

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU**  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Civil



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

### **Thème**

---

**Etude de l'effet combiné de la fumée de silice –  
ciment – chaux sur le comportement mécanique  
d'une argile**

---

Présenté par :

**M<sup>r</sup> BOUSSADIA Younes**

#### **Jury de soutenance :**

M <sup>r</sup> BOUDLAL O.	Président	U. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
M <sup>me</sup> MEZIANI F.	Promotrice	U. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
M <sup>me</sup> AIT BACHIR S.	Examinatrice	U. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
M <sup>r</sup> TERBOUCHE F.	Invité	U. Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

**Année universitaire : 2023 - 2024**

# REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à Madame MEZIANI Faroudja, Maître de conférences à l'UMMTO, pour son encadrement de grande qualité, sa patience infaillible, sa disponibilité constante, ainsi que pour ses qualités humaines exceptionnelles. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour la confiance et le soutien qu'elle m'a accordés dès le commencement de ce travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur BOUDLAL Omar, Maître de conférences à l'UMMTO, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ma soutenance.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers Madame AIT BACHIR Samia, Maître assistante à l'UMMTO, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers Monsieur KAHIL Amar, professeur à l'UMMTO pour son soutien inestimable et les moyens qu'il nous a généreusement mis à disposition, qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Sa générosité et ses qualités humaines ont été des atouts précieux tout au long de cette expérience, et cela a été extrêmement apprécié.

Les responsables du laboratoire de mécanique des sols de l'UMMTO, Madame BOUAZZOUNI Fatima et Monsieur KHELIFA Sid Ali, méritent mes remerciements sincères pour leur soutien constant et leur disponibilité précieuse tout au long de ce travail, sans oublier Monsieur TERBOUCHE Farid qui nous a facilité l'accès au site du prélèvement du sol.

Je tiens également à remercier ma famille, tous mes amis et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents et à  
tous mes amis

---

**Résumé :** Plusieurs techniques en génie civil, associant la fumée de silice, le ciment et la chaux à des sols, sont couramment utilisées dans divers projets de construction. Ces stabilisants sont largement étudiés et appliqués pour améliorer les propriétés des sols, offrant des solutions durables et efficaces aux défis géotechniques rencontrés. L'objectif de notre étude est, d'évaluer l'effet combiné de l'ajout de ces matériaux sur le comportement mécanique d'une argile. Les échantillons traités ont été soumis à des essais d'identification et à des essais mécaniques, notamment des essais de compactage avec le Proctor normal et des essais de résistance à la compression simple. Les résultats obtenus montrent que, l'incorporation de la fumée de silice, du ciment et de la chaux améliore significativement la capacité portante et la solidité des sols étudiés, en modifiant les paramètres tels que la densité maximale obtenue lors de l'essai Proctor et la résistance à la compression maximale lors de l'essai de compression simple en fonction des pourcentages d'ajout. Cette approche non seulement optimise les performances géotechniques des sols mais contribue également à une utilisation efficace des stabilisants, répondant ainsi aux exigences environnementales et technologiques actuelles du génie civil.

**Mots clés :** Argile, fumée de silice, ciment, chaux, stabilisants, compactage, Proctor, résistance à la compression.

---

---

**Abstract :** Several civil engineering techniques, combining silica fume, cement and lime with soils, are commonly used in various construction projects. These stabilizers are widely studied and applied to improve soil properties, offering sustainable and effective solutions to geotechnical challenges. The aim of our study is to evaluate the combined effect of the addition of these materials on the mechanical behavior of a clay. Treated samples were subjected to identification and mechanical tests, including normal Proctor compaction tests and simple compressive strength tests. The results obtained show that the incorporation of silica fume, cement and lime significantly improves the bearing capacity and strength of the soils studied, by modifying parameters such as the maximum density obtained in the Proctor test and the maximum compressive strength in the simple compression test as a function of the percentages of addition. This approach not only optimizes the geotechnical performance of soils, but also contributes to the efficient use of stabilizers, thus meeting current environmental and technological requirements in civil engineering.

**Keywords:** Clay, silica fume, cement, lime, stabilizers, compaction, Proctor, compression strength.

---

# Notation et nomenclature

<b>Indices</b>	<b>Désignations</b>
W	Teneur en eau
$M_w$	Masse de l'eau
$M_s$	La masse sèche
$M_h$	La masse humide
$M_t$	La masse de la tare
$W_L$	Limite de liquidité
$W_P$	Limite de plasticité
$I_P$	Indice de plasticité
$I_c$	Indice de consistance
$\rho_w$	La masse volumique de l'eau
$\rho_s$	La masse volumique des particules solides
$\rho_d$	La masse volumique sèche
$M_B$	La masse du bleu de méthylène introduite dans le bécher
$V_B$	Le volume du bleu de méthylène
M	La masse de l'échantillon
$W_{opt}$	La teneur en eau optimale
$R_c$	La résistance à la compression

# Liste des figures

## CHAPITRE I: Généralités sur les argiles

Figure I.1.	Processus de formation de l'argile [2].	- 4 -
Figure I.2.	Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération [3].	- 4 -
Figure I.3.	Portion de sol constitué de grains solides (s) entourés de vides remplis d'air (A) et d'eau (W) [4]	- 5 -
Figure I.4.	Couches tétraédriques et octaédriques [5].	- 6 -
Figure I.5.	Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [6].	- 6 -
Figure I.6.	Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [8].	- 7 -
Figure I.7.	Vue isométrique de la structure atomique de l'illite [10].	- 8 -
Figure I.8.	Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite [4].	- 9 -
Figure I.9.	Formes des particules argileuses [14].	- 11 -
Figure I.10.	Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol [14].	- 12 -
Figure I.11.	Phénomène du retrait-gonflement des argiles [24].	- 16 -
Figure I.12.	Dégradations et fissurations des façades des bâtiments (Photo prise à Tizi-Ouzou).	- 17 -
Figure I.13.	Déformation d'une chaussée.	- 18 -
Figure I.14.	Désordres dus au gonflement (Photo prise à Tizi-Ouzou).	- 18 -
Figure I.15.	Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain (Azazga).	- 19 -
Figure I.16.	Fissuration d'une maison lors d'un glissement de terrain (Azazga).	- 19 -
Figure I.17.	Tassement uniforme	- 20 -
Figure I.18.	Tassement différentiel	- 20 -
Figure I.19.	Phénomène d'érosion dans les remblais routiers.	- 21 -

## Chapitre II: Techniques de stabilisation et traitement des sols argileux

Figure II.1.	Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).	- 24 -
Figure II.2.	Le Vibro-compactage.	- 25 -
Figure II.3.	Drain filtre [34].	- 26 -
Figure II.4.	Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.	- 27 -
Figure II.5.	Chantier de traitement d'un sol à la chaux.	- 29 -
Figure II.6.	Malaxage de sol avec le ciment.	- 30 -
Figure II.7.	Mise en œuvre de sol-ciment.	- 30 -
Figure II.8.	Obtention des cendres volantes.	- 31 -
Figure II.9.	Stock des cendres volantes.	- 32 -
Figure II.10.	Application des cendres volantes sur une route.	- 32 -
Figure II.11.	La fumée de silice.	- 34 -
Figure II.12.	Stabilisation d'un sol au bitume.	- 34 -
Figure II.13.	Poudre de marbre.	- 35 -
Figure II.14.	Poudre de verre.	- 36 -
Figure II.15.	La coquille d'œuf calcinée.	- 38 -
Figure II.16.	Scarification des sols.	- 38 -
Figure II.17.	Epandage de liant.	- 39 -
Figure II.18.	Contrôle de l'épandage : pesée de l'agent de traitement épandu sur un plateau en aluminium.	- 40 -
Figure II.19.	Malaxage du liant avec le sol.	- 41 -

Figure II.20.	Compacteur.	- 41 -
Figure II.21.	Réglage d'une couche compactée avec niveleuse.	- 42 -
Figure II.22.	Planche d'essai.	- 43 -

### **Chapitre III: Essais d'identification**

Figure III.1.	Localisation de la zone d'extraction du sol utilisé	- 45 -
Figure III.2.	Extraction du sol à l'aide d'une pelle mécanique.	- 46 -
Figure III.3.	Appareillage pour déterminer la teneur en eau.	- 46 -
Figure III.4.	Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.	- 48 -
Figure III.6.	Courbe granulométrique de l'argile étudiée.	- 49 -
Figure III.7.	Le matériel nécessaire pour la détermination de la masse volumique des particules solides du sol.	- 50 -
Figure III.8.	Limite d'Atterberg d'un sol.	- 52 -
Figure III.9.	Matériel de limite de liquidité.	- 52 -
Figure III.10.	Détermination de limite de liquidité (W <sub>L</sub> ).	- 53 -
Figure III.11.	Limite de liquidité du sol.	- 54 -
Figure III.12.	Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.	- 55 -
Figure III.13.	Les étapes de l'essai de limite de plasticité.	- 55 -
Figure III.14.	Abaque de plasticité de Casagrande.	- 56 -
Figure III.15.	Appareillage pour essai bleu de méthylène.	- 59 -
Figure III.16.	Observations de taches de l'essai VBS.	- 60 -
Figure III.17.	Fumée de silice utilisée.	- 61 -
Figure III.18.	Ciment utilisé.	- 62 -
Figure III.19.	Chaux utilisée.	- 62 -

### **Chapitre IV: Compactage et portance du sol étudié**

Figure IV.1.	Exécution des essais Proctor normal et modifié.	- 64 -
Figure IV.2.	Matériaux de l'essai Proctor.	- 65 -
Figure IV.3.	Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal.	- 66 -
Figure IV.4.	Extraction d'une éprouvette avec un cric.	- 66 -
Figure IV.5.	Forme de la courbe Proctor.	- 66 -
Figure IV.6.	Courbe Proctor (sans ajout).	- 68 -
Figure IV.7.	Courbe Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice.	- 69 -
Figure IV.8.	Courbe Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice.	- 70 -
Figure IV.9.	Courbe Proctor à l'état naturel, et avec ajout de 4% et 6% de fumée de silice.	- 71 -
Figure IV.10.	Courbes Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment.	- 73 -
Figure IV.11.	Courbes Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment.	- 75 -
Figure IV.12.	Courbes Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de chaux.	- 77 -
Figure IV.13.	Courbes Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de chaux.	- 79 -

### **Chapitre V: Essais de compression simple**

Figure V.1.	Exécution de l'essai de compression uniaxiale.	- 82 -
Figure V.2.	Courbe de résistance à la compression (R <sub>c</sub> ) à l'état naturel	- 82 -
Figure V.3.	Courbe de résistance à la compression (R <sub>c</sub> ) avec ajout de 4% de fumée de silice.	- 83 -
Figure V.4.	Courbe de résistance à la compression (R <sub>c</sub> ) avec ajout de 4% de fumée de silice.	- 83 -
Figure V.5.	Courbe de résistance à la compression (R <sub>c</sub> ) avec ajout de 4% de fumée de silice.	- 84 -

Figure V.6.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de ciment	- 84 -
Figure V.7.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de ciment	- 85 -
Figure V.8.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de ciment	- 85 -
Figure V.9.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de ciment.	- 86 -
Figure V.10.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 2% de ciment	- 87 -
Figure V.11.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 4% de ciment	- 87 -
Figure V.12.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 6% de ciment	- 87 -
Figure V.13.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de ciment.	- 88 -
Figure V.14.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de chaux	- 89 -
Figure V.15.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de chaux	- 89 -
Figure V.16.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de chaux	- 89 -
Figure V.17.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.	- 90 -
Figure V.18.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 2% de chaux	- 91 -
Figure V.19.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 4% de chaux	- 91 -
Figure V.20.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 6% de chaux	- 91 -
Figure V.21.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.	- 92 -

# Liste des tableaux

## Chapitre I: Généralités sur les argiles

Tableau I.1.	Classification des phyllosilicates [11].	- 10 -
Tableau I.2.	Caractéristiques de quelques minéraux argileux [12].	- 10 -
Tableau I.3.	Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles.	- 13 -
Tableau I.4.	Principales utilisations de l'argile	- 16 -

## Chapitre II: Techniques de stabilisation et traitement des sols argileux

Tableau II.1.	Composition minéralogique de la fumée de silice.	- 33 -
---------------	--	--------

## Chapitre III: Essais d'identification

Tableau III.1.	Les résultats de la teneur en eau.	- 47 -
Tableau III.2.	Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique des particules.	- 51 -
Tableau III.3.	Résultats de limite de liquidité.	- 53 -
Tableau III.4.	Résultats de la limite de plasticité.	- 55 -
Tableau III.5.	Types des sols en fonction de l'indice de plasticité Ip.	- 56 -
Tableau III.6.	Nature du sol en fonction de l'indice de plasticité Ip.	- 57 -
Tableau III.7.	Etat du sol en fonction de l'indice de consistance.	- 57 -
Tableau III.8.	Classement de la valeur du VBS.	- 60 -
Tableau III.9.	Analyse chimique de la fumée de silice.	- 61 -

## Chapitre IV: Compactage et portance du sol étudié

Tableau IV.1.	Les résultats de l'essai Proctor (sans ajout).	- 67 -
Tableau IV.2.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice.	- 68 -
Tableau IV.3.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice.	- 69 -
Tableau IV.4.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de ciment.	- 72 -
Tableau IV.5.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de ciment.	- 72 -
Tableau IV.6.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de ciment.	- 72 -
Tableau IV.7.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de ciment.	- 74 -
Tableau IV.8.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de ciment.	- 74 -
Tableau IV.9.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 6% de ciment.	- 74 -
Tableau IV.10.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de chaux.	- 76 -
Tableau IV.11.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de chaux.	- 76 -
Tableau IV.12.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de chaux.	- 76 -
Tableau IV.13.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de chaux.	- 78 -
Tableau IV.14.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de chaux.	- 78 -
Tableau IV.15.	Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 6% de chaux.	- 78 -

# **Sommaire**

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Notation et nomenclature	
liste de figures	
liste de tables	
Introduction générale	-1-
<b>Chapitre I: Généralités sur les argiles</b>	
I.1. Introduction	- 3 -
I.2. Définition des argiles	- 3 -
I.3. Origines et formation des argiles	- 3 -
I.4. Minéralogie des argiles	- 4 -
I.5. Structure des sols argileux et liaisons structurelles	- 5 -
I.5.1. Unité structurale tétraédrique	- 5 -
I.5.2. Unité structurale octaédrique	- 5 -
I.6. Les principales catégories des minéraux argileux	- 7 -
I.6.1. La famille de la kaolinite (T-O ou 1:1)	- 7 -
I.6.2. Famille de l'illite (T-O-T ou 2:1) (argiles micacées, ou hydro micas)	- 8 -
I.6.3. Famille de la montmorillonite (T-O-T ou 2:1)	- 8 -
I.6.4. Famille des chlorites (T-O-T-O ou 2:1:1)	- 9 -
I.6.5. Les polyphillites (ou argiles inter stratifiées)	- 9 -
I.6.6. Les argiles fibreuses	- 9 -
I.7. Propriétés des argiles	- 10 -
I.7.1. Forme et surface spécifique	- 11 -
I.7.2. Degré d'hydratation	- 11 -
I.7.3. Capacité d'échange cationique (C.E.C)	- 12 -
I.7.4. Activité des argiles	- 13 -
I.7.5. Propriétés colloïdales	- 13 -
I.7.6. Propriétés de gonflement	- 14 -
I.7.7. Absorption et adsorption	- 14 -
I.7.8. Rétention des métaux par les argiles	- 14 -
I.7.9. La théorie d'échange d'ions	- 14 -
I.7.10. Échanges d'eau	- 15 -
I.8. Utilisations des argiles	- 15 -
I.9. Les principaux problèmes des sols argileux	- 16 -
I.9.1. Le phénomène du retrait gonflement	- 16 -
I.9.2. Phénomène de glissement	- 19 -
I.9.3. Phénomène de tassement	- 20 -
I.9.4. Problème d'érosion	- 21 -
I.9.5. Insuffisance de la portance	- 21 -
I.10. Conclusion	- 22 -

---

<b>Chapitre II: Techniques de stabilisation et traitement des sols argileux</b>	
II.1. Introduction	- 23 -
II.2. But de la stabilisation des sols	- 23 -
II.3. Les techniques d'amélioration des sols	- 23 -
II.3.1. Les méthodes mécaniques	- 23 -
II.3.1.1. Le compactage dynamique	- 24 -
II.3.1.2. Le vibro-compactage	- 24 -
II.3.2. Les méthodes hydromécaniques	- 25 -
II.3.2.1. Le préchargement ou précompression	- 25 -
II.3.2.2. Amélioration des sols par drainage	- 26 -
II.3.3. Les méthodes thermiques	- 27 -
II.3.3.1. La congélation	- 27 -
II.3.3.2. La déshydratation	- 28 -
II.3.4. Les méthodes chimiques	- 28 -
II.3.4.1. Utilisation de la chaux	- 28 -
II.3.4.1.1. Définition	- 28 -
II.3.4.1.2. Mécanismes de stabilisation à la chaux	- 28 -
II.3.4.2. Stabilisation aux cendres volantes	- 31 -
II.3.4.3. La fumée de silice	- 32 -
II.3.4.3. Stabilisation au bitume	- 34 -
II.3.5. Stabilisation des sols par ajout de déchets	- 35 -
II.3.5.1. La poudre de marbre	- 35 -
II.3.5.2. La poudre de verre	- 35 -
II.3.5.3. La poussière des fours à ciment	- 36 -
II.3.5.4. Le carbure de calcium	- 36 -
II.3.5.5. Le phosphogypse	- 37 -
II.3.5.5. La coquille d'œuf calcinée	- 37 -
II.4. Techniques de stabilisation de sols sur terrain	- 38 -
II.4.1. Préparation du sol	- 38 -
II.4.2. Epannage	- 39 -
II.4.3. Malaxage	- 40 -
II.4.4. Compactage	- 41 -
II.4.5. Réglage	- 42 -
II.4.6. Planche d'essai	- 42 -
II.5. Avantages du traitement des sols	- 43 -
II.5.1. Avantages techniques	- 43 -
II.5.2. Avantages économiques	- 44 -
II.5.3. Avantages écologiques et environnementaux	- 44 -
II.6. Conclusion	- 44 -

