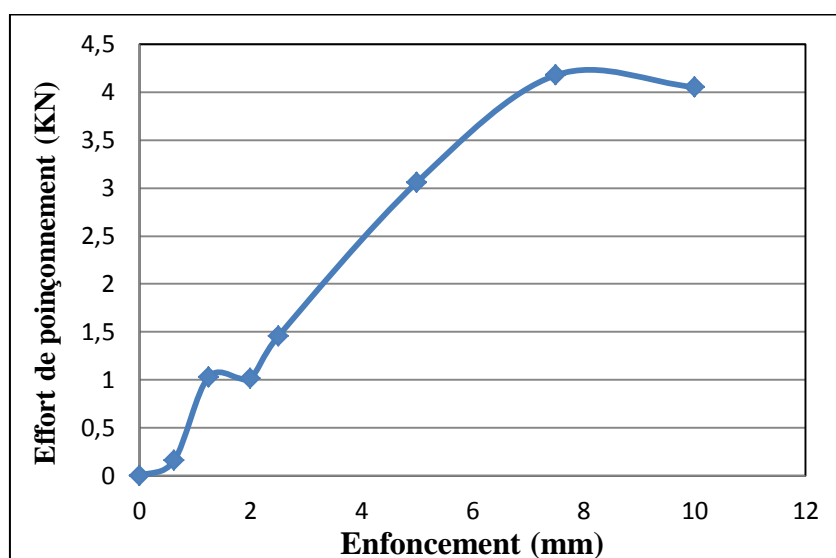
### IV.7.2. Indice portance Immédiat ( IPI ) à 10 % de chaux

Les résultats d'essai (IPI) à 10 % de chaux pour une teneur en eau de 18.1 % sont présentés ci-dessous :

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

**Tableau. IV.11.** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 10 % de chaux

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	7	0.1605
1.25	45	1.0321
2	88	1.0183
2.5	107	1.4541
5	177	3.0596
7.5	226	4.1754
10	266	4.0526



**Figure IV.17.** Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout de 10 % de chaux

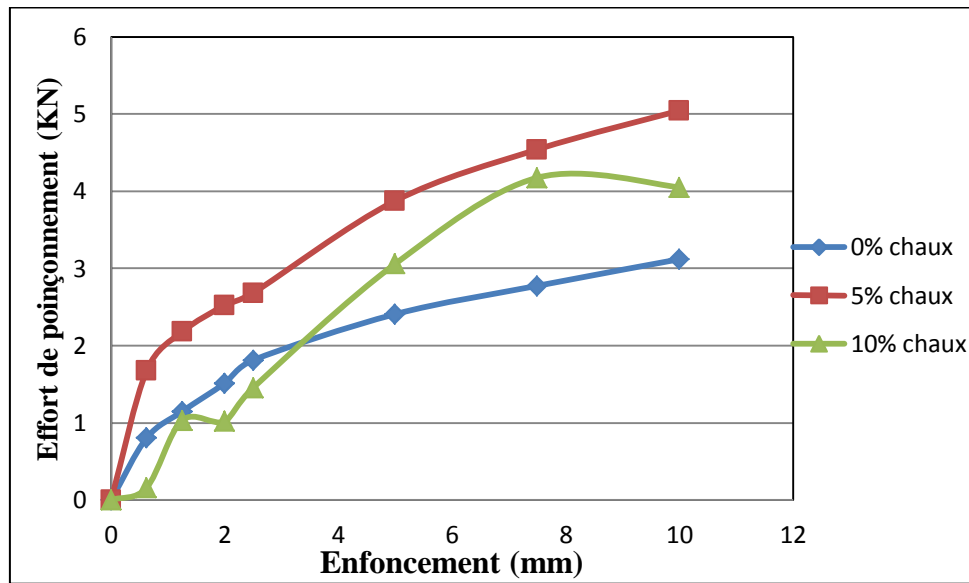
Le résultat de l'indice portant immédiat à 10 % de chaux est rapporté sur le tableau IV.12

**Tableau IV.12.** Résultat de l'indice portant immédiat à 10 % de chaux

Indice portant immédiat à 2,5 mm	Indice portant immédiat à 5 mm	Indice portant immédiat max
10.892 %	15.298 %	15.298 %

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

Les courbes efforts de poinçonnement – enfoncement obtenues sont portées sur la figure ci-dessous :



**Figure IV.18.** Courbes IPI (effort de poinçonnement- enfoncement) par variation de la chaux

D'après la figure IV.18, On constate que l'indice portant immédiat (IPI) est amélioré après traitement à la chaux. par ajout de 5 % de chaux l'Indice a augmenté de 13 % à 19 % , par contre l'ajout de 10 % de chaux IPI passe de 13 à 15 % , donc on peut dire que l'ajout de 5 % de chaux est suffisant pour améliorer IPI.