### Chapitre III: Essais d'identification

III.1. Introduction	- 45 -
III.2. Matériaux utilisés	- 45 -
III.2.1. Sol utilisé	- 45 -
III.2.1.1. Prélèvement des échantillons	- 45 -
III.2.1.2. La teneur en eau [NF P94-050]	- 46 -
A- Objectif	- 46 -
B- Appareillage	- 46 -
C- Mode opératoire	- 46 -
III.2.1.3. Analyse granulométrique [NF P 94-056]	- 47 -
III.2.1.4. Détermination de la masse volumique des particules solides [NF P 94-054]	- 49 -
A- Objectif et but de l'essai	- 49 -
B- Le matériel utilisé	- 49 -
C. Exécution de l'essai	- 50 -
III.2.1.5. Les limites d'Atterberg [NF P 94-051]	- 51 -
A- La limite de liquidité	- 52 -
A.1. Le matériel nécessaire	- 52 -
A.2. Le principe de l'essai	- 52 -
A.3. Le mode opératoire	- 52 -
B- La limite de plasticité	- 54 -
B.1. Le matériel nécessaire	- 54 -
B.2. Le mode opératoire	- 54 -
B.3. Le type du sol	- 56 -
B.4. La nature du sol	- 56 -
B.5. L'indice de consistance	- 57 -
III.2.1.6. Essai au bleu de Méthylène (VBS) [NF P 94-068]	- 57 -
A- Le but de l'essai	- 57 -
B- Le principe de l'essai	- 58 -
C- Le matériel nécessaire	- 58 -
D- Conduite de l'essai	- 59 -
III.2.2. Fumée de silice utilisée	- 60 -
III.2.3. Ciment utilisé	- 61 -
III.2.4. Chaux utilisée	- 62 -
III.5. Conclusion	- 62 -

### Chapitre IV: Compactage et portance du sol étudié

IV.1. Introduction	- 63 -
IV.2. Les principes de base du compactage	- 63 -
IV.3. Essais Proctor	- 63 -
IV.4. Essai Proctor normal [NF P 94-093]	- 64 -
IV.4.1. Le but de l'essai	- 64 -
IV.4.2. Principe de l'essai	- 64 -
IV.4.3. Matériel nécessaire	- 65 -

IV.4.4. Le mode opératoire	- 65 -
IV.4.5. Les calculs	- 67 -
IV.5. Résultats et interprétations	- 67 -
IV.5.1. Essai Proctor sans ajout	- 67 -
IV.5.2. Essai Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice	- 68 -
IV.5.3. Essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice	- 69 -
Comparaison des résultats	- 70 -
Conclusion	- 71 -
IV.5.4. Essais Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment	- 72 -
IV.5.5. Essais Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment	- 73 -
Conclusion	- 75 -
IV.5.6. Essais Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de chaux	- 76 -
IV.5.7. Essais Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de chaux	- 77 -
IV.6. Conclusion	- 79 -

### **Chapitre V: Essais de compression simple**

V.1. Introduction	- 80 -
V.2. Essai de compression simple [NF P 94-077]	- 80 -
V.3. Principe de l'essai	- 80 -
V.4. Appareillage	- 80 -
V.5. Eprouvette	- 81 -
V.6. Mode opératoire	- 81 -
V.7. Présentation des résultats	- 82 -
V.7.1. Essai de compression simple à l'état naturel (sans ajout)	- 82 -
V.7.2. Essai de compression simple avec ajout de 4% de fumée de silice	- 82 -
V.7.3. Essai de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice	- 83 -
V.7.4. Interprétation des résultats	- 83 -
V.8. Essais de compression simple avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment.	- 84 -
V.9. Essais de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment.	- 86 -
V.10. Essais de compression simple avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de chaux.	- 88 -
V.11. Essais de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.	- 90 -
V.12. Récapitulatif des résultats obtenus	- 92 -
V.13. Conclusion	- 93 -
Conclusion générale	-94-
Références bibliographiques	-95-

# Introduction générale

Les matériaux argileux sont des mélanges naturels complexes de minéraux présentant une granulométrie et des propriétés physiques, chimiques et mécaniques extrêmement variables. Leur composition minérale diversifiée confère à chaque type d'argile des caractéristiques uniques qui influencent directement leur comportement géotechnique. Ces variations peuvent engendrer des réponses différentes en termes de plasticité, de compressibilité et de cohésion en fonction des conditions environnementales et de la composition spécifique de l'argile. Cette complexité minéralogique nécessite une approche attentive lors de l'analyse et de l'utilisation des argiles dans les applications du génie civil, où la compréhension approfondie de leurs propriétés est essentielle pour garantir la performance et la durabilité des infrastructures construites.

Pour répondre aux exigences croissantes du secteur de la construction, les ingénieurs et chercheurs se concentrent sur la stabilisation des sols par l'incorporation de stabilisants. Cette approche vise à améliorer non seulement la quantité mais aussi la qualité des matériaux de construction disponibles. La stabilisation des sols est essentielle pour renforcer les propriétés mécaniques des sols naturels, notamment leur résistance, leur cohésion et leur durabilité. En intégrant divers stabilisants, les ingénieurs cherchent à optimiser les performances des sols, réduire les risques de tassement, de déformation et garantir la fiabilité des infrastructures construites.

L'objectif de notre étude est, d'étudier l'effet combiné des trois ajouts (fumée de silice, ciment et chaux) sur le comportement mécanique d'une argile.

L'étude présentée est divisée en deux parties. La première partie, théorique, présente les principes fondamentaux des sols argileux, leurs propriétés et les divers problèmes qu'ils posent en géotechnique, ainsi qu'un état de l'art sur les stabilisants utilisés pour leur amélioration. La seconde partie est expérimentale, détaillant les méthodologies et résultats des essais Proctor pour évaluer le compactage des mélanges d'argile avec les stabilisants, ainsi que les essais de résistance à la compression pour étudier la capacité portante et la stabilité des mélanges stabilisés.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire en cinq chapitres :

- **Le premier chapitre** « Généralités sur les argiles » est consacré à la présentation des argiles, leurs structures, leurs méthodes d'identification, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et leurs problèmes.

- **Le deuxième chapitre** « Techniques de traitement et stabilisation des sols argileux » présente une synthèse bibliographique sur la stabilisation et les divers stabilisants à incorporer aux sols argileux pour répondre aux exigences de qualité que doit avoir un matériau moderne.
- **Le troisième chapitre** « Présentation et identification des matériaux utilisés » englobe la partie expérimentale de cette étude réalisée au niveau du laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Dans ce chapitre, sont présentés les différents essais d'identification du matériau utilisé.
- **Le quatrième chapitre** « Essais de portance et de compactage » présente les méthodologies employées pour réaliser les essais Proctor sur des mélanges d'argile stabilisés. Ces essais ont permis d'évaluer les propriétés de compactage des mélanges sous différentes conditions de stabilisation, ainsi que la présentation et l'interprétation des résultats obtenus.
- **Le cinquième chapitre** « Essais de compression simple » se concentre sur l'évaluation de la résistance à la compression des mélanges d'argile stabilisés. Ce chapitre présente les méthodologies utilisées pour réaliser les essais de compression simple, ainsi que l'analyse détaillée des résultats obtenus et leur interprétation.

Enfin, on termine cette étude par une conclusion générale, où on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## Généralités sur les argiles

**I.1. Introduction**

Dans leur état naturel, les sols sont des matériaux hétérogènes avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés à l'utilisation des sols dans les terrassements des infrastructures de transport (routes, chemins de fer, aéroports, ports...) se manifestent en général par une capacité portante faible, des déformations (tassements) et des glissements de talus. Le développement de la mécanique des sols, et les recherches dans le domaine de la géotechnique, ont permis de mieux connaître les sols à travers des essais de caractérisation afin de mettre au point des techniques permettant l'amélioration des sols présentant de médiocres propriétés mécaniques.

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux généralités sur les argiles, ainsi-que les différentes pathologies rencontrées lors de la réalisation des différents ouvrages sur ce type de sols.

**I.2. Définition des argiles**

L'argile se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à  $2\mu\text{m}$ . Chargée négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques. Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre [1].

**I.3. Origines et formation des argiles**

Les argiles désignent de très fines particules de matière arrachées aux roches par l'érosion ainsi que les minéraux argileux ou phyllosilicates (ces dernières observées au microscope ont la forme de plaquettes, ce qui explique leur plasticité) (Figure I.2) . La plupart de ces particules proviennent de la désagrégation de roches silicatées (altération des silicates), du granite (mica et feldspath), du gneiss ou encore des schistes.

Ces particules sont transportées par le vent ou l'eau sous forme de limon ou de vase. Les fleuves véhiculent des argiles qui finissent par se déposer en alluvions, dans le cours d'eau lui-même, à son embouchure, dans un lac ou dans la mer. Les dépôts peuvent alors sédimenter et former une roche argileuse par diagenèse : déshydratation et compactage. En tant que roches sédimentaires, les affleurements argileux présentent une succession de strates empilées les unes sur les autres (Figure I.1).

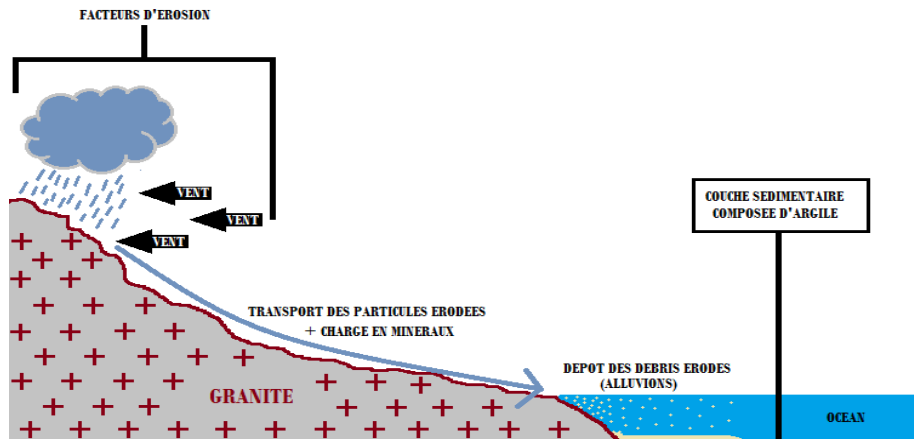


Figure I.1. Processus de formation de l'argile [2].

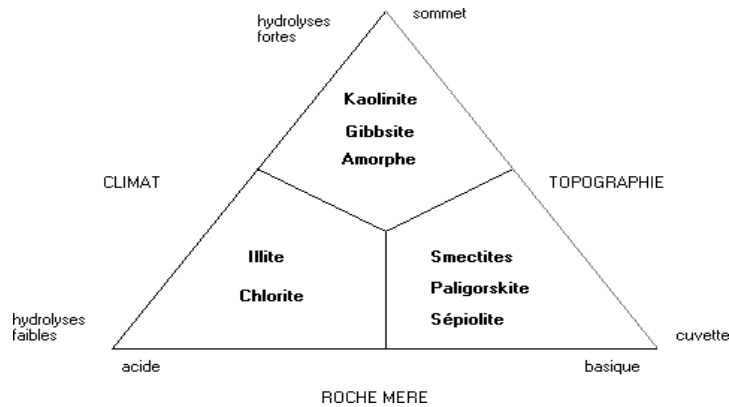


Figure I.2. Les différents types de phyllosilicates formés au cours de l'altération [3].

#### I.4. Minéralogie des argiles

Les sols sont en général constitués de trois phases distinctes (Figure I.3). Une phase solide, liquide et gazeuse. Les propriétés globales du sol dépendent des propriétés de chacune de ces phases mais aussi de leurs proportions respectives. La phase solide contient une fraction minérale et de matière organique dont l'assemblage constitue le squelette du sol. Autour de ce squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, ou de l'air. La fraction minérale représente l'ensemble des produits de l'altération physique et chimique d'une roche mère. Elle est principalement constituée de carbonates, d'oxydes et d'hydroxydes métalliques et de silicate. Ces derniers sont source principale des minéraux argileux.

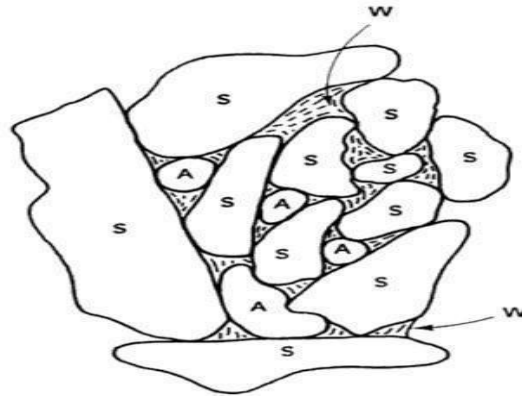


Figure I.3. Portion de sol constitué de grains solides (s) entourés de vides remplis d'air (A) et d'eau (W) [4]

Les minéraux argileux sont caractérisés par leur structure en feuillets. Le réseau cristallographique est basé sur un assemblage de tétraèdres, chaque tétraèdre partageant trois sommets avec les tétraèdres voisins. L'ensemble des sommets partagés constitue un assemblage plan hexagonal. Le sommet du tétraèdre qui n'est pas dans le plan est partagé avec un octaèdre  $\text{Al}(\text{OH})_6$ . C'est l'association de couches tétraédriques (T) et de couches octaédriques (O) qui constitue le motif du réseau cristallin de chaque argile [4].

### I.5. Structure des sols argileux et liaisons structurelles

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

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

#### I.5.1. Unité structurale tétraédrique

L'unité structurale tétraédrique est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygène ( $\text{O}^{2-}$ ) enserrant un ion de silicium ( $\text{Si}^{4+}$ ), équidistant de chacun d'eux. Ce tétraèdre est matérialisé par la présence d'une cavité comprise entre trois sphères en contact, d'une couche hexagonale d'oxygène, et une sphère de la couche contiguë d'oxygène (Figure I.4.a).

#### I.5.2. Unité structurale octaédrique

L'unité structurale octaédrique est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium ( $\text{Al}^{+3}$ ) ou de magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) est équidistant aux six hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) aux sommets. Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes (Figure I.4.b).

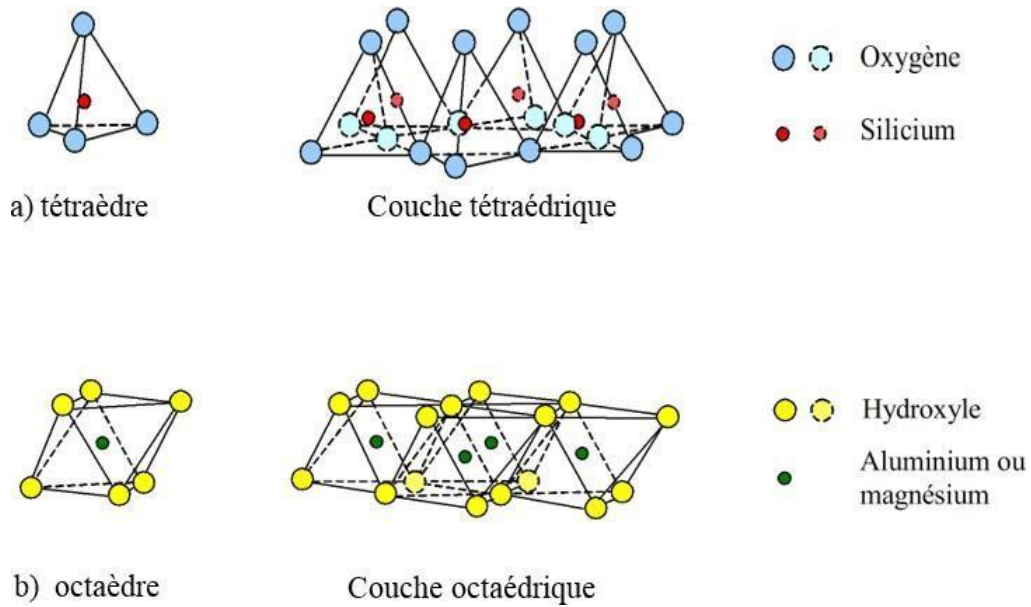


Figure I.4. Couches tétraédriques et octaédriques [5].

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (Figure I.5) :

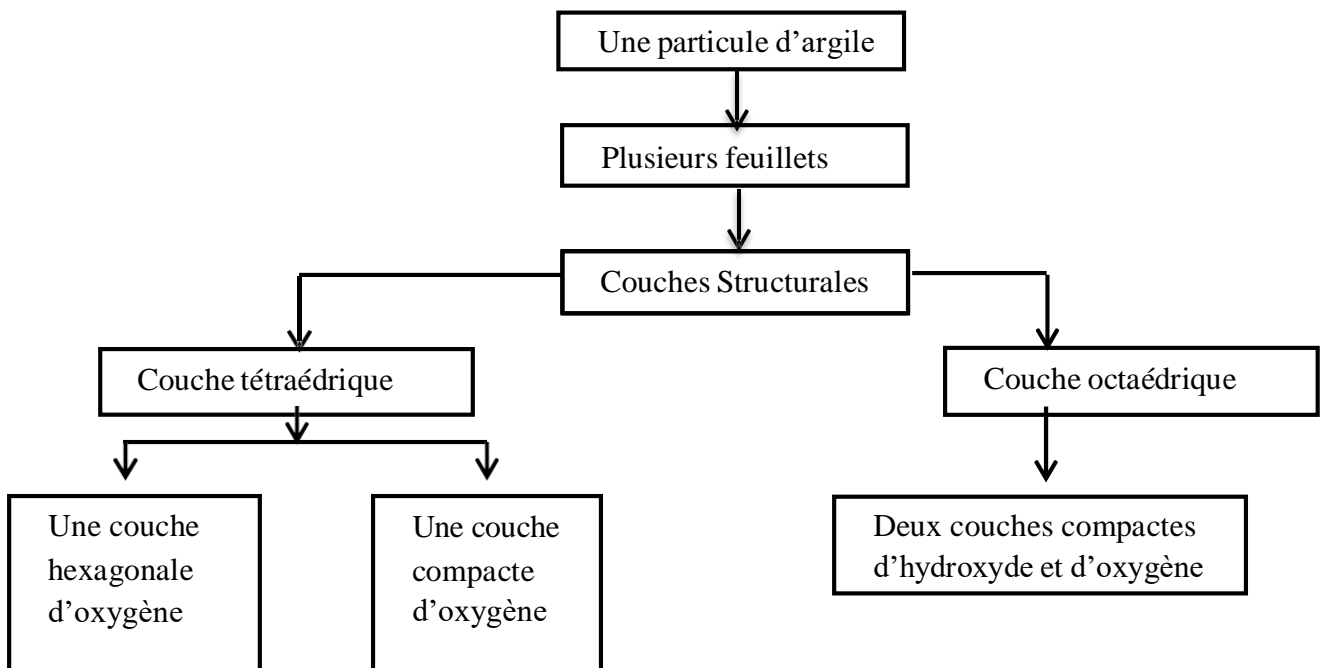


Figure I.5. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile [6].

## I.6. Les principales catégories des minéraux argileux

Il est possible de distinguer les types de minéraux argileux par :

- le nombre de couches d'octaèdres et de tétraèdres dans le feuillet élémentaire (une ou deux) ;
- l'équidistance entre deux feuillets dans les conditions naturelles ;
- la variabilité de l'équidistance entre deux feuillets sous l'action de traitements variés.