### IV.7.3. Indice portant Immédiat (IPI) à 5 % de ciment

Les résultats d'essai (IPI) à 5 % de ciment pour une teneur en eau de 17 % sont présentés ci-dessous :

**Tableau IV.13.** Résultat de poinçonnement pour l'essai Indice portant Immédiat à 5% de ciment

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	13	0.2981
1.25	52	1.1926
2	100	1.2935
2.5	114	1.6146
5	150	3.4403
.5	175	4.0137
10	192	4.4036

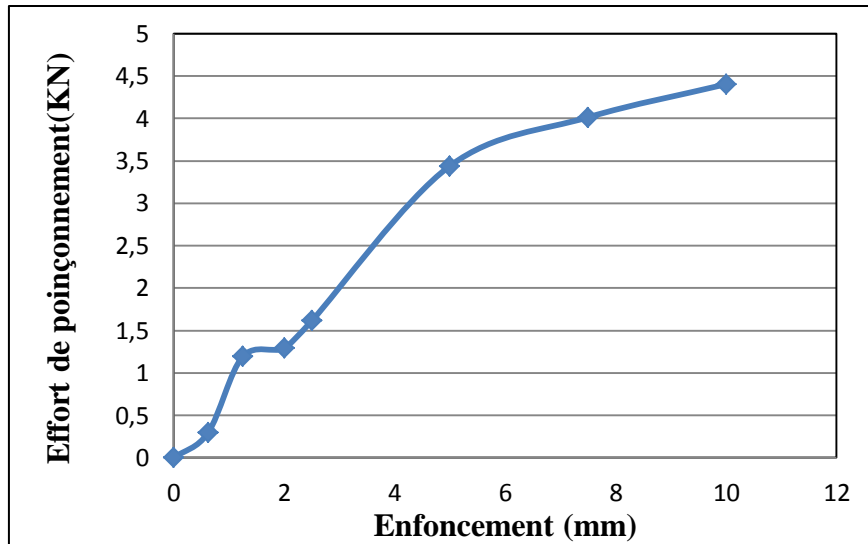


Figure IV.19. Courbe IPI (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 5% de ciment

Le résultat de l'indice portant immédiat à 5 % de ciment est rapporté sur le tableau IV.14

Tableau IV.14. Résultat de l'indice portant immédiat à 5% de ciment

Indice portant immédiat à 2,5 mm	Indice portant immédiat à 5 mm	Indice portant immédiat max
12.094 %	17.201 %	17.201 %

Les courbes efforts de poinçonnement – enfoncement par ajout de ciment obtenues sont portées sur la figure ci-dessous :

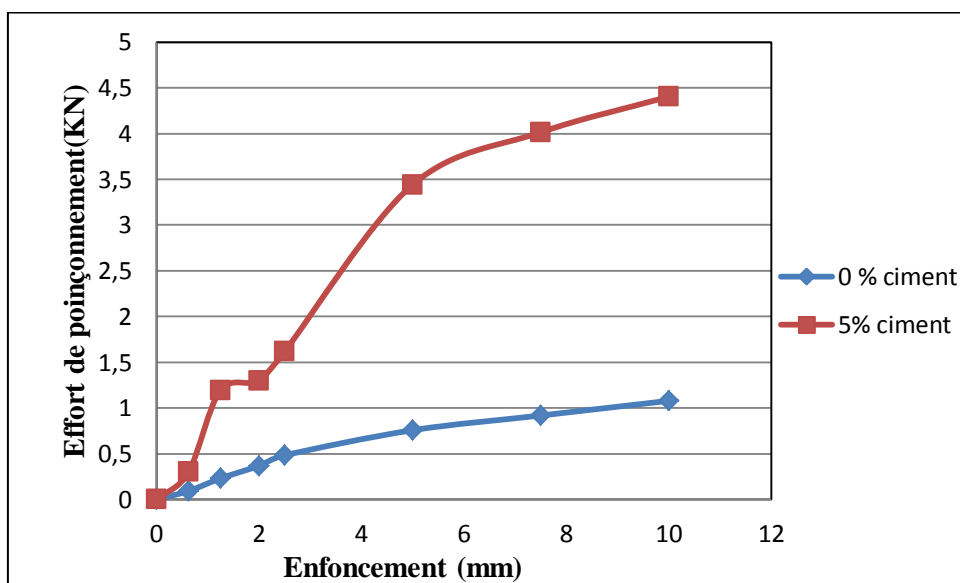


Figure IV.20. Courbes IPI (effort de poinçonnement- enfoncement) par variation de ciment

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

D'après la figure IV.20 on constate que l'ajout de 5% ciment a augmenté l'indice portance immédiat de 13 à 17 %

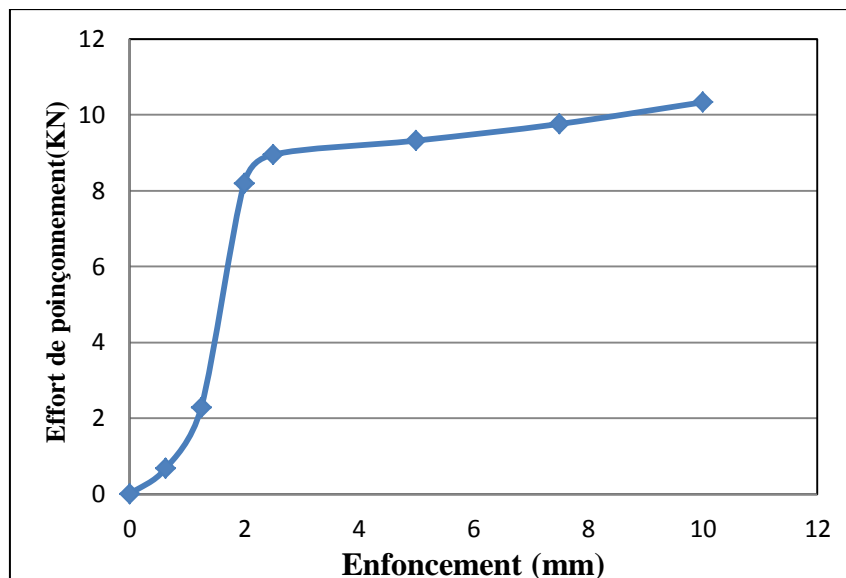
### IV.8. Effet d'ajout de chaux et de ciment sur l'indice CBR après immersion

#### IV.8.1. Indice CBR après immersion par ajout de 5 % de chaux

Les résultats d'essai CBR après immersion à 5 % de chaux pour une teneur en eau de 16.8 % sont présentés ci-dessous :

**Tableau IV.15.** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 5 % de chaux

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	29	0.6651
1.25	99	2.2706
2	363	8.1798
2.5	398	8.9473
5	415	9.3201
7.5	435	9.7587
10	461	10.3303



**Figure IV.21.** courbe C.B.R (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 5% de chaux

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

Le résultat de l'indice CBR après immersion à 5 % de chaux est rapporté sur le tableau IV.16

**Tableau IV.16.** Résultat de l'indice CBR immersion à 5 % de chaux

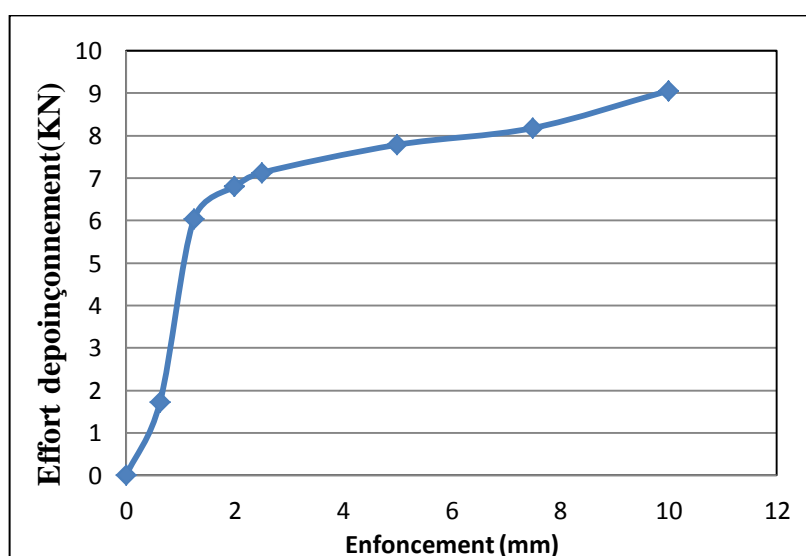
Indice CBR après immersion à 2,5 mm	Indice CBR après immersion à 5 mm	Indice CBR après immersion max
67.020 %	46.600 %	67.020 %

### IV.8.2. Indice CBR immersion par ajout de 10 % de chaux

Les résultats d'essai CBR après immersion à 10 % de chaux pour une teneur en eau de 18.1 % sont présentés ci-dessous :

**Tableau IV.17.** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 10 % de chaux

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	75	1.7201
1.25	265	6.0307
2	300	6.7982
2.5	315	7.1271
5	345	7.7850
7.5	363	8.1798
10	403	9.0570



**Figure IV.22.** courbe C.B.R( effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout 10% de chaux

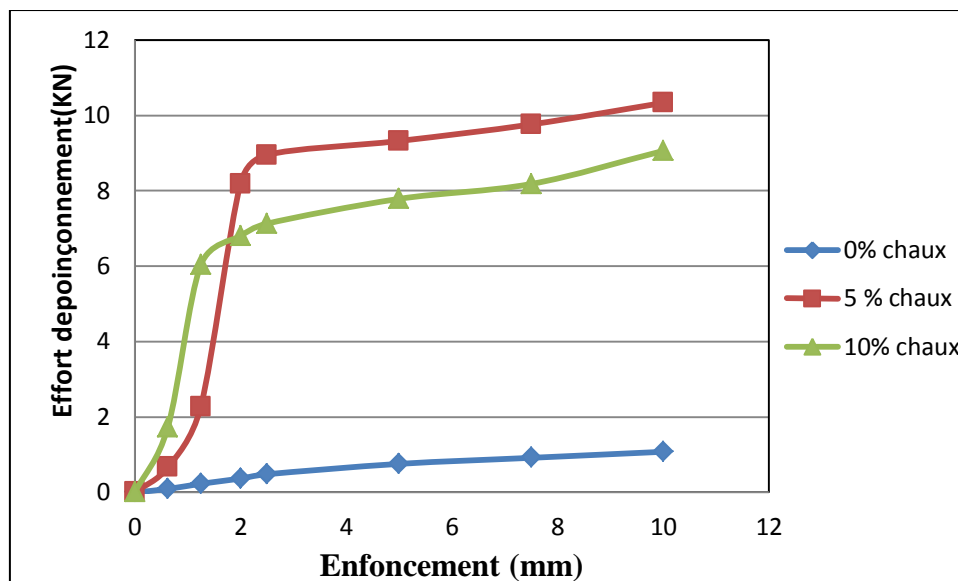
## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