### I.6.1. La famille de la kaolinite (T-O ou 1:1)

A une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres, l'épaisseur du feuillet élémentaire est de 7 Å. Ces feuillets élémentaires adhèrent assez fortement entre eux par leurs faces basales, des liaisons hydrogènes existant entre les oxhydroyles de la base d'un feuillet et les oxygènes du haut du feuillet en dessous. Il constitue ainsi une particule primaire, qui comprend de 70 à 100 feuillets accolés. L'halloysite résulte de l'adjonction des couches d'eau entre les feuillets, l'équidistance entre les feuillets hydratés est donc variable dans ce cas [7].

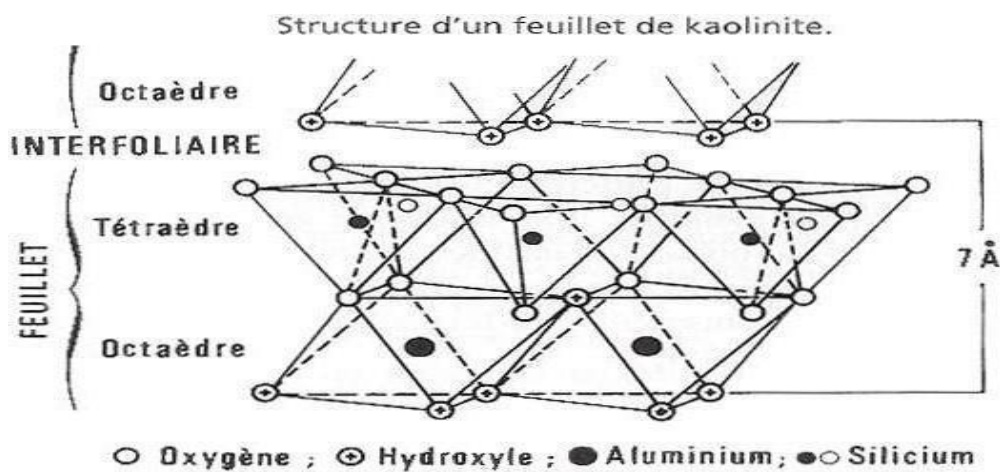


Figure I.6. Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [8].

Les liaisons au sein du feuillet sont de type ion covalentes, sachant que les liaisons (Si-O) ont un caractère covalent plus marqué que les liaisons (Al-O) qui sont essentiellement ioniques. D'un feuillet de kaolinite à l'autre des ions hydroxyles (OH) des couches octaédriques sont en vis-à-vis d'un plan contenant des ions d'oxygène ( $O^{2-}$ ) de la couche tétraédrique. La composition chimique massique d'une kaolinite pure correspondant à la formule structurale est :  $SiO_2 = 46,5\%$  ;  $Al_2O_3 = 39,5\%$  ;  $H_2O = 13,9\%$ . Typiquement, une particule de kaolinite est constituée de l'empilement de l'ordre d'une centaine de feuillets ; elle se présente au microscope électronique à balayage sous forme de plaquettes hexagonales de dimensions

variables entre 3 et 10  $\mu\text{m}$  de diamètre avec une épaisseur de l'ordre de 0,7  $\mu\text{m}$ . Elle a une grande surface spécifique comprise entre 10 et 100  $\text{m}^2/\text{g}$  et une masse volumique d'environ 2,6  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Cependant, à l'état naturel, la kaolinite se trouve associée à d'autres minéraux, notamment du quartz, des feldspaths et des micas en quantité variable ; des oxydes et hydroxydes de fer et/ou d'aluminium, des carbonates et des matières organiques sont également présents mais en faible proportion [9].

### I.6.2. Famille de l'illite (T-O-T ou 2:1) (argiles micacées, ou hydro micas)

L'illite et la muscovite appartiennent à la famille des phyllosilicates 2:1 dioctaédriques, caractérisée par un empilement régulier de feuillets constitués d'une couche octaédrique alumineuse prise en sandwich entre deux couches tétraédriques. Une illite est un silicate hydroxylé d'aluminium et de potassium avec un peu de silicium, de magnésium, de fer, et d'eau. Structuellement la muscovite est assez similaire à l'illite mais avec de la silicate hydroxylé d'aluminium et de potassium uniquement. Les liaisons au sein des feuillets sont identiques au cas de la kaolinite alors que les liaisons inter-feuillets sont assurées par l'attraction électrostatique entre les feuillets et les ions potassium et sont de ce fait plus fortes par rapport au cas de la kaolinite.

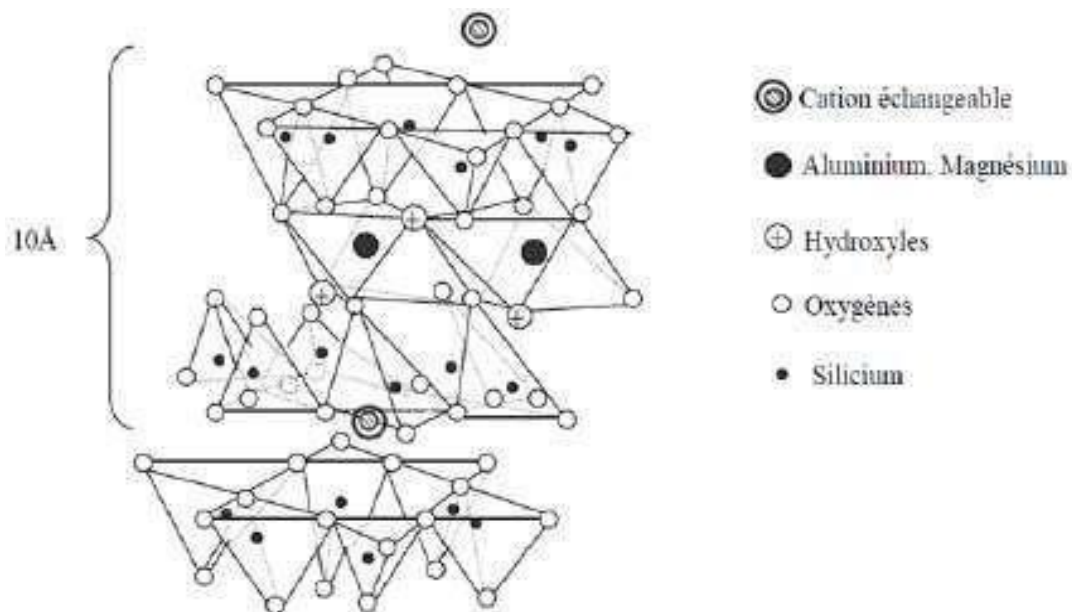


Figure I.7. Vue isométrique de la structure atomique de l'illite [10].

### I.6.3. Famille de la montmorillonite (T-O-T ou 2:1)

La montmorillonite appartient à la famille des smectites (les phyllosilicates 2:1 gonflants). Le feuillet élémentaire est caractérisé par l'empilement de 2 couches tétraédriques séparées par une couche octaédrique. Les atomes de silicium constituent majoritairement les tétraèdres

mais des cations (Al, Fe) peuvent se substituer au Si dans ces tétraèdres. Les couches octaédriques sont quant à elles composées d'aluminium, de magnésium, de fer, etc. La montmorillonite, dont une représentation schématique est donnée à la figure I.8, est la smectite la plus connue et la plus étudiée.

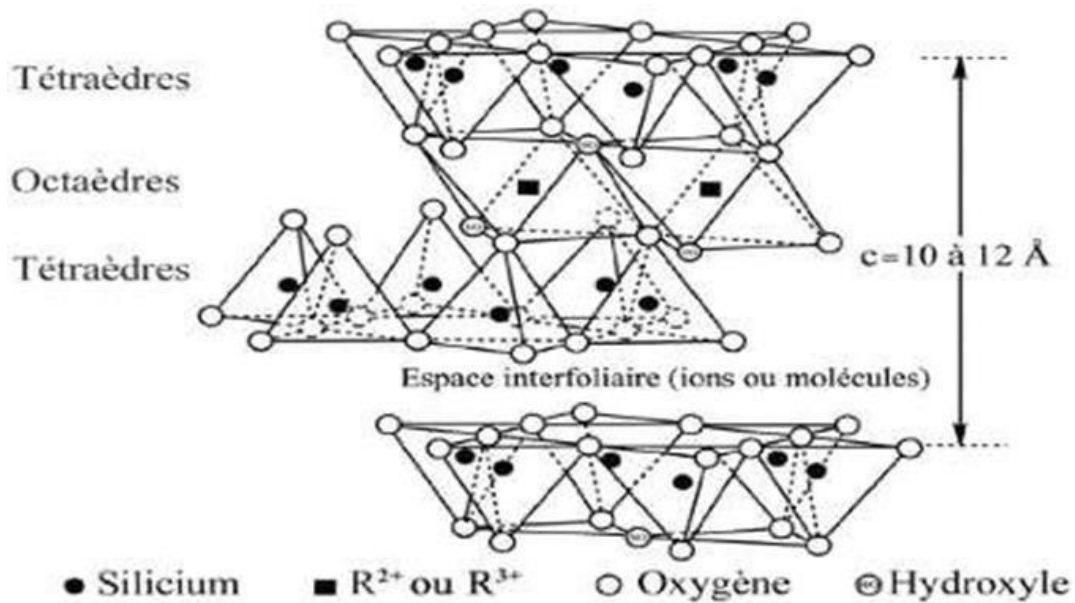


Figure I.8. Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite [4].

#### I.6.4. Famille des chlorites (T-O-T-O ou 2:1:1)

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdre ; les feuilles épaisses de 14 Å sont assez fortement liées entre elles pour les chlorites vrais. Les pseudos chlorites peuvent présenter des phénomènes de gonflement notables.

#### I.6.5. Les polyphillites (ou argiles inter stratifiées)

Elles sont composées de l'empilement de plusieurs catégories de feuillets, en général deux.

#### I.6.6. Les argiles fibreuses




Ces argiles se présentent sous forme de fibres et non de lamelles. Elles sont constituées de feuillets qui n'ont pas une extension infinie, d'où une architecture générale du type brique creuse. Ce groupe est représenté par les actapulgites et les palygorskites.

Tableau I.1. Classification des phyllosilicates [11].

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cations ou seulement de l'eau	Kaolinite	Diocatédrigue	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cations	Pyrophyllites	Diocatédrigue	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Diocatédrigue	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Diocatédrigue	Vermiculite diocatédrigue à trioctatédrigue
	Cations monovalents non-hydratés	Micas	Diocatédrigue	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Diocatédrigue	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Diocatédrigue	Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diocatédrigue	Sépiolite, Palygorskite

Les caractéristiques de quelques minéraux argileux sont citées dans le tableau suivant :

Tableau I.2. Caractéristiques de quelques minéraux argileux [12].

Les minéraux argileux	Kaolinite	L'illite	Montmorillonite
Charge (m.eq/100 g)	3-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m <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
Epaisseur d'une particule (μm)	1-10	0.003-0.01	0.001
Diamètres d'une particule (μm)	0.1-4	0.1-1	0.1
Feuillets élémentaires			

### I.7. Propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales : leur forme et leur surface spécifique, leur capacité d'adsorption d'eau de gonflement et leurs multiples possibilités d'échanges ioniques [13].

### I.7.1. Forme et surface spécifique

Les argiles se présentent sous trois formes (Figure I.9) :

- en flocons, caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à  $1/20^{\text{ième}}$  de la longueur ;
- en latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à  $1/20^{\text{ième}}$  de la longueur ;
- en aiguilles, deux dimensions identiques et la  $3^{\text{ième}}$  beaucoup plus grande (assez rare).

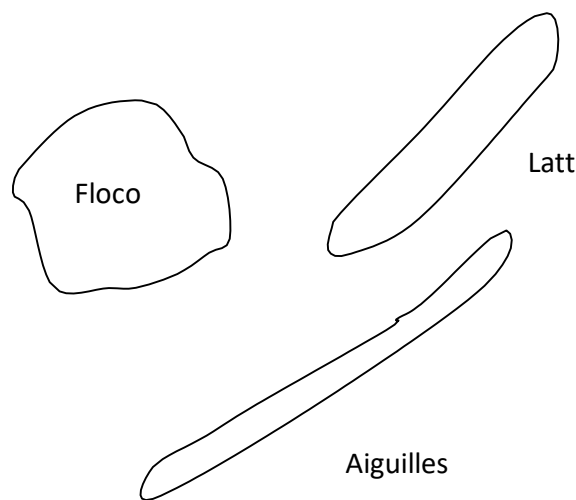


Figure I.9. Formes des particules argileuses [14].

Les particules d'argiles présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre elles d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule. Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20  $\text{m}^2/\text{g}$  et peut atteindre 800  $\text{m}^2/\text{g}$  dans le cas de la montmorillonite sodique. Le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande [15].

### I.7.2. Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes.

Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau [14].

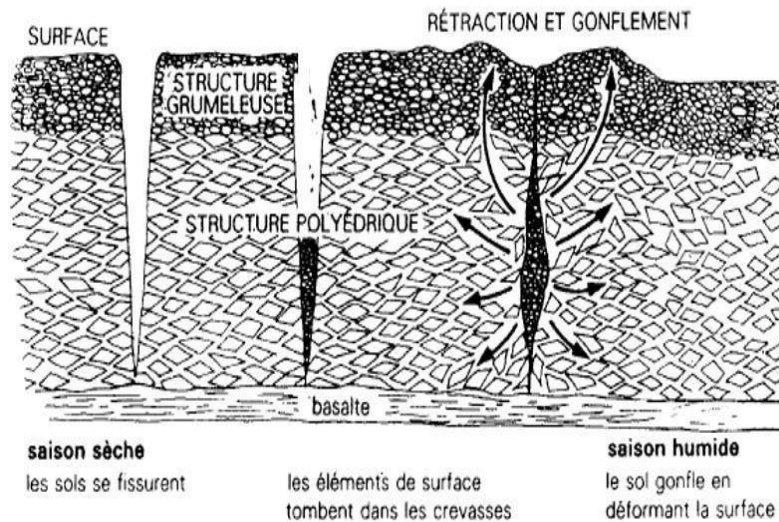


Figure I.10. Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol [14].

### I.7.3. Capacité d'échange cationique (C.E.C)

Les argiles ont la propriété de fixer de façon réversible (échangeable) des cations contenus dans les solutions environnantes. La capacité d'échange cationique (CEC) (Tableau I.3) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argile. Elle s'exprime généralement en milliéquivalents pour 100 grammes (mék/100g), 1 milliéquivalent = 96,5 Coulomb. Cette caractéristique est fonction du type d'argile, de ses caractéristiques cristallographiques, de ses cations et du pH du milieu. Cette propriété est importante dans le comportement rhéologique des argiles. L'échange de cations n'est possible que s'ils sont retenus par des liaisons faibles sur des surfaces externes ou internes (zone inter foliaires) des cristaux.

La capacité d'échange cationique externe dépend du nombre de sites de fixations des cations sur les surfaces externes. Aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour comprendre ces valences, des molécules d'eau s'introduisent et il y a apparition de groupes Silanol (Si - OH) ou aluminol (Al - OH) qui en fonction du PH peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés

avec d'autres cations. Le nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront directement liés au PH [16].

La capacité d'échange cationique interne dépend des charges permanentes [18], la substitution la plus fréquente est celle de  $Al^{3+}$  par  $Mg^{2+}$  dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile, la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles [16].

Le tableau I.3 regroupe, les valeurs de surface spécifique et de la capacité d'échange des différentes familles d'argile pour une solution neutre (PH=7).

Tableau I.3. Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles.

Argiles	C.E.C (meq/100gr)	Sst (m <sup>2</sup> /g)
Montmorillonite Na <sup>+</sup>	150	800
Montmorillonite Ca <sup>+</sup>	80	300
Illite	10-40	40-60
Kaolinite	3-15	5-20
Elément non argileux	-	1-3

#### I.7.4. Activité des argiles

Sempron a proposé la nomenclature suivante [18] :

- Argile inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75.
- Argile normale : qui a une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- Argile active : qui a une activité comprise entre 1,25 et 2.
- Argile très actives : qui a une activité supérieure à 2.

#### I.7.5. Propriétés colloïdales

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles. Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Le caractère colloïdal se traduit par le recouvrement de chaque grain d'argile par une double couche d'ions hydrosoluble de charges opposées [13].

### **I.7.6. Propriétés de gonflement**

Mise en suspension aqueuse, l'argile peut fixer une quantité notable d'eau (c'est plus particulièrement le cas de la montmorillonite). On a deux types de gonflement [19] : gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire.

### **I.7.7. Absorption et adsorption**

L'intérêt des argiles en thérapeutique est lié à leur pouvoir couvrant et à leurs propriétés de surface et réactivité qui leur confèrent des propriétés **d'adsorption**, chélation et capture des particules externes, ainsi qu'à leur capacité **d'absorption**, des propriétés spécifiques des silicates et des alumines qui les composent et à celles de leurs ions de compensation.

- **L'absorption** est la propriété que présentent les solides et les liquides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume (comme dans une éponge).
- **L'adsorption** est un phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur une surface solide selon divers processus plus ou moins intenses.

### **I.7.8. Rétention des métaux par les argiles**

L'étude du comportement des argiles dans le cadre de l'interaction argile-polluant est un sujet qui a suscité un grand intérêt depuis de nombreuses années. Des mécanismes distincts peuvent conduire à la rétention d'éléments par une surface solide. Ces mécanismes sont :

- la précipitation, engendrant l'apparition d'une nouvelle phase solide sur la surface du minéral ;
- l'absorption, correspondant à la migration d'espèces dissoutes vers l'intérieur des solides (espace inter foliaire) ;
- l'adsorption, correspondant à la fixation physique ou chimique des espèces ou d'éléments dissous (à la surface du solide) ;
- l'échange d'ion, correspond au remplacement d'un ion initialement présent en position échangeable (dans l'espace inter foliaire ou à la surface du solide), par un ion présent à l'état dissous [20].

### **I.7.9. La théorie d'échange d'ions**

Le phénomène d'échange d'ions peut être invoqué pour tout système constitué d'au moins deux phases non miscibles présentant les propriétés suivantes :

- la phase solide (constituant l'échangeur d'ions) imprégnée de liquide, développe à sa surface des charges positives ou négatives qui sont alors exactement compensées par des charges de signes opposés apportés par les ions de la solution ;
- l'ensemble (solide, ions compensateurs) constitue la phase échangeuse d'ions. La charge totale nette doit être nulle ;
- les charges portées par le solide sont localisées au niveau de groupements fonctionnels ionisés (par exemple la charge permanente résultant de substitutions isomorphiques au sein du cristal argileux). On ne considère que les zones de surface où sont concentrées les charges électrostatiques constituent des sites d'échanges d'ions [13].

### **I.7.10. Échanges d'eau**

La réactivité des argiles en milieu aqueux est aussi corrélée à la capacité d'échange d'eau.

Celle-ci est plus ou moins étroitement liée à la structure :

- eau libre entre les particules (macroporosité, capillarité, eau dite hygroscopique);
- eau captée entre les différents feuillets par les ions de compensation (nano porosité eau dite d'hydratation), et qui permet l'écartement de ces mêmes feuillets ou « gonflement » ;
- eau intégrée à la structure même des feuillets (hydroxyles, eau dite de constitution ou de cristallisation), qui ne sera libérée que lorsque ceux-ci seront détruits, par une trop forte cuisson par exemple.