Le résultat de l'indice CBR après immersion à 10 % de chaux est rapporté sur le tableau IV.18

**Tableau IV.18.** Résultat de l'indice CBR immersion à 10 % de chaux

Indice CBR après immersion à 2,5 mm	Indice CBR après immersion à 5 mm	Indice CBR après immersion max
53.386%	38.925%	53.386 %

Les courbes effort de poinçonnement – enfoncement et la variation de gonflement par ajout de chaux obtenues sont portées sur les figure ci-dessous :



**Figure IV.23.** Courbe C.B.R (effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par variation de chaux

D'après la figure IV.23, on remarque que l'indice CBR a augmenté par ajout de 5 % de chaux de 3.78 jusqu'à 67.020 %, par contre l'indice CBR a diminué à 10 % de chaux, ce qui nous permis de dire que l'ajout de 5 % de chaux est une quantité suffisante pour traiter le sol étudié.

Le Même comportement a été observé par (ZADJAOUI ABDEL DJALIL mai 2017), il a traité deux argiles différentes par la chaux.

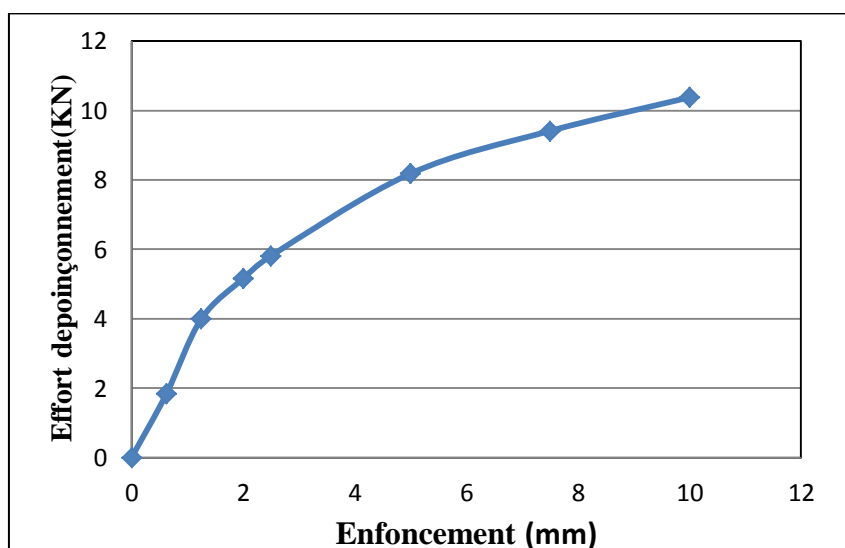
### IV.8.3. Indice CBR immersion par ajout de 5 % de ciment

Les résultats d'essai CBR après immersion à 5 % de ciment pour une teneur en eau de 17 % sont présentés ci-dessous :

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

**Tableau IV.19.** Les résultats de poinçonnement pour l'essai CBR après immersion à 5 % de ciment

DH (mm)	Lecture	Effort de poinçonnement (KN)
0	0	0
0.625	80	1.8348
1.25	174	3.9908
2	225	5.1535
2.5	255	5.8114
5	363	8.1798
7.5	419	9.4078
10	462	10.3744



**Figure IV.24.** courbe C.B.R ( effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement) par ajout de 5% de ciment

Le résultat de l'indice CBR après immersion à 5 % de ciment est rapporté sur le tableau IV.20

**Tableau IV.20.** Résultat de l'indice CBR immersion à 5 % de ciment

Indice CBR après immersion à 2,5 mm	Indice CBR après immersion à 5 mm	Indice CBR après immersion max
43.531%	40.899%	43.531 %

Les courbes (effort de poinçonnement – enfoncement) par ajout de ciment obtenues sont portées sur la figure ci-dessous

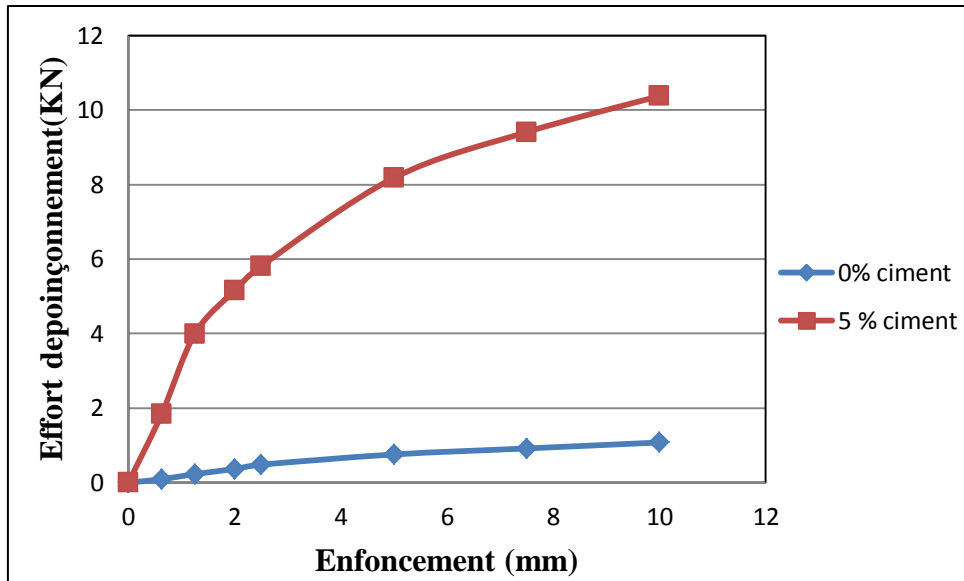


Figure IV.25 Courbes CBR (effort de poinçonnement- enfoncement) avant et après traitement

Le même comportement a été observé par [Modou DIOP-2001], a traité une argile par différents dosages en ciment

Tableau IV.21. Résultat de ICBR immersion traité par le ciment [ Modou DIOP-2001]

Ciment (%)	CBR immersion (%)
0	3
1	22
3	32
3.5	55

## IV.9. Mesure du gonflement vertical

### IV.9.1. Mesure du gonflement vertical par ajout de chaux

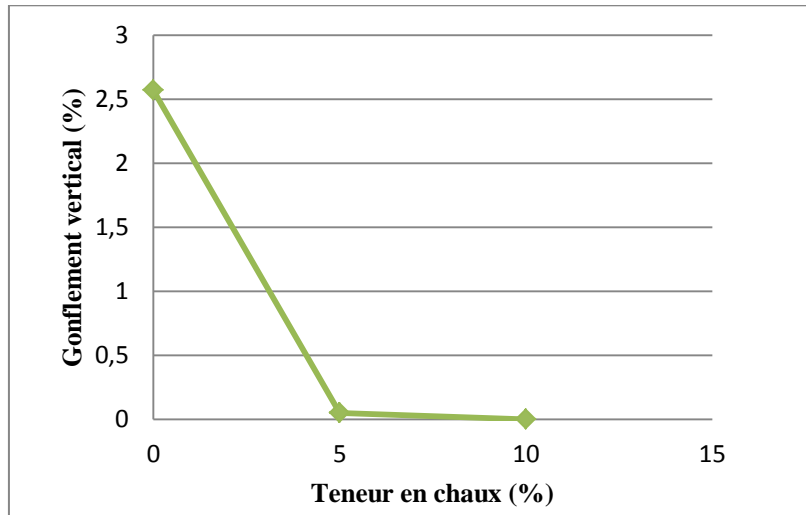
La valeur de déformation de l'éprouvette G :

$$G = \frac{DH}{H} * 100$$

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

**Tableau IV.22.** Mesure de gonflement vertical par variation de chaux

Pourcentage de chaux (%)	La valeur de déformation G (%)
0	2.57
5	0.006
10	0



**Figure IV.26.** Variation du gonflement vertical en fonction de chaux

Pour le gonflement vertical on remarque que l'addition de la chaux dans le sol réduit le potentiel de gonflement, l'ajout de 5 % de chaux a réduit le gonflement jusqu'à une valeur quasi nul de 0.006 % et par l'ajout de 10 % de chaux le gonflement est complètement nul, donc on peut dire que l'ajout de la chaux est un produit stabilisant très efficace.

### IV.9.2. Mesure de gonflement vertical par ajout de ciment

La valeur de déformation de l'éprouvette G :

$$G = \frac{DH}{H} * 100$$

**Tableau IV.23.** Mesure de gonflement vertical par ajout de 5% de ciment

Pourcentage de ciment	La valeur de déformation G (%)
0 % de ciment	2.57
5 % de ciment	0.16 %

Le gonflement a diminué après ajout de 5 % de ciment jusqu'à 0.16 %

## Chapitre IV : Stabilisation du sol étudié par la chaux et le ciment

### IV.10. Tableau récapitulatif

**Tableau IV.24.** Tableau récapitulatif des résultats trouvés

Dosage (%)	IP(%)	$\rho_d$ (g / $\text{cm}^3$ )	W (%)	IPI	ICBR immersion	Gonflement vertical G (%)
Sol non traité	18.83	1.751	16.3	13.527	3.78	2.57
5% de chaux	14.77	1.664	16.8	19.380	67.020	0.006
10% de chaux	4.67	1.657	18.1	15.298	53.386	0
5% de ciment	/	1.746	17	17.201	43.531	0.16
10 % de ciment	/	1.742	17.6	/	/	/
5 % chaux+ 5% ciment	/	1.706	17.9	/	/	/
10 % chaux + 10 % ciment	/	1.682	19.2	/	/	/

On remarque que les caractéristiques de IPI par l'ajout de 5% de chaux donne des résultats meilleurs que 10% de chaux et 5 % de ciment.

L'indice de plasticité diminue en fonction de la teneur en chaux.

On revanche nous n'avons pas réalisé des essais concernant 10 % de ciment, ainsi que le traitement mixte excepté l'essai Proctor.