Pour rappel, grâce à leurs propriétés d'absorption, les argiles sont capables de capter les liquides environnants. Dans les sols, les particules d'argile servent de banque d'eau, la captant lorsqu'elle est abondante, la reléguant lorsque le milieu s'assèche, s'équilibrant avec le milieu. Les argiles servent également de banque de minéraux pour les plantes, les livrant à celles-ci en fonction de leurs besoins [21].

### **I.8. Utilisations des argiles**

Le tableau montre l'importance de l'argile et leur application et utilisation dans différents secteurs [22].

Tableau I.4. Principales utilisations de l'argile

Secteurs d'utilisation	Exemple d'application
Industrie de forage	Liant et enrobage du forage Ingrédient minéral du forage
Industries pharmaceutique set cosmétiques.	Liant des pommades Adsorbant de matières pharmaceutiques
Industrie	Décoloration des effluents de l'industrie Textile
Industrie des colorants	Vernis et lutte thixotropie
Industrie chimique	Support des pesticides
Engrais	Additif d'engrais
Production végétale	Amélioration du rendement de sol

### I.9. Les principaux problèmes des sols argileux

Les sols argileux peuvent se modifier en fonction des variations d'eau du terrain. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraîne un tassement irrégulier du sol en surface : on parle de retrait. À l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement.

#### I.9.1. Le phénomène du retrait gonflement

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse. Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène [23].

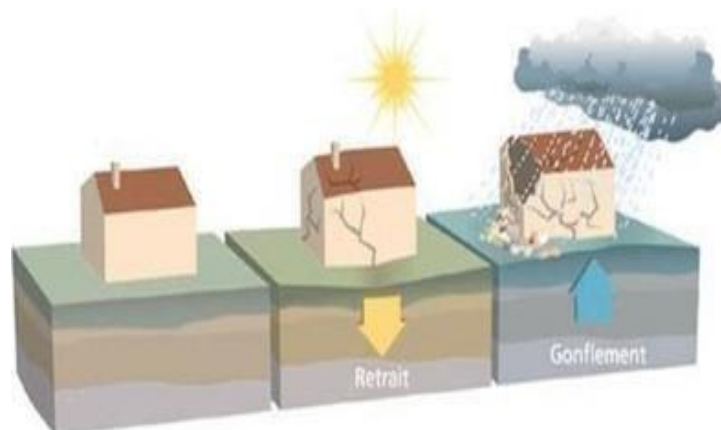


Figure I.11. Phénomène du retrait-gonflement des argiles [24].

Les mouvements de terrain induits par le retrait et le gonflement des argiles se traduisent principalement par des fissurations en façade des habitations, souvent obliques, et passantes par les points de faiblesse que constituent les ouvertures.

➤ **Cas des bâtiments**

Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construites 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.



Figure I.12. 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. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements. En saison de pluie, ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche.



Figure I.13. Déformation d'une chaussée.

Autre désordres provoqués par ce phénomène :

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



Figure I.14. Désordres dus au gonflement (Photo prise à Tizi-Ouzou).

**I.9.2. 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. Ce sont les mouvements qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil.



Figure I.15. Fissuration d'une route provoquée par un glissement de terrain(Azazga).



Figure I.16. Fissuration d'une maison lors d'un glissement de terrain (Azazga).

### 1.9.3. Phénomène de tassement

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place [25].

**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.

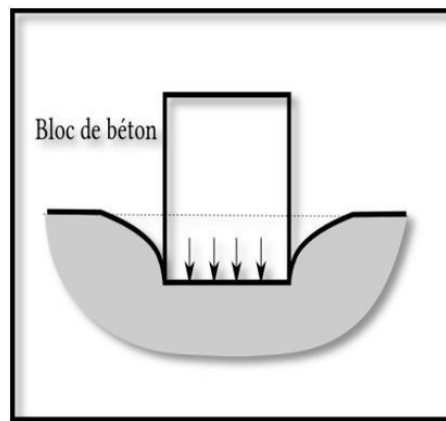


Figure I.17. Tassement uniforme

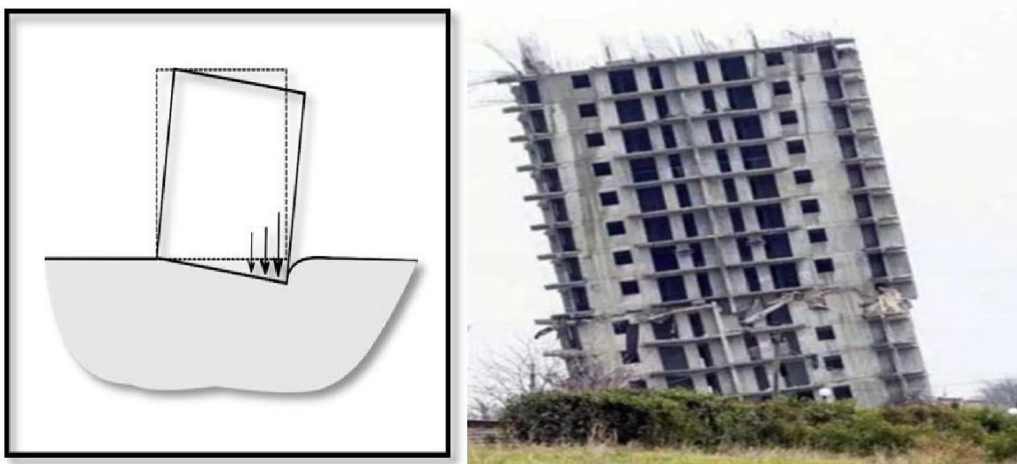


Figure I.18. Tassement différentiel

#### **I.9.4. Problème d'érosion**

Les sols constituant les ouvrages en terre peuvent être sujets à des phénomènes d'érosion pouvant affecter les remblais routiers de différentes manières. L'érosion des sols fins peut être décrite comme un phénomène causé par un écoulement d'eau qui arrache et transporte certaines particules du sol.

Les phénomènes d'érosion peuvent être externes ou internes. L'érosion interne intervient au sein de l'ouvrage tandis que l'érosion externe affecte la surface externe en contact avec l'eau. Cette partie concerne principalement la caractérisation de l'érosion interne des sols dans les ouvrages hydrauliques.

L'effet d'un écoulement d'eau, une redistribution des particules fines peut se produire dans le sol. Le squelette solide constitué de grains de grande taille reste stable, tandis que les particules fines migrent suivant le sens d'écoulement. La masse du sol solide ne change pas, mais la migration des particules fines provoque un changement de porosité induisant ainsi un changement de la perméabilité locale. Ce mécanisme d'initiation est la cause de rupture de la structure des remblais par érosion [26].



Figure I.19. Phénomène d'érosion dans les remblais routiers.

#### **I.9.5. Insuffisance de la portance**

La couche de sol compactée doit répondre à la fois à des objectifs de court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de l'infrastructure) et de long terme (lorsque l'ouvrage est en service). Selon les cas de chantier, on cherche à assurer, avec la couche de sol compactée, l'ensemble ou certaines des fonctions qui vont limiter les déformations au sein de la structure.

Cependant, la sensibilité à l'eau des sols fins et leur faible résistance au cisaillement implique une portance inadéquate pour une traficabilité normale des engins sur les couches compactées.

Ces sols fins présentent des limitations qui, ensemble, sont une lourde contrainte pour la construction des infrastructures routières [26].

### **I.10. Conclusion**

Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physiques et mécaniques sont très variables. Les sols fins et les argiles en particulier, présentent une faible capacité portante en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement et le tassement, ce qui ne convient pas pour certains ouvrages de génie civil qui exigent une haute portance et une stabilité à long terme.

Pour remédier à ces problèmes des solutions existent, telles que :

- le remplacement du sol par un matériau adéquat ;
- le changement du site de l'ouvrage ;
- l'amélioration de la qualité du sol par traitement chimique ou par renforcement.

Dans le chapitre suivant sont représentées les différentes techniques de traitement des argiles.

# **Chapitre II**

## **Techniques de stabilisation et traitement des sols argileux**

## **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 complexes et ceci est dû principalement à leur structure minéralogique.

Le traitement des sols permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux de voisinage du chantier.

Dans ce chapitre, sont représentées les différentes techniques de traitement et de stabilisation des sols argileux.

## **II.2. 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 :

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

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

## **II.3. Les techniques d'amélioration des sols**

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 [27]:

- les méthodes mécaniques ;
- les méthodes hydromécaniques ;
- les méthodes thermiques ;
- les méthodes chimiques.

### **II.3.1. Les méthodes mécaniques**

Nous citons deux méthodes de stabilisation mécanique :

- le compactage dynamique ;
- le vibro-compactage.

### **II.3.1.1. Le compactage dynamique**

Le compactage dynamique est l'une des techniques d'amélioration du sol. Cela dépend du réarrangement des particules du sol en utilisant l'énergie dynamique produite par la chute d'un poids (tamper) à partir d'une certaine hauteur.

Le concept de cette technique est d'améliorer les propriétés mécaniques du sol en transmettant des impacts à haute énergie sur les sols en vrac qui ont initialement une faible capacité de charge et des potentiels de compressibilité élevés. L'impact crée des ondes corporelles et de surface qui se propagent dans le milieu du sol [28].

La réaction des sols pendant le traitement de compactage dynamique varie en fonction du type de sol et de l'apport énergétique. Dans les sols non saturés, les vagues déplacent les grains du sol et les réarrangent dans une configuration plus dense, dans les sols saturés, le sol est liquéfié et les grains réarrangés dans un état plus compact. Dans les deux cas, la diminution des vides et l'augmentation du contact granulaire interne conduiront directement à l'amélioration des propriétés du sol [29].



Figure II.1. Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport de Nice 1978, France).

### **II.3.1.2. Le vibro-compactage**

Ce procédé de vibro compactage est appelé aussi la vibro-flottation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%.

La vibroflottation est une technique pour la densification in situ des couches épaisses de dépôts granulaires lâches de sol. Elle consiste à générer, à l'aide d'un vibreur de profondeur

(vibroflot), des vibrations horizontales dans les sols grenus afin de les cisailer et de provoquer une liquéfaction localisée et un tassement immédiat [30].

La méthode de vibroflottation emploie des vagues de compression pour rendre le sol compact, en réarrangeant le modèle de distribution de grains tout en appliquant des vibrations cycliques. En conséquence, le tassement du sol et la réduction de volume de pore sont obtenus [31].

Pendant le processus de vibroflottation, les vibrations présentes dans le sol, permettent aux particules de sol de se réarranger sous les forces de la gravité dans l'état le plus dense possible. Ceci augmente la densité relative du corps du sol traité, il en résulte une réduction globale de volume [32].

En conséquence, le tassement est dû aux vagues de cisaillement et la compression ondulée, qui sont transmis de l'axe de la sonde de compactage au sol environnant. La méthode de compactage de résonance emploie l'effet d'amplification de vibration pour augmenter l'efficacité de tassement [33].



Figure II.2. Le Vibro-compactage.

## **II.3.2. Les méthodes hydromécaniques**

### **II.3.2.1. Le préchargement ou précompression**

La précompression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

Le processus est défini comme l'application sur le terrain d'une charge égale à la charge définitive augmentée éventuellement d'une surcharge qui va produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire. Ceci peut rendre donc le sol traité constructible sans se redouter à moyen terme ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants.

Pratiquement, l'application de la surcharge sur le terrain à améliorer peut se faire par le biais de deux techniques à savoir l'édification sur le site d'un remblai ce qui va augmenter la contrainte totale appliquée à la surface de la couche compressible. A la fin du processus de consolidation et quand les pressions interstitielles excessives sont dissipées alors la charge apportée par le remblai sera supportée par le squelette du sol qui se déforme sur toute son épaisseur [34].

### **II.3.2.2. Amélioration des sols par drainage**

Si le but du drainage est le même que celui du rabattement, les moyens sont différents. Le drainage ne comporte généralement pas de pompage mécanique, car on utilise uniquement l'écoulement gravitaire. Son domaine d'application est surtout celui des terrains peu à très peu perméables.

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.

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 [34].

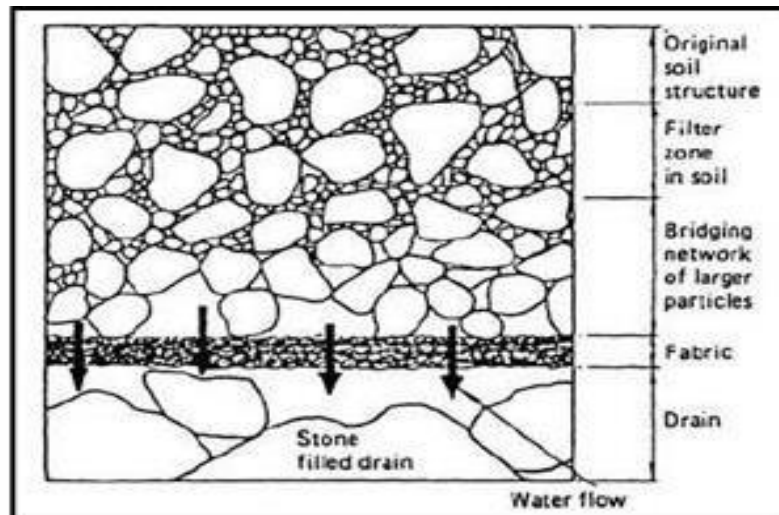


Figure II.3. Drain filtre [34].

### II.3.3. Les méthodes thermiques

#### II.3.3.1. La congélation

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 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).

**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.

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 (Figure II.4).

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 [35].



Figure II.4. Stabilisation provisoire des parois d'un fond par la technique de congélation.

### **II.3.3.2. La déshydratation**

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple.

En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

### **II.3.4. Les méthodes chimiques**

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 [35].

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 sont :

- le ciment ;
- la chaux ;
- les cendres volantes, laitier, pouzzolane naturelle et fumée de silice.....etc).

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

##### **II.3.4.1.1. Définition**

Le terme « chaux » désigne les produits issus de la calcination du calcaire. Ou autrement dit, il désigne toutes les formes physiques et chimiques dans lesquelles peuvent apparaître l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO et MgO) et/ou l'hydroxyde de calcium et/ou de magnésium  $\text{Ca(OH)}_2$  et  $\text{Mg(OH)}_2$  [36].

Le calcaire est extrait des carrières ou d'autres gisements (calcaire maritime), ces blocs sont concassés, puis criblés de façon à acquérir un calibre de pierres compatible avec le type de four utilisé. La cuisson du calcaire est appelée calcination, elle permet d'obtenir la chaux [37].

#### **II.3.4.1.2. Mécanismes de stabilisation à la chaux**

Les théories de stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base [38] :

**A. Absorption d'eau** : En présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur : environ 300kcal/kg de chaux vive.

**B. Echange cationique** : Lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations : les ions de calcium se substituent aux actions échangeables du complexe de la terre telle que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre.

**C. Flocculation et agglomération** : Du fait de l'échange de cations et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre flocculent et s'agglomèrent ; il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.

**D. Carbonatation** : La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

**E. Réaction pouzzolanique** : c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entre eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire

et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective.



Figure II.5. Chantier de traitement d'un sol à la chaux.

#### **II.3.4.2. Stabilisation par ajout 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.

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 [39].



Figure II.6. Malaxage de sol avec le ciment.



Figure II.7. Mise en œuvre de sol-ciment.

#### II.3.4.2. Stabilisation aux cendres volantes

Les cendres volantes de charbon sont extraites par séparation électrostatique ou précipitation mécanique de poussières de combustion issues des chaudières à charbon de centrales thermiques. Elles sont décrites comme une poudre fine dont les compositions sont minérales et organiques provenant du charbon. Deux types de cendres sont spécifiés dans la norme ASTM C618 [40]. Les cendres provenant de la combustion des charbons bitumineux qui sont caractérisées par une faible teneur en oxyde de calcium (CaO) et de fortes teneurs en silice et alumine. Elles ont pour origine principale les centrales thermiques avec chaudière à flamme (classe F), elles sont appelées aussi cendres volantes siliceuses. En revanche, La proportion de CaO doit être au minimum égale à 10% pour que la cendre soit considérée comme calcique. Elles sont issues des centrales thermiques avec chaudières dites à lit fluidisé (Classe C).

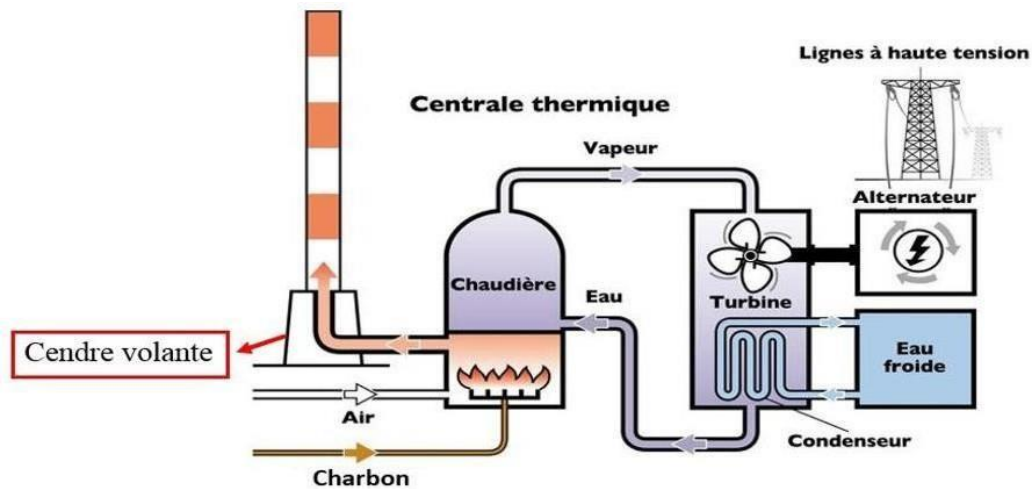


Figure II.8. Obtention des cendres volantes.

Il faut noter que la phase vitreuse des cendres volantes est très liée à leur réactivité. La vitrification des cendres volantes est due à leur refroidissement rapide au contact de l'air à la sortie des chaudières. Les cendres à haute teneur en calcium (Classe C) présentent quant à elles une composition chimique de la phase vitreuse assez différente de celle des cendres de classe F, ce qui expliquerait leur plus forte réactivité [41].



Figure II.9. Stock des cendres volantes.

Pour le traitement des sols, l'existence de ces réactions pouzzolaniques et hydrauliques appropriées aux cendres volantes induit ainsi une amélioration des résistances mécaniques à long terme. Cependant, le développement des résistances des sols traités par la cendre volante est influencé par plusieurs variables dont les principales sont : les propriétés de la cendre, sa composition chimique, la taille de ses particules et sa réactivité, mais aussi les conditions de

cure du sol. Les cendres volantes de classe C (faible teneur en calcium) ont été souvent activées par la chaux [42, 43].