### IV.11. Conclusion

Le dosage de 5 % de chaux est préconisé car il améliore l'indice de plasticité, réduit considérablement le gonflement, améliore nettement ICBR après immersion et la portance du sol.

# **Conclusion général**

# Conclusion général

---

## Conclusion général

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour avoir des solutions qui minimisent les problèmes liés aux sols argileux.

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

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

L'étude présentée dans ce travail a pour objectif d'étudier un sol prélevé dans un site situé au lotissement Mokadem en contre-bas de l'établissement de rééducation et de réadaptation à la wilaya de Tizi-Ouzou, et d'améliorer ses caractéristiques géotechniques par un traitement à la chaux et au ciment. Le choix de ce site a été choisi pour cause des désordres apparaissant dans les constructions et dans les routes sur place, Pour ce faire, un travail expérimental a été effectué. Les résultats expérimentaux sont résumés ci-dessous :

- D'après les résultats de l'analyse chimique, nous remarquons que le taux de carbonates ( $\text{CaCO}_3$ ) est égale à 17.24 % ce qui nous permet de classer notre sol comme étant une argile marneuse
- Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage des passants à 80  $\mu\text{m}$  égale à 91 % .Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie très fine
- La valeur au bleu VBS est égale à 6.64g/100g de sol, on peut le classer dans la catégorie des sols argileux
- les résultats de l'indice de plasticité indiquent que le sol étudié est un sol peu plastique.
- Le gonflement vertical est de 2.57 %

De l'ensemble des résultats obtenus on peut conclure que notre sol est dans la catégorie des sols fins A2 , est c'est une argile marneuse peu plastique.

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

- 5 % de chaux ;
- 10% de chaux ;
- 5 % de ciment ;
- 10 % de ciment ;
- 5 % chaux + 5 % ciment ;
- 10 % chaux + 10% ciment.

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

## Conclusion général

---

- ✓ l'ajout de chaux au sol augmente sa limite de plasticité et diminue son indice de plasticité
- ✓ l'ajout de chaux et (ou) de ciment augmente la teneur en eau optimale du sol et diminue son poids volumique sec maximal
- ✓ l'ajout de chaux ou de ciment augmente aussi la portance du sol (IPI) et augmente l'indice CBR immersion et réduit considérablement le gonflement, Cependant, les meilleures performances sont obtenues pour un dosage de 5% de chaux.

### **Perspective :**

En perspectives, il serait judicieux d'étudier la possibilité de réutiliser ce matériau en :

- Barrière étanche pour les sites d'enfouissement
- Remblai auto compactant
- Et de compléter des essais pour les dosages mixtes (chaux + ciment)

# **Références bibliographique**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

### Références bibliographique :

- [1] **GUILLAUD, Hugo Houben & HUBERT. 1989.** Traité de construction en terre. Marseille
- [2] **CAILLERE, SIMONNE.** « Minéralogie des argiles.1 structures et propriétés physicochimiques», Paris, Masson, 1982
- [3] **Walid ZOUBIR.** Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef le 22/11/2012
- [4] **CEFOR Lyss.** centre pour le génie forestier Argiles, limons et stabilisation des sols.2016
- [5] **Vincent ROBITAILLE, Denis TREMBLAY.**« Mécanique des sols (théorie et pratique)»
- [6] **NEDJAH A. RAOUF Et DJOUDI ABDELKRIM.** Stabilisation des sols gonflants. Université Mohamed Chérif Mesaadia kuoS-Ahras.2015
- [7] **Holtz, W. G et Gibbs, H.J. (1991).** " Introduction à la géotechnique ". Traduit par Lafleur, J, édition de l'école de polytechnique de Montréal, Canada, 794p.
- [8] **YoudjariDjonkamla.** « caractérisation et simulation et simulation numérique du comportement volumétrique de sols argileux gonflants de N'djaména », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de Maîtrise en Génie Civil pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc); Québec , 2010
- [9] **ZENKHRI Abderrezak (2009)** - Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant-Application à la région d'In-Aménas Thèse MAGISTER ANNÉE 2009/2010
- [10] Bultel Frédéric, (2001); «Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels». Thèse Doctorat l'école nationale des ponts et chaussées
- [11] **Hossein nowamooz.** Institut national polytechnique de lorraine retrait/gonflement des sols argileux Compactes et naturels 19 decembre 2007
- [12] **Houssine EJJAAOUANI 9 juillet 2008-** Interactions Des Fondations Et Des Sols Gonflants : Pathologie, Calculs Et Etudes Expérimentales - Thèse d'obtention du diplôme de docteur de l'école nationale des ponts et chaussées spécialité :géotechnique.
- [13] **DJAANI Mabrouka, BENMANSOUR Samah Farah.** Stabilisation des sols gonflants de la région d'In-Aménas par ajouts des liants hydrauliques (Chaux et Ciment). Université kasdi merbah ouargla.2010/2011
-

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

- [14] <http://www.depechedekabylie.com/evenement/106375-panique-a-azazga.html>
- [15] <https://www.dzairnews.com/articles/elwatan-glissement-de-terrain-a-azazga-neuf-familles-evacuees>
- [16] **LEONARDS.G.A. 1967.** Traduction adaptée de l'ouvrage publié en langue anglaise sous titre *foundationengineering*. Lafayette, Indiana : par McGraw-Hill Book Company, INC.
- [17] **ZOUBIR walid** (2012) Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux Thèse pour l'obtention du Diplôme de Magister Option: Géomatériaux. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [18] **BEKKOUCHE A., Aissa MAMOUNE S. M. et DJEDID A., (2002)**, "Techniques de stabilisation des sols expansifs", Journées d'Études sur les Sols Gonflants (JÉSG), Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen.
- [19] **GADOURI Hamid.** Influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux. Université Yahia Farès – Médéa – 2017
- [20] **BENMASSOUD ahmed,** Types de solutions de constructions sur sols gonflants Thèse pour l'obtention du Diplôme de Master Spécialité : Construction Civil et Industrielle, université kasdimerbahouargla. 2016/2017
- [21] **BEKKOUCHE A., Aissa MAMOUNE S. M. et DJEDID A., (2002)**, "Techniques de stabilisation des sols expansifs", Journées d'Études sur les Sols Gonflants (JÉSG), Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen.
- [22] **FERRAH Ferrah (2006)** - Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des fondations superficielles Thèse pour l'obtention du diplôme de MAGISTER Spécialité : Génie Civil Option : Mécanique des sols - Université El Hadj Lakhedar Batna.
- [23] **LEGERE, Glen. 2001.** Etude technico-économique de la stabilisation à la chaux des sols argileux en voirie forestières. Montréal : Ecole de technologie supérieure université du Québec
- [24] **BELABBACI Zeyneb.** STABILISATION DES SOLS GONFLANTS. Thèse De Doctorat Lmd Formation Doctorale : Sols Et Structures. Université aboubekerbelkaïd tlemcen
- [25] **TRAN Van Duy.** Étude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux Travail de \_n d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil des Constructions. 2012/2013
-

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

---

[26] **BENSALEM Ahmed**. caractérisation et exploitation de l'argile debenazzouz dans la construction routière. Thèse pour l'obtention du Diplôme de Magister Option Géotechnique. université badjimokhtar-annaba. année 2010

[27] Norme AFNOR (NF P 94-049-1)

[28] Norme AFNOR (NF P 94-054)

[29] Norme AFNOR (NF P 94-053)

[30] Norme AFNOR (NF P 94-051)

[31] Norme AFNOR (NF P 94-057)

[32] Norme AFNOR (NF P 94-068)

[33] Norme AFNOR (NF P 94-093)

[34] Norme AFNOR (NF P 94- 078)

[35] [https://www.lafrage.dz/sites/algeria/files/atoms/files/fiche\\_produit\\_ciment\\_matine\\_fr.pdf](https://www.lafrage.dz/sites/algeria/files/atoms/files/fiche_produit_ciment_matine_fr.pdf)

[36] **Zadjaoui Abdeldjalil**, Effet de la chaux sur la stabilité et la portance dans les travaux de Terrassement. Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen mai 2017

---

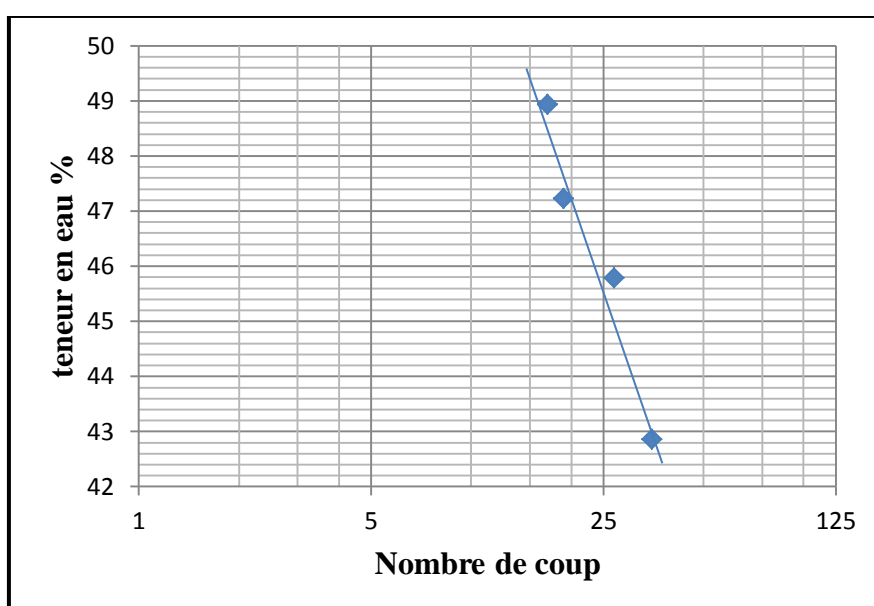
# **Annexes**

## ANNEXES

### ANNEXE 1 :

**Tableau I.** Résultats de la limite de liquidité par ajout de 5 % de chaux

Nombre de coup	Masse de la tare	Masse humide + tare	Masse sèche+ tare	Teneur en eau (%)
17	26,2	40,2	35,6	48,93
19	11,1	16,4	14,7	47,22
27	25	37,1	33,3	45,78
35	11,1	16,1	14,6	42,85