Figure II.10. Application des cendres volantes sur une route.

#### II.3.4.3. La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de ferrosilicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C.

La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carbo-réduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO<sub>2</sub> amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le diamètre moyen se situe entre 0,1 et 0,2 µm, leur surface spécifique varie entre 13 000 et 30 000 m<sup>2</sup>/kg et leur densité se situe entre 2,00 et 2,25.

Grâce à sa très grande finesse, sa forte teneur en silice et sa structure essentiellement vitreuse, la fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique.

Tableau II.1. Composition minéralogique de la fumée de silice.

Composition minéralogique	Fumée de silice
CaO (%)	0.8-1.2
SiO <sub>2</sub> (%)	85-95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1-3

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.5-1
MgO (%)	1-2
TiO <sub>2</sub> (%)	-
SO <sub>3</sub> (%)	-
Na <sub>2</sub> O (%)	-
Perte au feu (%)	0.5-1

Les travaux de Kalkan et al [44], ont montré l'effet positif de la fumée de silice sur des argiles traitées. Cet effet se manifeste plus particulièrement par une augmentation de la résistance à la compression simple. Ceci est dû à la réaction chimique entre les argiles et les particules de fumée de silice. Ils ont également constaté qu'en ajoutant de la fumée de silice à l'argile, la densité sèche maximale du mélange diminue et la teneur en eau optimale du mélange augmente. L'accroissement de la teneur en eau optimale du mélange dépend de la teneur en fumée de silice ajoutée. D'autre part, selon Kalkan et Akbulut [44], l'augmentation de la surface spécifique du mélange entraîne l'accroissement de la teneur en eau optimale.



Figure II.11. La fumée de silice.

#### II.3.4.3. Stabilisation au bitume

Elle consiste à imperméabiliser les particules d'argile en les enveloppant d'un film imperméable. Dès qu'elles sont protégées, elles ne réagissent plus sous l'action de l'eau. Les briques ne sont plus sujettes à des variations indésirables de volume. « Le bitume utilisé pour la stabilisation est soit chauffé, soit mélangé à des solvants (bitumes fluidifiés), ou bien encore dispersé dans de l'eau (émulsion) ».

La stabilisation au bitume exige beaucoup d'eau. Cela limite alors son utilisation aux briques d'adobe et non aux briques de terre compressées puisque ces dernières nécessitent une faible quantité d'eau pour être produites. En général, le ciment et le bitume sont utilisés pour les

terres sableuses et la chaux pour les terres argileuses. Il vaut mieux chercher un bon résultat avec un minimum de stabilisant que le meilleur résultat qui nécessite une plus grande quantité de stabilisant [45].



Figure II.12. Stabilisation d'un sol au bitume.

### **II.3.5. Stabilisation des sols par ajout de déchets**

Ces dernières années les chercheurs passent à l'amélioration et la stabilisation des sols par les déchets tels que : les déchets de chaux, de brique, des sédiments de barrage, déchets de verre, de poudre de marbre, etc.

#### **II.3.5.1. La poudre de marbre**

Le marbre est défini comme la roche métamorphique qui s'est entièrement recristallisée et durcie dans des conditions hydrothermales. Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite.

L'amélioration du sol par la poussière de marbre est la solution alternative. Le sol stabilisé par la poussière de marbre peut être utilisé dans la construction de revêtements de canaux, de structures de chaussée et de fondations [46].



Figure II.13. Poudre de marbre.

### **II.3.5.2. La poudre de verre**

La poudre de verre est du verre finement broyé. Le type de verre broyé a un impact important sur les propriétés de la poudre de verre. Le verre le plus courant est le verre sodo-calcique, qui est principalement composé de dioxyde de silicium, d'oxydes de sodium, d'oxyde de calcium et d'alumine.

Plusieurs chercheurs ont utilisé les déchets de poudre de verre comme précurseur de géopolymères dans l'amélioration des sols, surtout au cours des dernières années. Des chercheurs ont choisi des pourcentages de 6 %, 12 %, 18 %, 27 % et 36 % en poids pour stabiliser une argile à haute plasticité. Les auteurs ont remarqué un gonflement et une augmentation du poids unitaire sec maximal et une diminution de la teneur optimale en humidité de l'argile à des teneurs en poudre de verre plus élevées [47].



Figure II.14. Poudre de verre.

**II.3.5.3. La poussière des fours à ciment**

C'est le co-produit de la fabrication du ciment et le responsable de 10% de la pollution en Algérie [48]. La poussière de ciment est collectée du gaz d'échappement des fours, elle contient du clinker des grains crus partiellement calcinés et de la cendre combustible [49]. Elle possède les mêmes caractéristiques d'un liant hydraulique, comme elle peut jouer le rôle d'un activant si en l'associe à un autre produit latent. La valorisation de cette poussière a été le sujet de plusieurs travaux.

La stabilisation d'un sable argileux par l'ajout des quantités de poussière qui arrivent jusqu'à 20%. Ces ajouts ont été les responsables de l'augmentation de la résistance à la compression et la traction indirecte et aussi l'amélioration de l'indice CBR [50].

**II.3.5.4. Le carbure de calcium**

Il se présente sous la forme de cailloux gris, il résulte d'une opération de synthèse industrielle à partir de la chaux et du charbon pour la fabrication de l'acétylène. La fabrication du carbure de calcium nécessite deux éléments : la chaux vive et le carbone.

La valorisation des carbures de calcium est apparue dans des travaux de [51] dont on a utilisé ce matériau pour activer les laitiers de haut fourneau pour un traitement d'une argile par le procédé dry jet mixing. Dans d'autres, [52] une argile a été traitée par un mélange de cendre volante activée par le carbure de calcium, la résistance à la compression et les caractéristiques de compactage après traitement ont connu une amélioration importante.

**II.3.5.5. Le phosphogypse**

C'est un sous-produit issu de la fabrication de l'acide phosphorique lors des traitements des phosphates naturels par l'acide sulfurique, il est considéré toxique et très polluant.

Des études ont été menées pour utiliser ce déchet local dans l'élaboration d'un liant hydraulique. Pour cela le phosphogypse était un activant sulfurique pour les laitiers de haut fourneau. Les résultats ont montré que ce matériau procède une activité hydraulique intéressante [53].

**II.3.5.5. La coquille d'œuf calcinée**

La coquille d'œuf est un biominéral naturel composé d'un réseau de fibres protéiques associé à des cristaux de carbonate de calcium (96% du poids de la coquille) de carbonate de magnésium (1%) et de phosphate de calcium (1%), ainsi que des substances organiques et

l'eau. Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme de calcite (cristal hexagonal) [54].

Les coquilles d'œufs ont largement été utilisées comme catalyseur efficace dans la conversion de l'huile de soja et alcool méthylique dans la production de biodiesel. En analysant différentes conditions de processus, le CaO était la phase active de la coquille d'œuf dérivée. L'utilisation de la coquille comme source alternative de  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium) peut réduire l'impact sur les réserves naturelles de calcaire, une source naturelle non renouvelable [55].

Une étude comparative entre l'effet de chaux et la poudre d'œuf sur le gonflement d'une argile, la quantité de chaux était remplacée partiellement par la poudre d'œuf, a montré que la chaux reste la plus efficace mais la poudre a réussi à réduire le gonflement et augmenter la résistance au cisaillement [56].



Figure II.15. La coquille d'œuf calcinée.

#### **II.4. Techniques de stabilisation de sols sur terrain**

La réalisation des traitements de sols, requiert, suivant les cas de chantier un certain nombre d'opérations élémentaires exigeant une organisation précise, un savoir-faire et des matériels spécifiques.

Les travaux de traitement d'un sol en place suivent en générale les opérations élémentaires suivantes :

- la préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocailleux, homogénéisation, humidification éventuelle) ;
- l'épandage du liant de traitement ;
- Le malaxage du liant avec le sol ;

- le compactage ;
- le réglage.

#### **II.4.1. Préparation du sol**

Certains sols exigent une préparation avant de pouvoir être traités. Cette préparation du sol peut conditionner la réussite du chantier, tant sur le plan économique que technique. Elle permet de faciliter le travail du malaxeur et de modifier l'état hydrique du sol. On distingue essentiellement les opérations de scarification, qui permet d'éliminer les gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, ameublir et aérer le sol [57].



Figure II.16. Scarification des sols.

#### **II.4.2. Epannage**

Pour qu'elle soit réussie, cette opération du liant doit se faire par des épandeurs précis. Les épandeurs à dosage volumétrique asservi à la vitesse d'avancement sont les engins les plus répandus. Le dosage est rendu dépendant de la vitesse d'avancement par un asservissement de la vis de répartition à la rotation d'un essieu.



Figure II.17. Epannage de liant.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour contrôler l'épannage : la première consiste aux pesées périodiques de l'agent de traitement recueilli dans des baches de surface connue disposées sur le sol avant passage de l'épanneur. La quantité recueillie s'obtient par différence de poids de la bache avec ou sans agent de traitement. La bache peut sur certains sols se déformer et ne pas présenter la même surface, c'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des plateaux en aluminium, plus lourds et moins déformables.

La deuxième consiste à contrôler le poids total de l'agent de traitement répandu divisé par la surface couverte. Il s'agit d'une méthode globale s'appuyant sur un contrôle pondéral associé à une mesure de surface [57].



Figure II.18. Contrôle de l'épannage : pesée de l'agent de traitement épanné sur un plateau en aluminium.

### II.4.3. Malaxage

Le malaxage consiste à mélanger l'agent de traitement et le sol afin d'incorporer l'agent de traitement de façon homogène. D'une manière générale, plus les sols sont argileux, plus ils sont difficiles à malaxer (nombre de passes plus élevé, malaxage plus intensif). Toutefois, certains sols très argileux ont pu être malaxés avec succès. Dans ce cas, plusieurs passes de malaxage s'avèrent souvent nécessaires.

Lorsque l'on épand un agent de traitement pulvérulent, il est recommandé de faire suivre l'épandeur le plus près possible par l'engin malaxeur qui incorpore l'agent de traitement à la couche de sol traitée. Cette mesure permet d'éviter la dispersion de l'additif par le vent et assure une utilisation optimale de celui-ci. Le choix de l'engin de malaxage dépend de la nature du sol, de la taille et du type de chantier.

Il est important de respecter un bon équilibre entre la capacité de malaxage et la capacité disponible de compactage (y compris en ce qui concerne l'épaisseur des couches). La profondeur de malaxage varie de 20 cm à 40 cm avec une bonne moyenne de 30 cm. Elle dépend du type d'engin malaxeur et de la consistance du sol [57].



Figure II.19. Malaxage du liant avec le sol.

#### **II.4.4. Compactage**

Le compactage des matériaux traités suit leur réglage par des engins à lame (bulldozer, niveleuse) en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs et le domaine d'application. Les compacteurs utilisés sont à pneus, vibrants ou à pieds dameurs. Le compactage des sols traités, notamment dans les fonds de coffre et fondations/sous-fondations, doit être particulièrement soigné. Cela implique la mise en œuvre d'une énergie de compactage élevée. Le compactage peut être contrôlé par une mesure de densité

(densitomètres ou gammadensimètres). La portance de la couche compactée est contrôlée par l'essai à la plaque ou la sonde de battage. L'utilisation de rouleaux vibrants peut provoquer un feuillement superficiel sur des sols fins traités. Ce phénomène peut créer une discontinuité verticale. On atténue le phénomène en limitant les interventions des cylindres vibrants à ces niveaux et surtout en veillant au maintien de l'humidité du sol lors du compactage. Des mesures complémentaires doivent être prises lors du réglage [57].



Figure II.20. Compacteur.

#### **II.4.5. Réglage**

Le réglage définitif des couches stabilisées (sous-fondations, fondations de voiries à faible trafic, couches support de fondation pour plates-formes industrielles) se fait par rabotage sur toute la surface à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Le rabotage permet en outre de réduire l'évacuation de la partie superficielle feuilletée éventuellement produite lors du compactage au cylindre vibrant. Cette opération doit suivre immédiatement le compactage sous peine d'être très vite difficile à réaliser à cause de la rigidification rapide du matériau traité. Elle se fait le plus souvent à la niveleuse, éventuellement guidée (fil ou laser) ou bien, sur les chantiers importants, à la raboteuse guidée. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués (par scraper élévateur par exemple sur les gros chantiers) [57].



Figure II.21. Réglage d'une couche compactée avec niveleuse.

#### **II.4.6. Planche d'essai**

Pour les grands chantiers ou s'il y a des doutes quant au comportement des matériaux ou que le matériel de malaxage est mal connu, il est recommandé de réaliser une planche d'essai sur chantier avant le démarrage des travaux, et ce pour chaque changement de type de sol. Les planches d'essai permettent de vérifier en vraie grandeur la faisabilité du traitement et de vérifier les conclusions des analyses de laboratoire ; elles permettent de :

- vérifier in situ le bon fonctionnement et l'efficacité des machines (épandeurs, malaxeurs, compacteurs);
- définir les modalités de mise en œuvre (vitesse, profondeur optimale des outils, nombre de passes, etc.);
- ajuster éventuellement les dosages déterminés par les études de laboratoire en fonction des conditions de chantier;
- mettre en évidence les éventuels imprévus que l'on peut rencontrer sur chantier.

La longueur de travail est généralement de l'ordre de 50 m et la largeur couvre au moins trois passes de l'engin d'épandage. A partir des mesures réalisées sur planche d'essai, on détermine de nouveaux graphiques donnant les dosages effectifs à utiliser en fonction de la teneur en eau naturelle du sol et des conditions climatiques [57].



Figure II.22. Planche d'essai.

## **II.5. Avantages du traitement des sols**

Le traitement des sols en place est une technique qui présente trois types d'avantages : techniques, économiques et écologiques / environnementaux.

### **II.5.1. Avantages techniques**

Le traitement des sols en place, permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, stable et durable, qui possède des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. De plus, grâce à la rigidité du nouveau matériau, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support. Généralement, elle assure un bon comportement par temps chaud. On ne constate ni déformation, ni orniérage, et la structure se comporte bien, vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à sa rigidité et à l'effet de dalle induit. Enfin, cette procédure de traitement, est une technique dont la facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation, reste des plus faciles.

### **II.5.2. Avantages économiques**

La réutilisation des matériaux en place, est un facteur d'économie important, puisqu'il réduit au minimum les déblais, issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût des différents transports.

### **II.5.3. Avantages écologiques et environnementaux**

Le traitement permet une importante économie d'énergie globale, par la diminution des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des désagréments à l'usager et aux riverains ainsi qu'une faible détérioration du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui permet de préserver l'environnement.

**II.6. 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 du revient sont les moins élevés, afin d'assurer la continuité entre les recherches faites aux laboratoires et leurs réalisations in situ.

# **Chapitre III**

## **Essais d'identification**

### III.1. Introduction

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive, du sol. Une définition chiffrée est nécessaire car des sols d'aspects très voisins peuvent présenter des comportements (mécaniques, en particulier) très différents.

Ce chapitre est consacré à l'identification des matériaux étudiés et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Tous les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de mécanique des sols, du département de génie civil pour un sol, prélevé d'une zone située dans la wilaya de Tizi-Ouzou.

### III.2. Matériaux utilisés

#### III.2.1. Sol utilisé

Le sol utilisé dans ce travail a été prélevé au niveau de la commune de Ouaguenoun à l'endroit d'implantation des différents blocs (logement et foyer) de la résidence universitaire (4000 /10500) lits à Tamda, wilaya de Tizi-Ouzou.



Figure III.1. Localisation de la zone d'extraction du sol utilisé

#### III.2.1.1. Prélèvement des échantillons

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 2m par le biais d'une pelle mécanique. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transportés au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques, d'identification et mécaniques.



Figure III.2. Extraction du sol à l'aide d'une pelle mécanique.

### III.2.1.2. La teneur en eau [NF P94-050]

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage).

#### A- Objectif

L'essai consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C (50°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques).

#### B- Appareillage

Pour effectuer l'essai de la teneur on eau à l'état naturel, l'appareillage nécessaire est :

- Une étuve (50°C, 105°C)
- Des tares
- Une balance



Figure III.3. Appareillage pour déterminer la teneur en eau.

#### C- Mode opératoire

L'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec).

La teneur en eau est calculée comme suit :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad \text{Ou :} \quad W = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

avec :

W : la teneur en eau

M<sub>w</sub> : la masse de l'eau

M<sub>s</sub> : la masse sèche

M<sub>h</sub> : la masse humide

M<sub>s</sub> : la masse sèche

Les différents résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Résultats de la teneur en eau.

Echantillon	1	2	3	4	5
M <sub>h</sub> (g)	42.1	42.9	39.7	52.7	62.2
M <sub>s</sub> (g)	33.8	34.6	32	42.4	50.1
W (%)	24.55	23.98	24.06	24.29	24.15
Moyenne	24.20 %				

Le sol étudié présente une teneur en eau de : W=24.20%.

**III.2.1.3. Analyse granulométrique [NF P 94-056]**

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 80µm, 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 80µm.



Figure III.4. Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.



Figure III.5. Analyse granulométrique par sédimentation

Les résultats sont représentés graphiquement sous forme d'une courbe appelée : courbe granulométrique, qui est un élément essentiel de la description géotechnique des sols.

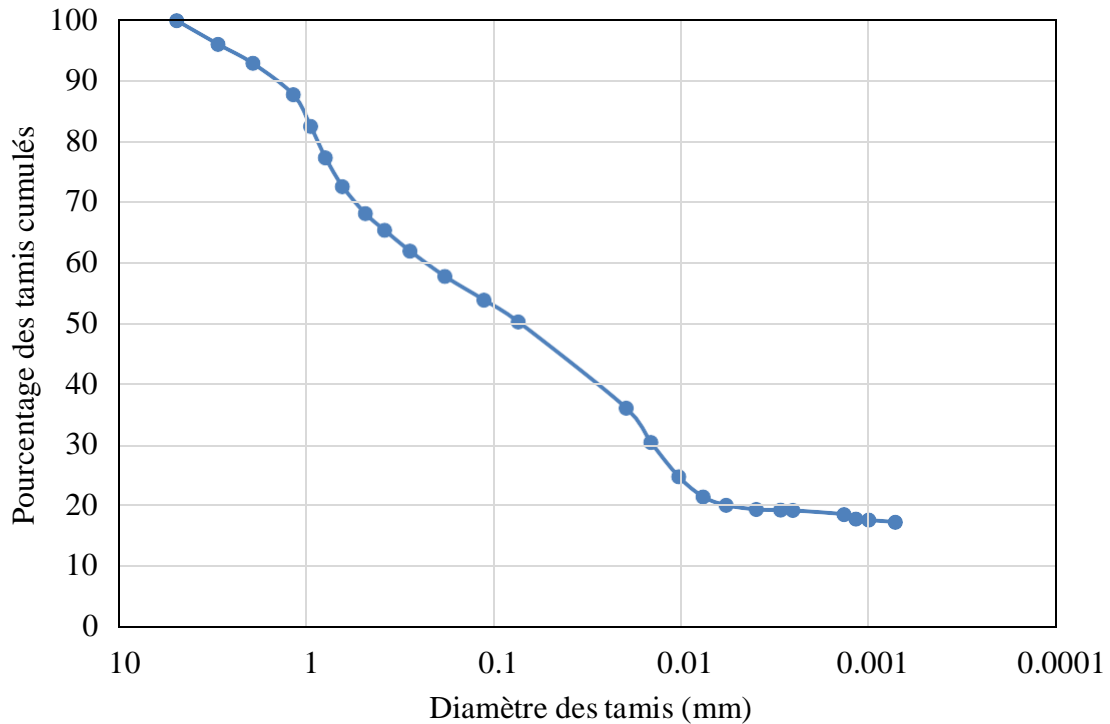


Figure III.6. Courbe granulométrique de l'argile étudiée.

Selon la classification des sols, le tamisât à 0.08 mm est supérieur à 50%, donc c'est un sol fin.

#### III.2.1.4. Détermination de la masse volumique des particules solides [NF P 94- 054]

Selon la norme NF P 94-054, La masse volumique des particules solides est déterminée à l'aide d'un pycnomètre. Elle s'applique sur des échantillons d'éléments de dimension inférieure à 2 mm.

##### A- Objectif et but de l'essai

L'essai permet la détermination de la masse volumique moyenne des particules et éléments solides constituant un échantillon. Cette dernière sert par la suite à déduire d'autres caractéristiques du sol telles que l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

##### B- Le matériel utilisé

Le matériel utilisé, est :

- Un pycnomètre
- Eau distillée
- Une plaque chauffante
- Une balance électronique



Figure III.7. Le matériel nécessaire pour la détermination de la masse volumique des particules solides du sol.

### **C. Exécution de l'essai**

Tamiser une partie du sol à étudier au tamis de 2 mm. Prendre un échantillon d'environ 50g du tamisât précédent et le mettre dans une coupelle de masse connue ( $M$ ). L'ensemble est introduit dans une étuve dont la température est réglée à 50°C ou 105°C selon que le sol est sensible ou insensible à la chaleur respectivement. En cas de doute, le sol est traité comme sensible à la chaleur, le séchage peut durer 1 à 8 jours jusqu'à ce que la masse de l'échantillon devienne constante pour deux pesées séparées de 4 à 5 heures de séchage. Les accumulations de particules (particules collées les unes aux autres) sont ensuite séparées au pilon dans le mortier.

Le pycnomètre et son bouchon secs et propres sont pesés ( $M_1$ ) et ensuite l'échantillon est soigneusement introduit dans le pycnomètre. L'ensemble est ensuite pesé ( $M_2$ ). Le pycnomètre est ensuite rempli d'eau distillée et sera placé sur une plaque chauffante pendant une heure.

Une fois tout est désaéré, placé le bouchon avec son tube repère sur le ballon du pycnomètre, compléter le remplissage avec de l'eau distillé jusqu'au repère, au bout de 30 min, le pycnomètre est séché superficiellement et pesé ( $M_3$ ).

Vider et nettoyer le pycnomètre et le remplir avec de l'eau distillé jusqu'au repère du bouchon, au bout de 30 min, le niveau est à nouveau mis en coïncidence avec le repère, essuyer l'ensemble, et le peser ( $M_4$ ).

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

$$\rho_s = \frac{\rho_w (M_2 - M_4)}{M_4 + M_2 - M_1 - M_3} \quad (\text{III.1})$$

avec :

$M_1$  : la masse du pycnomètre vide

$M_2$  : la masse du pycnomètre + échantillon

$M_3$  : la masse du pycnomètre + eau distillé + échantillon

$M_4$  : la masse du pycnomètre + eau distillé

$\rho_w$  : la masse volumique de l'eau = 1000 Kg/m<sup>3</sup>.

Tableau III.2. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique des particules.

$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
206.9	256.6	785.6	764	1	1.779

La masse volumique des particules solides est : 1.779 g/cm<sup>3</sup>.

### III.2.1.5. Les limites 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.

Pour préparer le matériau il faut laisser un échantillon du sol dans un bac rempli d'eau pendant 24 heures, cet essai est réalisé sur la partie de sol passant au tamis de 400 $\mu$ m.

Laisser le mélange eau + sol reposer durant 24heures, à l'aide d'une seringue, l'eau filtrée sera aspirée et sera mis à l'étuve pendant quelques heures. Enfin cette pate sera utilisée pour déterminer la limite de liquidité ( $W_l$ ) et la limite de plasticité ( $W_p$ ).

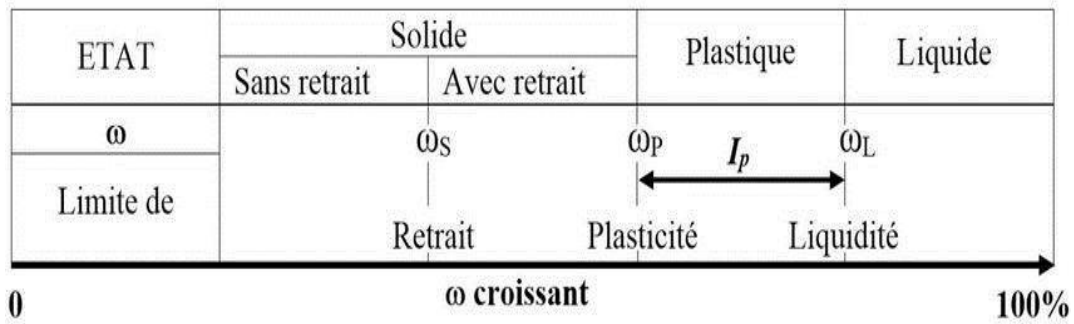


Figure III.8. Limite d'Atterberg d'un sol.

### A- La limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture de 1cm de la rainure après un nombre de chocs (entre 15 et 35).

#### A.1. Le matériel nécessaire

Le matériel nécessaire pour l'essai, est le suivant :

- l'appareil de Casagrande ;
- spatule ;
- balance de précision ;
- outil à rainure ;
- une étuve.



Figure III.9. Matériel de limite de liquidité.

#### A.2. Le principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à faire tomber une coupelle d'une hauteur de 10mm sur un socle. Chaque choc entraînant la fermeture progressive d'une rainure pratiquée dans l'échantillon de sol.

### A.3. Le mode opératoire

La limite de liquidité se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est constitué d'une coupelle dans laquelle l'échantillon sera placé. Une pâte d'environ 70g sera étalée dans la coupelle, puis avec l'outil à rainure un sillon sera creusé au milieu de la coupelle.

La coupelle sera soumise à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1 cm. L'essai sera arrêté à ce moment et un échantillon sera pris et en suite sera étuvé durant 24 heures.



Figure III.10. Détermination de la limite de liquidité ( $W_L$ )

Les résultats de limites de liquidité sont représentés dans le tableau III.3:

Tableau III.3. Résultats de limite de liquidité.

Essai	Nombre de chocs	Masse humide ( $M_h$ ) (g)	Masse sèche ( $M_s$ ) (g)	La masse de l'eau ( $M_w$ ) (g)	Teneur en eau $W = (M_w/M_s) * 100$ (%)
1	16	8.2	5	3.2	64
2	23	9.9	6.3	3.6	57.14
3	27	8.2	5.3	2.9	54.71
4	33	8.3	5.5	2.8	50.90

D'après ses résultats on trace une courbe des teneurs en eau fonction du nombre de chocs.

La limite de liquidité ( $W_L$ ) est déterminée graphiquement par la projection du point correspondant à  $N=25$  sur la droite tracée, le point d'intersection est ensuite projeté sur l'axe des teneurs en eau.

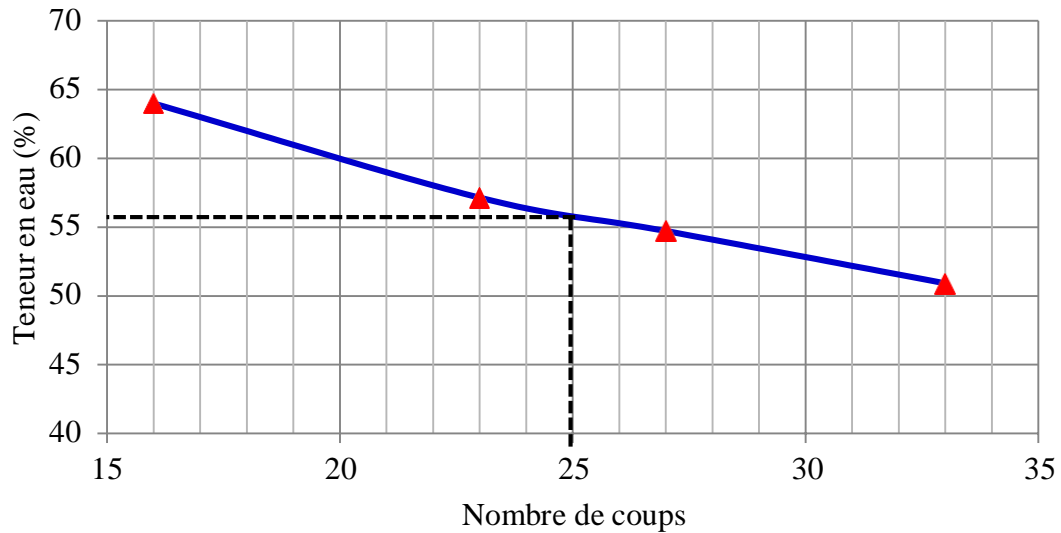


Figure III.11. Limite de liquidité du sol.

Du graph on lit :  $W_L=55.2\%$ .

## B- La limite de plasticité

La limite de plasticité est définie par application de la norme NF 94-051. Le matériau est roulé sous la forme d'un petit rouleau plein (ou boudin) d'environ 3 mm de diamètre. Ce boudin est progressivement asséché en frottant le matériau entre la plaque de marbre et un patin poreux. Lorsque le rouleau n'est plus plastique, il devient alors cassant. L'essai est arrêté car la teneur en eau à ce moment correspond à la limite de plasticité.

### B.1. Le matériel nécessaire

Le matériel nécessaire pour l'essai est :

- une plaque en marbre ;
- une cale ;
- une étuve ;
- des tares.

### B.2. Le mode opératoire

On prélève une portion d'échantillon préparée auparavant afin de former une boule. Cette boule est roulée à la main sur une plaque lisse, pour obtenir un rouleau 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. La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément le rouleau se casse et que son diamètre est de  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ .

Une fois les fissures apparues, le central du rouleau est prélevé et placé dans une boîte et peser immédiatement et ensuite il sera introduit dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau. Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

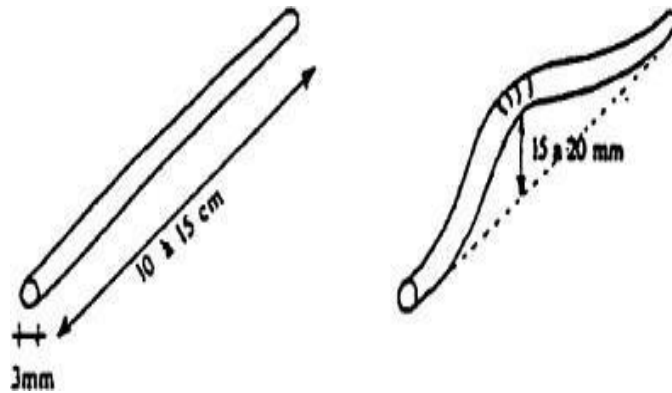


Figure III.12. Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.



Figure III.13. Les étapes de l'essai de limite de plasticité.

Les résultats de limites de plasticité sont représentés dans le tableau III.4:

Tableau III.4. Résultats de la limite de plasticité.

Essai	La masse humide (Mh) (g)	La masse sèche (Ms) (g)	La masse de l'eau (g)	La teneur en eau W (%)
1	3.8	3.3	0.5	15.151
La teneur en eau moyenne (%)	15.15			

La limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité ont été déterminées, donc l'indice de plasticité est calculé comme suit :

$$I_p = W_L - W_p$$

donc :

$$I_p = 55.2 - 15.15 = 40.05 \%$$

$$I_p = 40.05 \%$$

La plasticité d'un sol est appréciée par le couple ( $W_L$ ,  $I_p$ ) qui dépendent de la nature et de la quantité des minéraux argileux contenus dans le sol. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit " Abaque de plasticité " qui permet de classer les sols fins.

La classification du sol est obtenue, par la position d'un point de coordonnées ( $W_L$ ,  $I_p$ ) sur le diagramme de plasticité de Casagrande.

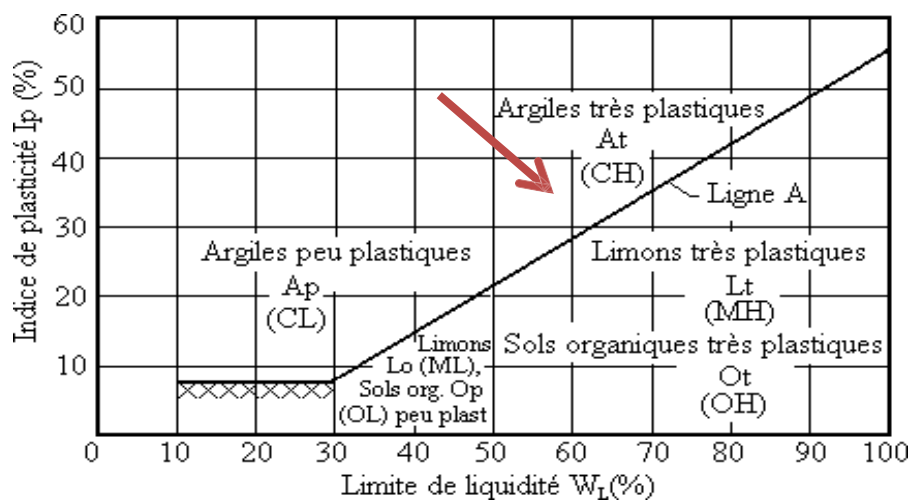


Figure III.14. Abaque de plasticité de Casagrande.

D'après l'abaque de Casagrande, le sol est classé comme : une argile très plastique ( $A_t$ ).

### B.3. Le type du sol

On détermine le type de sol étudié en utilisant le tableau III.5 :

Tableau III.5. Types des sols en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$ .

Indice de plasticité ( $I_p$ ) %	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

D'après les résultats obtenus, la valeur de l'indice de plasticité est égale à 40.05 %, donc le sol est : très plastique.

**B.4. La nature du sol**

La nature du sol est déterminée en utilisant le tableau III.6:

Tableau III.6. Nature du sol en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$ .

	L'indice de plasticité
Argile	$I_p > 30$
Argile limoneuse	$20 < I_p < 30$
Limon	$10 < I_p < 20$
Sable argileux	$5 < I_p < 20$
Sable limoneux	$5 < I_p < 15$

On déduit que notre sol est : une argile.

**B.5. L'indice de consistance**

L'indice de consistance permet d'évaluer l'état hydrique des sols fins. L'indice de consistance est déterminé avec la loi suivante :

$$I_c = (W_L - W) / I_p$$

Donc :  $I_c = (55.2 - 24.20) / 40.05 = 0.774$

Tableau III.7. Etat du sol en fonction de l'indice de consistance.

L'indice de consistance $I_c$	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	liquide

En utilisant le tableau III.7, on déduit que l'état du sol est classé comme : plastique.

**III.2.1.6. Essai au bleu de Méthylène (VBS) [NF P 94-068]**

Il est aussi appelé essai à la tâche, C'est un essai simple et rapide. 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.

**A- Le but de l'essai**

Les minéraux argileux présents dans les sols sont principalement issus de l'altération physicochimique des roches. La structure cristalline feuilletée des argiles leur confère un

ensemble de propriétés de comportement lié à leur affinité pour l'eau (appelée activité), ce qui entraîne les phénomènes de gonflements, de plasticité et de cohésion constatés sur ces sols.

### **B- Le principe de l'essai**

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux. Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile, des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol où VBS ; qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés pour les travaux de terrassements et les sols destinés aux assises des chaussées ...

### **C- Le matériel nécessaire**

Le matériel nécessaire, est :

- une balance de précision ;
- un chronomètre ;
- bécher en plastique ou en verre ;
- un agitateur mécanique à ailettes ayant une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400 tr/min à 700 tr/min ;
- un récipient cylindrique (en verre, plastique, métal inoxydable) d'une capacité minimale de 3000 cm<sup>3</sup> et de diamètre intérieur (155 ± 10) mm ;
- burette de 50 ml, ou une burette automatique ;
- papier filtre blanc ;
- baguette de verre de 8 mm de diamètre et 300 mm environ de longueur ;
- solution de bleu de méthylène qualité médicinale à 10 g/l plus ou moins 0.01 g/l (durée d'utilisation : 1 mois maximum) ;
- eau distillé.

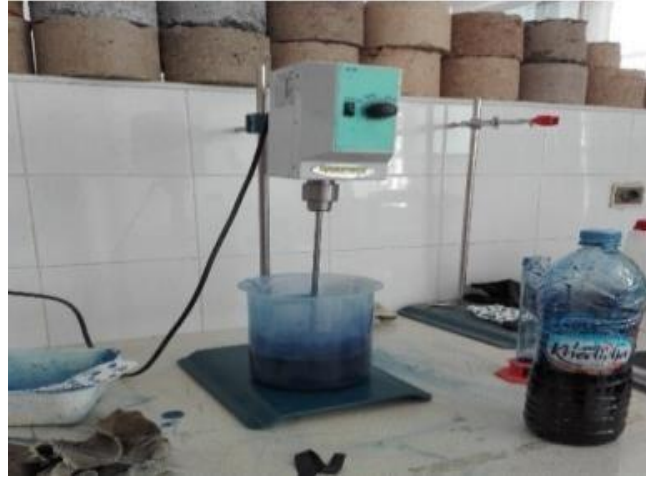


Figure III.15. Appareillage pour essai bleu de méthylène.

#### **D- Conduite de l'essai**

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau. En effet, ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2  $\mu\text{m}$ ) 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.

L'échantillon est mis à tremper dans 500 ml d'eau déminéralisée et dispersé avec un agitateur à ailettes tournant à  $700 \pm 100$  tr/min pendant au moins cinq minutes, et jusqu'à disparition de tout agglomérat de matériaux. Le tout est maintenu en agitation permanente, pendant toute la durée de l'essai, à une vitesse de  $400 \pm 100$  tr/min.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. On prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre maintenu horizontalement en l'air (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm).

Si la tâche centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer ;

Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5  $\text{cm}^3$  jusqu'à ce que le test soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à intervalle d'une minute pour le confirmer.