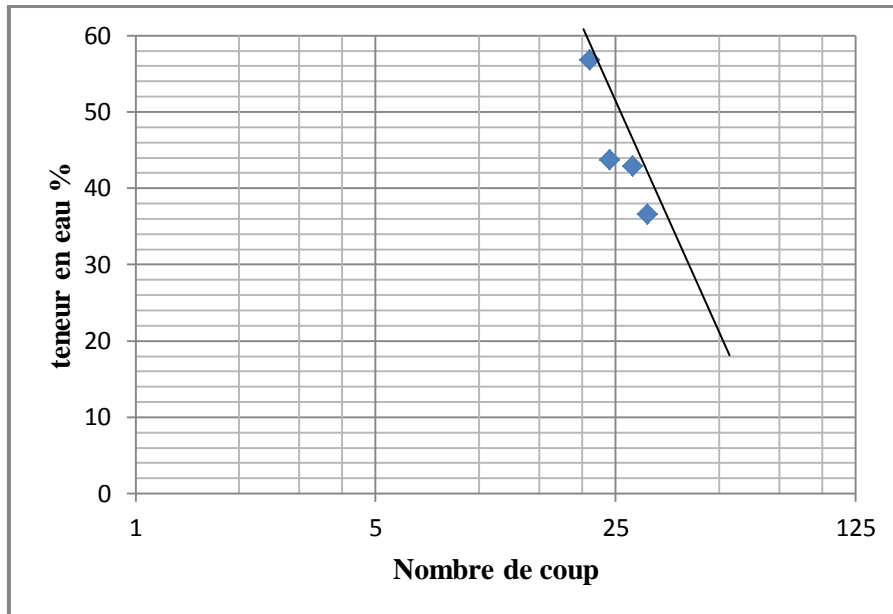
**Figure 1.** Détermination de la limite de liquidité par ajout de 5 % de chaux

### ANNEXE 2 :

**Tableau II.** Résultats de la limite de liquidité par ajout de 10 % de chaux

Nombre de coup	Masse de la tare	Masse humide + tare	Masse sèche+ tare	Teneur en eau (%)
21	24,1	36,8	32,2	56,79
24	11,1	16,1	14,7	43,75
28	10,1	15,1	13,6	42,85
31	11,6	17,5	15,7	36,58

# ANNEXES



**Figure 2.** Détermination de la limite de liquidité par ajout de 10 % de chaux

## ANNEXE 3 :

**Tableau III.** Classification des sols selon la Norme NF P 11 300 et G.T.R

Classe <b>A</b>		Tableau 1 - <i>Classification des sols fins</i>			
Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	<b>A</b> Sols fins	<b>VBS ≤ 2,5</b> <sup>(1)</sup> OU <b>I<sub>p</sub> ≤ 12</b>	<b>A<sub>1</sub></b> Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	<b>IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 3 OU <b>W<sub>n</sub> ≥ 1,25 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> th</b>
				<b>3 &lt; IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 8 OU <b>1,10 ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,25 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> h</b>
				<b>8 &lt; IPI ≤ 25</b> OU <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,1 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> m</b>
				<b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> s</b>
				<b>W<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> ts</b>
		<b>12 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 25</b> <sup>(1)</sup> OU <b>2,5 &lt; VBS ≤ 6</b>	<b>A<sub>2</sub></b> Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	<b>IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 2 OU <b>I<sub>c</sub></b> <sup>(1)</sup> ≤ 0,9 OU <b>W<sub>n</sub> ≥ 1,3 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> th</b>
				<b>2 &lt; IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 5 OU <b>0,9 ≤ I<sub>c</sub></b> <sup>(1)</sup> < 1,05 OU <b>1,1 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,3 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> h</b>
				<b>5 &lt; IPI ≤ 15</b> OU <b>1,05 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,2</b> OU <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,1 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> m</b>
				<b>1,2 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,4</b> OU <b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> s</b>
				<b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> OU <b>W<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> ts</b>
		<b>25 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 40</b> <sup>(1)</sup> OU <b>6 &lt; VBS ≤ 8</b>	<b>A<sub>3</sub></b> Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	<b>IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 1 OU <b>I<sub>c</sub></b> <sup>(1)</sup> ≤ 0,8 OU <b>W<sub>n</sub> ≥ 1,4 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> th</b>
				<b>1 &lt; IPI</b> <sup>(1)</sup> ≤ 3 OU <b>0,8 ≤ I<sub>c</sub></b> <sup>(1)</sup> < 1 OU <b>1,2 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,4 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> h</b>
				<b>3 &lt; IPI ≤ 10</b> OU <b>1 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,15</b> OU <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 1,2 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> m</b>
				<b>1,15 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,3</b> OU <b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ W<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> s</b>
				<b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> OU <b>W<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> ts</b>
		<b>I<sub>p</sub> &gt; 40</b> <sup>(1)</sup> OU <b>VBS &gt; 8</b>	<b>A<sub>4</sub></b> Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
<b>A<sub>4</sub> th</b>					
<b>A<sub>4</sub> h</b>					
<b>A<sub>4</sub> m</b>					
				<b>A<sub>4</sub> s</b>	

# ANNEXES

**Tableau III.** Classification des matériaux selon leur nature [Norme NF P 11 300 et G.T.R]