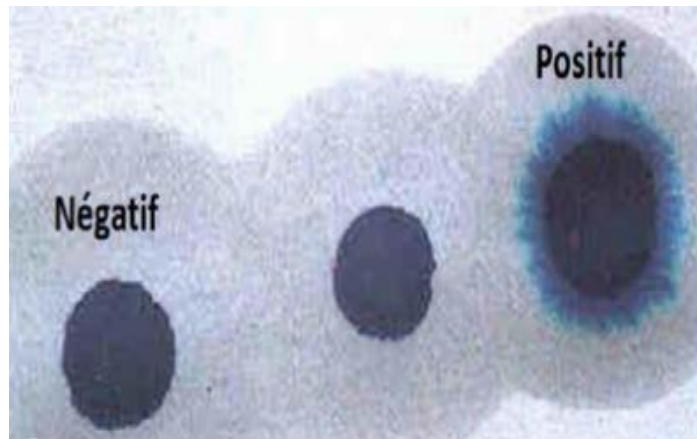


Figure III.16. Observations de taches de l'essai VBS.

La valeur du VBS est calculée avec la formule suivante :

$$VBS = \frac{M_B \times V_B}{M} \times 100$$

avec :

$M_B$ : la masse du bleu de méthylène introduite dans le bécher

$V_B$  : le volume du bleu de méthylène

$M$  : la masse de l'échantillon

D'après les résultats obtenus, la valeur au bleu de méthylène est : 7.8

La classification est selon le tableau III.8, suivant :

Tableau III.8. Classement de la valeur du VBS.

La valeur du VBS	Commentaire
VBS < 0.1	Sol insensible ou peu sensible à l'eau
0.1 < VBS < 0.2	Apparition de la sensibilité à l'eau
0.2 < VBS < 1.5	Sol sablo-argileux
1.5 < VBS < 2.5	Sol sablo-limoneux (moyennement plastique)
2.5 < VBS < 6	Sol limoneux
6 < VBS < 8	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

En classant la valeur du VBS, on conclut que c'est : un sol argileux.

### III.2.2. Fumée de silice utilisée

La fumée de silice, ou microsilice, est un sous-produit ultra-fin de la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Elle se forme lorsque du quartz pur est réduit dans des fours

électriques à environ 2000 °C, créant du dioxyde de silicium gazeux qui se condense en particules amorphes nanométriques. Ces particules, collectées par des systèmes de filtration, sont extrêmement fines et sphériques, avec une surface spécifique de 15 à 30 m<sup>2</sup>/g. Principalement composée de dioxyde de silicium amorphe, la fumée de silice est connue pour ses propriétés pouzzolaniques.



Figure III.17. Fumée de silice utilisée.

Tableau III.9. Analyse chimique de la fumée de silice.

Composition chimique	Contenu
SiO <sub>2</sub>	95 % (≥ 92 %)
Na <sub>2</sub> O	0,60 % (≤ 1,0 %)
SiC	1,50 % (≥ 3,0 %)
SO <sub>3</sub>	0,10 % (≤ 0,20 %)
Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1,00 % (≤ 1,50 %)
Cl <sup>-</sup>	0,06 % (≤ 0,20 %)

### III.2.3. Ciment utilisé

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland de type CEM II /A-L 42.5 R fabriqué par la société de production et commercialisation des ciments située à 18 Km au Nord-est du chef-lieu de la wilaya de BISKRA.



Figure III.18. Ciment utilisé.

### III.2.4. Chaux utilisée

Dans cette étude, nous avons utilisé de la chaux vive (CaO) produite par la société BMSD, située à Hassasna dans la wilaya de Saïda.



Figure III.19. Chaux utilisée.

### III.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de caractériser exhaustivement le sol argileux à travers une série d'essais d'identification et mécaniques. Les données obtenues ont éclairé sur les propriétés initiales du sol et ont été essentielles pour évaluer l'efficacité des agents de stabilisation (ciment, chaux, fumée de silice). Ces résultats constituent une base cruciale pour recommander des mélanges de stabilisation optimaux, visant à renforcer la résistance et la durabilité du sol pour diverses applications en génie civil.

# **Chapitre IV**

## **Compactage et portance du sol étudié**

### **IV.1. Introduction**

Le compactage des sols est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à augmenter le poids volumique sec du sol traité, ce qui conduit à réduire son volume apparent. En générale, après le compactage, le sol acquière :

- une augmentation de la densité sèche ;
- une augmentation de la capacité portante ;
- une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- une diminution de la perméabilité ;
- une diminution de la compressibilité.

Cependant, la portance dépend de la nature du sol, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage.

### **IV.2. Les principes de base du compactage**

Le compactage consiste à appliquer suffisamment d'énergie au sol pour y réduire l'indice des vides et ainsi en accroître la compacité. La densité sèche d'un sol compacté sera donc supérieure à celle d'un sol non compacté. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui permet de vérifier l'efficacité du compactage.

### **IV.3. Essais Proctor**

Il existe deux types d'essais Proctor, essai Proctor normal et essai Proctor modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, à l'exception des paramètres liés à l'énergie de compactage appliquée (masse de compactage, nombre de couches, ...). Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

- essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé ;
- essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

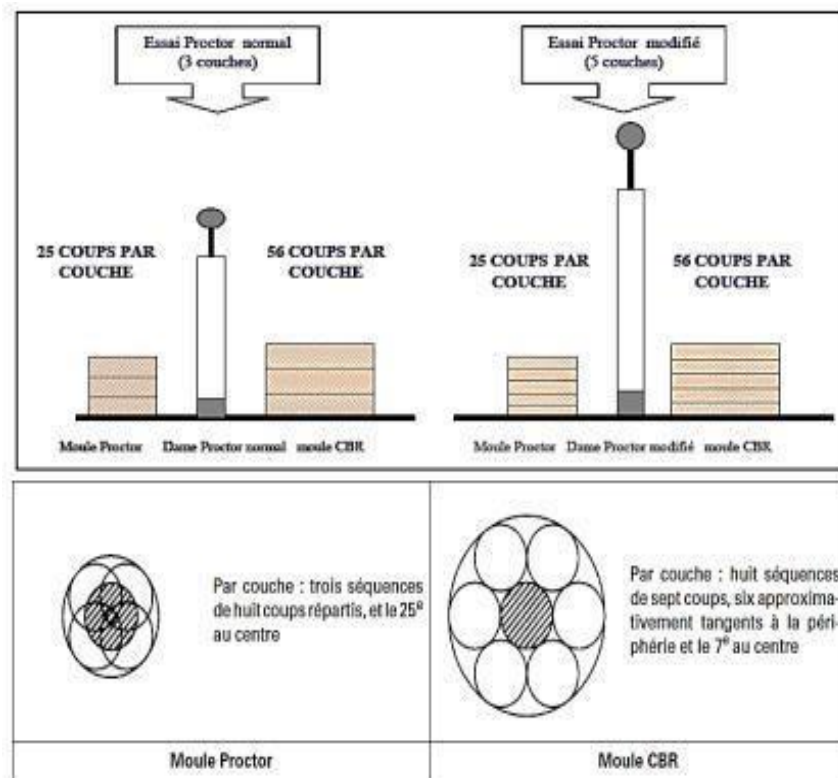


Figure IV.1. Exécution des essais Proctor normal et modifié.

#### IV.4. Essai Proctor normal [NF P 94-093]

L'essai Proctor est un essai géotechnique mis au point par l'ingénieur Américain Ralph R Proctor en 1933, qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité maximale sèche d'un sol par compactage à énergie fixe.

##### IV.4.1. Le but de l'essai

L'essai Proctor est un essai de compactage en laboratoire. Il a pour objectif de déterminer la teneur en eau optimale (quantité d'eau adéquate) permettant d'atteindre la densité sèche maximale du matériau compacté.

##### IV.4.2. Principe de l'essai

L'essai Proctor, consiste à prendre plusieurs échantillons du matériau à étudier. Humidifier ces échantillons à des teneurs en eau différentes augmentées (selon la sensibilité à l'eau du matériau). Compacter ensuite ces échantillons humides dans un moule, à l'aide d'une dame selon un processus bien défini. Les teneurs en eau et les masses volumiques sèches des éprouvettes compactées sont déterminées et portées sur un graphique. La courbe obtenue, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la densité sèche du matériau

correspondant à une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage.

#### **IV.4.3. Matériel nécessaire**

Le matériel nécessaire pour l'essai Proctor, est le suivant :

- moule Proctor ;
- dame Proctor ;
- un bac ;
- une truelle ;
- une balance électronique ;
- une règle à araser ;
- un cric ;
- une étuve.

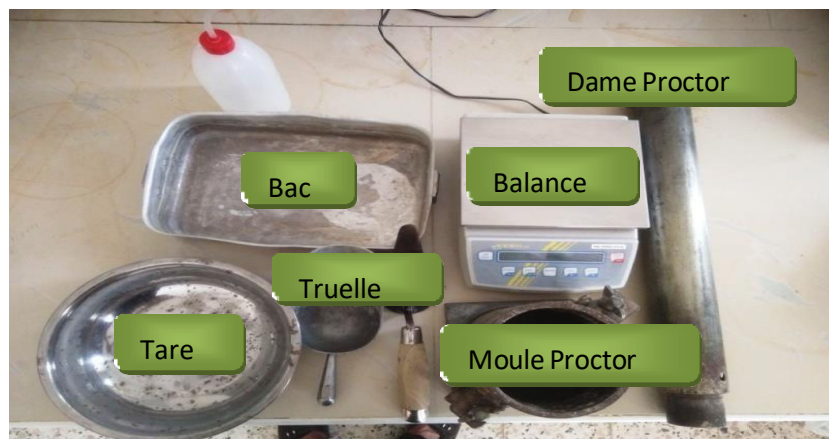


Figure IV.2. Matériaux de l'essai Proctor.

#### **IV.4.4. Le mode opératoire**

L'ensemble du matériel nécessaire à l'essai est séché à l'air ou dans une étuve à 50°C jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec avant de commencer l'essai, ensuite il sera concassé par un broyeur et il sera tamisé, seul le tamisât est conservé pour l'essai. L'échantillon sera humidifié à des teneurs en eau différentes puis homogénéisé, puis divisé par appréciation visuelle en trois échantillons. Le compactage se fait en trois couches d'épaisseurs égales. Après avoir compacté la dernière couche, et retiré la rehausse, le matériau doit dépasser le bord du moule de 1 à 2 cm au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule. Si des grains sont arrachés en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments plus fins et lisser la surface de l'éprouvette.

Démouler l'éprouvette, déterminer le poids humide et la mettre à l'étuve pour déterminer le poids sec. Ces opérations sont répétées pour tous les échantillons compactés.



Figure IV.3. Matériel de confection des éprouvettes d'essai Proctor normal.



Figure IV.4. Extraction d'une éprouvette avec un cric.

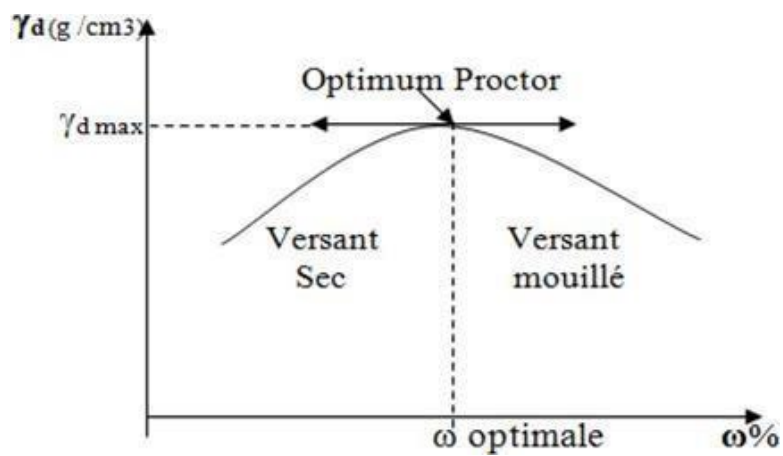


Figure IV.5. Forme de la courbe Proctor.

#### IV.4.5. Les calculs

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

avec :

W : la teneur en eau (%) ;

M<sub>h</sub> : la masse humide (g) ;

M<sub>s</sub> : la masse sèche (g).

$$\rho_d = \frac{M_s}{V}$$

avec :

ρ<sub>d</sub> : la masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ;

M<sub>s</sub> : la masse sèche.

#### IV.5. Résultats et interprétations

On porte chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante.

##### IV.5.1. Essai Proctor sans ajout

Le tableau suivant, montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile à l'état naturel.

Tableau IV.1. Les résultats de l'essai Proctor (sans ajout).

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	6%	1534	1370	11.970	1.451
(2)	8%	1555	1381	12.599	1.462
(3)	10%	1587	1394	13.845	1.476
(4)	12%	1593	1377	15.686	1.458

La figure IV.6 suivante, présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile étudiée, à l'état naturel.

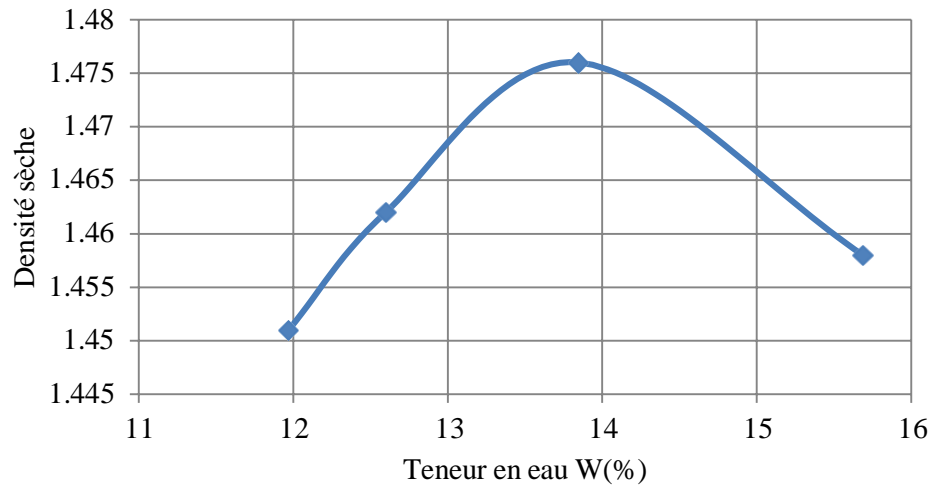


Figure IV.6. Courbe Proctor (sans ajout).

D'après la figure IV.6, les résultats de l'essai Proctor à l'état naturel montrent que la densité sèche du sol argileux varie en fonction de la teneur en eau jusqu'à l'optimum. Elle atteint un maximum de 1.476 à une teneur en eau de 13.845%.

Au-delà de cette teneur en eau, la densité sèche diminue pour atteindre une valeur de 1.458 à une teneur en eau de 15.686%, cela indique que l'excès d'eau réduit l'efficacité du compactage.

#### IV.5.2. Essai Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice

Le tableau suivant montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile étudiée avec ajout de 4% de fumée de silice.

Tableau IV.2. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide ( $M_h$ ) (g)	La masse sèche ( $M_s$ ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	8%	1541	1399	10.150	1.481
(2)	10%	1589	1420	11.901	1.504
(3)	12%	1605	1403	14.397	1.486
(4)	14%	1623	1390	16.762	1.471

La figure IV.7, présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 4% de fumée de silice.

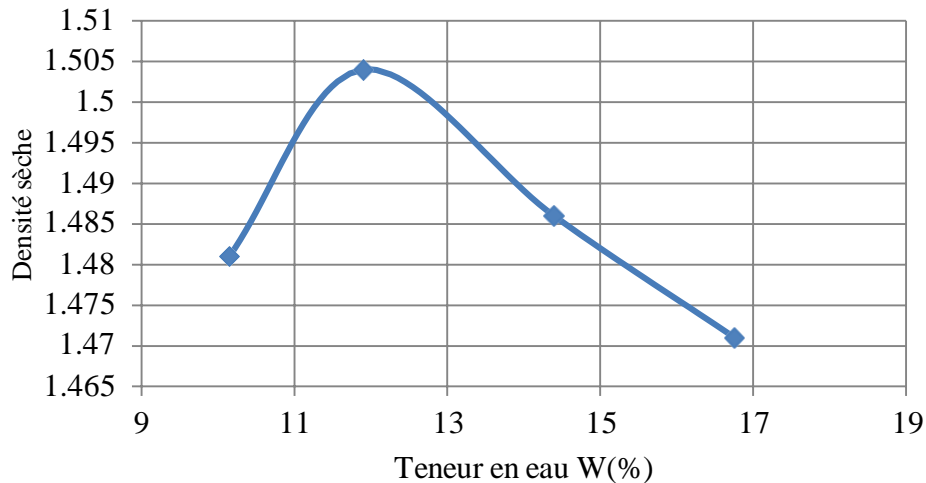


Figure IV.7. Courbe Proctor avec ajout de 4% de fumée de silice.

D'après la figure IV.7, on constate que l'ajout de 4% de fumée de silice améliore significativement la densité sèche du sol argileux pour toutes les teneurs en eau testées. Le compactage est plus efficace avec la fumée de silice, atteignant une densité sèche maximale de 1.504 à une teneur en eau de 11.901%, comparée à une densité sèche maximale de 1.476 à une teneur en eau de 13.845% sans ajout. Cela montre que la fumée de silice améliore l'interaction entre les particules du sol, permettant un meilleur compactage à des teneurs en eau plus faibles et élargissant la plage de teneurs en eau pour un compactage efficace.

#### IV.5.3. Essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice

Le tableau IV.3 suivant, montre la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile étudiée avec ajout de 6% de fumée de silice.

Tableau IV.3. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	10%	1550	1369	13.221	1.450
(2)	12%	1587	1373	15.586	1.454
(3)	14%	1655	1406	17.709	1.489
(4)	16%	1664	1389	19.798	1.471

La figure IV.8, présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 6% de fumée de silice.

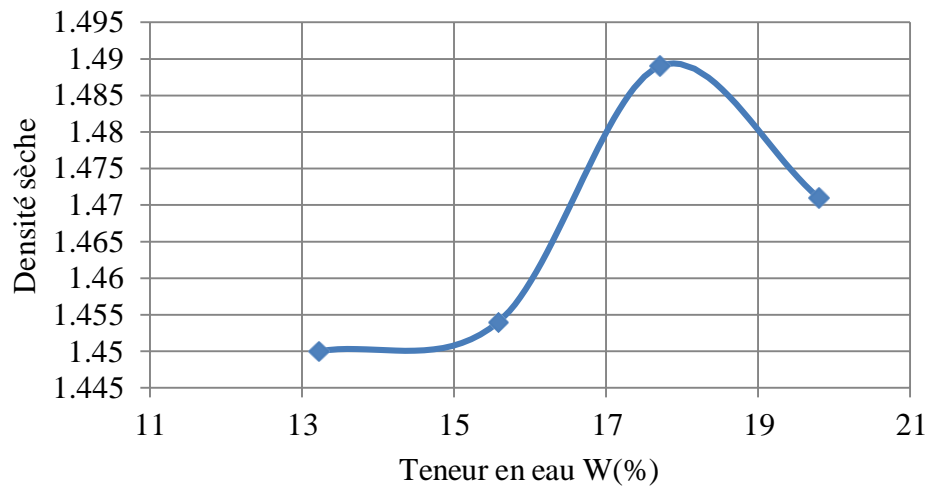


Figure IV.8. Courbe Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice.

D'après la figure IV.8, on remarque que l'ajout de 6% de fumée de silice a conduit à une diminution de la densité sèche du sol argileux étudié à diverses teneurs en eau spécifiques. À 13.221%, la densité sèche atteint la valeur de 1.450, cela montre une légère amélioration par rapport à l'état naturel. À 15.586%, la densité sèche est de 1.454, indique une stabilité accrue au compactage. À 17.709%, la densité sèche atteint la valeur de 1.489, soulignant une amélioration significative grâce à la fumée de silice. À 19.798%, la densité sèche diminue jusqu'à une valeur de 1.471.

### Comparaison des résultats

La figure IV. 9, présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile à l'état naturel (sans ajout), et ajout de 4% et 6% de fumée de silice.

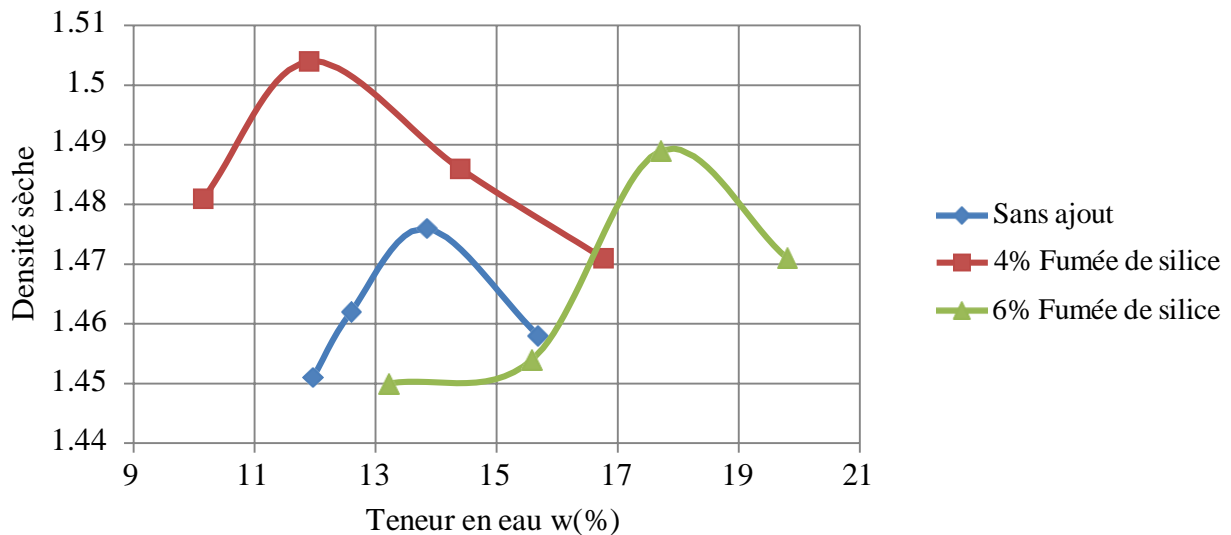


Figure IV.9. Courbe Proctor à l'état naturel, et avec ajout de 4% et 6% de fumée de silice.

A travers la figure IV.9, les résultats des essais Proctor montrent des valeurs différentes entre l'ajout de 4% et 6% de fumée de silice. À 4% de fumée de silice, la densité sèche du sol argileux atteint 1,504 à 11,901 % de teneur en eau, tandis qu'avec un ajout de 6% de fumée de silice, la densité sèche est légèrement inférieure à 1.489 à 17.709% de teneur en eau. Cette observation indique que bien que l'ajout de 6% de fumée de silice améliore la densité sèche par rapport à l'état naturel, cette amélioration est moindre que celle obtenue avec un ajout de 4% de la fumée de silice dans des conditions similaires.

Ces résultats suggèrent une sensibilité de la compaction du sol argileux à la concentration de la fumée de silice, où une concentration plus élevée ne garantit pas toujours une densité sèche supérieure.

### Conclusion

En conclusion, l'ajout de fumée de silice a démontré un effet bénéfique sur la compaction du sol argileux dans les essais Proctor. À des concentrations de 4% et 6%, la fumée de silice a contribué à améliorer la densité sèche du sol à différentes teneurs en eau testées. Bien que l'effet soit plus marqué avec 4% de fumée de silice, il est crucial de noter que les deux concentrations ont montré une capacité à augmenter la densité sèche par rapport aux conditions sans ajout. Cette amélioration est attribuée à la capacité de la fumée de silice à renforcer la liaison entre les particules d'argile, favorisant ainsi un meilleur compactage du sol. En conséquence, l'utilisation de la fumée de silice peut être envisagée comme une méthode efficace pour optimiser la stabilité et la résistance mécanique des sols argileux dans diverses applications en génie civil et en construction.

#### IV.5.4. Essais Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment

Les tableaux suivants récapitulent la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6 % de ciment.

Tableau IV.4. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	6%	1594	1465	8.805	1.551
(2)	8%	1628	1470	10.748	1.557
(3)	10%	1642	1453	13.007	1.539
(4)	12%	1659	1446	14.730	1.531

Tableau IV.5. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	8%	1595	1443	10.533	1.528
(2)	10%	1625	1453	11.837	1.539
(3)	12%	1681	1484	13.274	1.572
(4)	14%	1701	1465	16.109	1.552

Tableau IV.6. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	10%	1675	1490	12.416	1.578
(2)	12%	1704	1495	13.979	1.583
(3)	14%	1723	1486	15.948	1.574
(4)	16%	1748	1473	18.669	1.560

La figure IV.10 présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment.

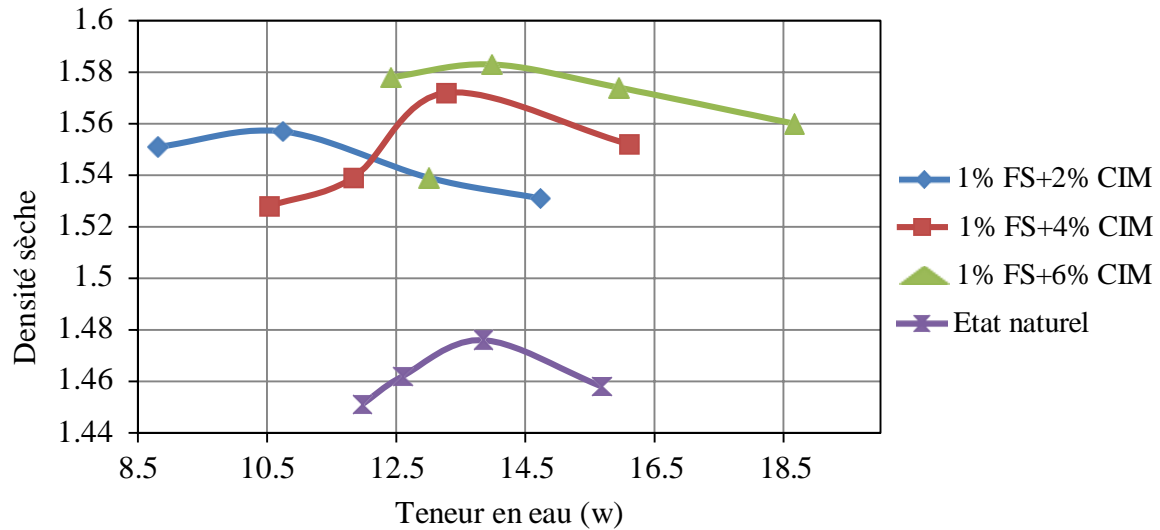


Figure IV.10. Courbes Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment.

Les résultats de la figure IV.10, montrent que les densités sèches optimales du sol argileux augmentent progressivement avec l'augmentation des pourcentages de ciment ajouté (2%, 4%, 6%) en combinaison avec 1% de fumée de silice. Sans ajout, la densité sèche du sol était initialement plus basse, mais avec l'ajout de 2% de ciment, elle atteint la valeur de 1.557. À 4% de ciment, la densité sèche augmente jusqu'à une valeur de 1.572.

Enfin, à 6% de ciment, la densité sèche atteint la valeur de 1.583. Ces résultats mettent en évidence l'effet synergique positif de la fumée de silice et du ciment sur l'amélioration de la compaction du sol argileux, soulignant l'importance de ces additifs pour renforcer la densité et la résistance du sol dans diverses applications en génie civil et en construction.

#### IV.5.5. Essais Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment

La variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4%, et 6% de ciment sont récapitulés dans les tableaux suivants.

Tableau IV.7. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	14%	1645	1423	15.600	1.507
(2)	16%	1683	1430	17.692	1.514
(3)	18%	1749	1456	20.123	1.542
(4)	20%	1771	1445	22.560	1.530

Tableau IV.8. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	12%	1642	1434	14.504	1.519
(2)	14%	1671	1442	15.880	1.527
(3)	16%	1712	1449	18.150	1.534
(4)	18%	1737	1447	20.041	1.532

Tableau IV.9. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 6% de ciment.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	16%	1678	1419	18.252	1.503
(2)	18%	1722	1434	20.083	1.519
(3)	20%	1783	1458	22.290	1.544
(4)	22%	1804	1453	24.088	1.539

La courbes de variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 6 % de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment sont présenté dans la figure IV.11 suivante.

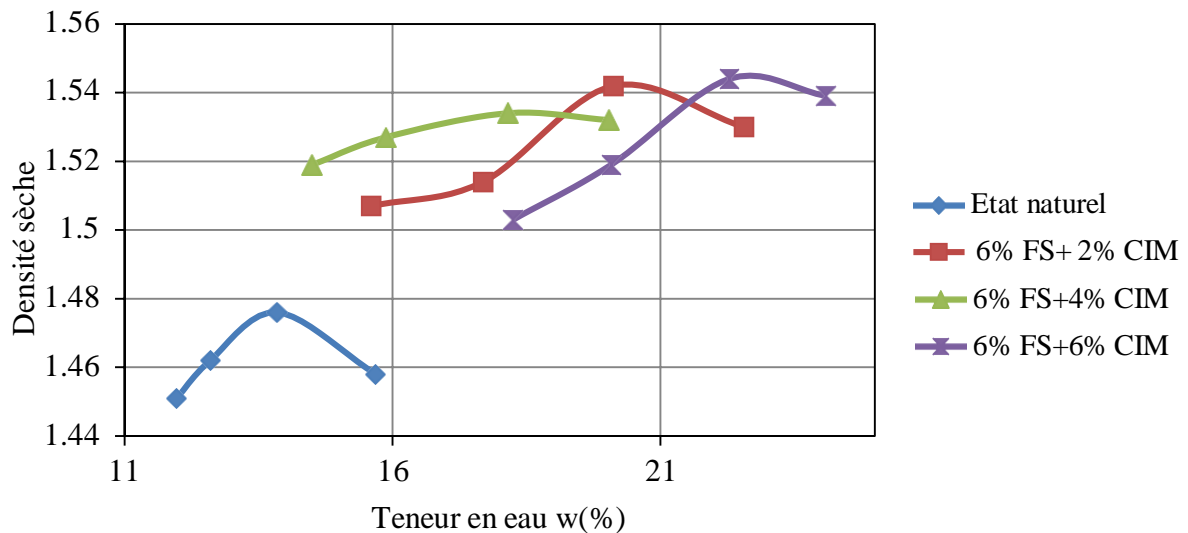


Figure IV.11. Courbes Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%,4% et 6 % de ciment.

A travers la figure IV.11, on constate que dans les essais où l'ajout de 6% de fumée de silice ont été combinés avec différents pourcentages de ciment (2%, 4%, 6%). Les résultats montrent des variations intéressantes dans les densités sèches du sol argileux. À 2% de ciment, on observe une augmentation progressive de la densité sèche, indiquant une amélioration de la compaction du sol.

Cependant, avec l'ajout de 4% de ciment, il y a une légère diminution de la densité sèche par rapport à l'essai précédent, bien que les valeurs restent supérieures à celles de l'essai sans ajout. En revanche, à 6% de ciment, la densité sèche augmente de manière significative, dépassant même les valeurs observées avec 2% de ciment.

Ces résultats montrent que l'effet du ciment sur la densité du sol argileux peut varier selon le pourcentage ajouté, montrant une tendance à une optimisation maximale de la compaction avec des concentrations plus élevées de ciment combinées à la fumée de silice.

### Conclusion

L'argile réagit différemment avec le ciment et la fumée de silice lorsqu'ils sont ajoutés. Le ciment, en s'hydratant, forme des liaisons chimiques avec les particules d'argile, renforçant ainsi la structure globale du sol et améliorant sa compacité. Cela conduit à une augmentation de la densité sèche, comme observé dans les essais où l'ajout de ciment a progressivement augmenté cette mesure. D'autre part, la fumée de silice, en tant qu'additif finement divisé, remplit les vides entre les particules d'argile, améliorant la densification du sol lors du processus de compaction. Cela favorise également une meilleure liaison entre les particules d'argile et le

ciment hydraté, renforçant ainsi davantage la structure du sol et augmentant sa densité. En combinant ces deux effets, l'argile bénéficie d'une amélioration significative de sa résistance mécanique et de sa stabilité, essentielle pour diverses applications en génie civil et en construction.

**IV.5.6. Essais Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux**

Les tableaux suivants, montrent la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.

Tableau IV.10. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (Mh) (g)	La masse sèche (Ms) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
(1)	12%	1673	1467	14.042	1.554
(2)	14%	1708	1472	16.032	1.559
(3)	16%	1738	1471	18.150	1.558
(4)	18%	1759	1463	20.232	1.549

Tableau IV.11. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (Mh) (g)	La masse sèche (Ms) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
(1)	10%	1667	1494	11.579	1.582
(2)	12%	1743	1524	14.370	1.614
(3)	14%	1756	1508	16.445	1.597
(4)	16%	1773	1496	18.516	1.516

Tableau IV.12. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (Mh) (g)	La masse sèche (Ms) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
(1)	12%	1625	1433	13.398	1.518
(2)	14%	1683	1450	16.068	1.536
(3)	16%	1720	1461	17.727	1.547
(4)	18%	1723	1443	19.404	1.528

La figure IV.12, présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

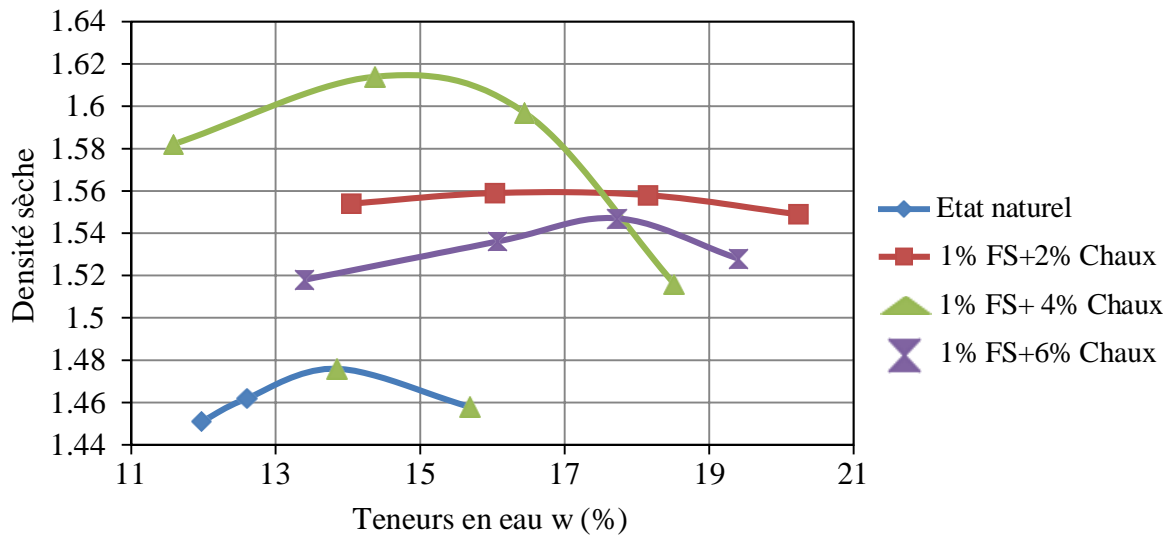


Figure IV.12. Courbes Proctor avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%,4% et 6 % de chaux.

Les essais avec l'ajout de 1% de fumée de silice combiné à différents pourcentages de chaux (2%, 4%, 6%) montrent une augmentation significative de la densité sèche par rapport à l'essai sans ajout. À 2% de chaux, la densité sèche atteint des niveaux élevés, dépassant 1.559 à 16.032% de teneur en eau, montrant une amélioration continue de la compaction. À 4% de chaux, la densité sèche atteint un pic à 1.614 à 14.370% de teneur en eau, démontrant une efficacité accrue dans la densification du sol. Cependant, à 6% de chaux, bien que la densité sèche reste élevée à des teneurs en eau plus basses, elle diminue légèrement par rapport à l'essai avec 4% de chaux, atteignant 1.547 à 17.727% de teneur en eau. Cette diminution peut être expliquée par un possible surdosage de chaux, ce qui pourrait affecter négativement la compaction du sol à des teneurs en eau plus élevées. Ainsi, ces résultats montrent que l'effet du pourcentage de chaux sur la densité sèche du sol argileux varie, nécessitant une optimisation précise pour assurer une compaction optimale dans différentes conditions de teneur en eau.

#### IV.5.7. Essais Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux

Les tableaux suivants, montrent la variation de la teneur en eau en fonction de la masse volumique sèche de l'argile avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

Tableau IV.13. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	16%	1634	1381	18.320	1.462
(2)	18%	1675	1392	20.330	1.474
(3)	20%	1720	1409	22.072	1.492
(4)	22%	1752	1403	24.875	1.486

Tableau IV.14. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	16%	1638	1396	17.335	1.478
(2)	18%	1692	1412	19.830	1.495
(3)	20%	1729	1421	21.674	1.505
(4)	22%	1752	1416	23.728	1.499

Tableau IV.15. Résultats de l'essai Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 6% de chaux.

Essai	La teneur en eau W (%)	La masse humide (M <sub>h</sub> ) (g)	La masse sèche (M <sub>s</sub> ) (g)	La teneur en eau W(%)	La masse volumique sèche ρ <sub>a</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
(1)	18%	1684	1415	19.010	1.498
(2)	20%	1725	1417	21.736	1.502
(3)	22%	1773	1434	23.640	1.519
(4)	24%	1791	1425	25.684	1.509

La figure IV.13 suivante présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

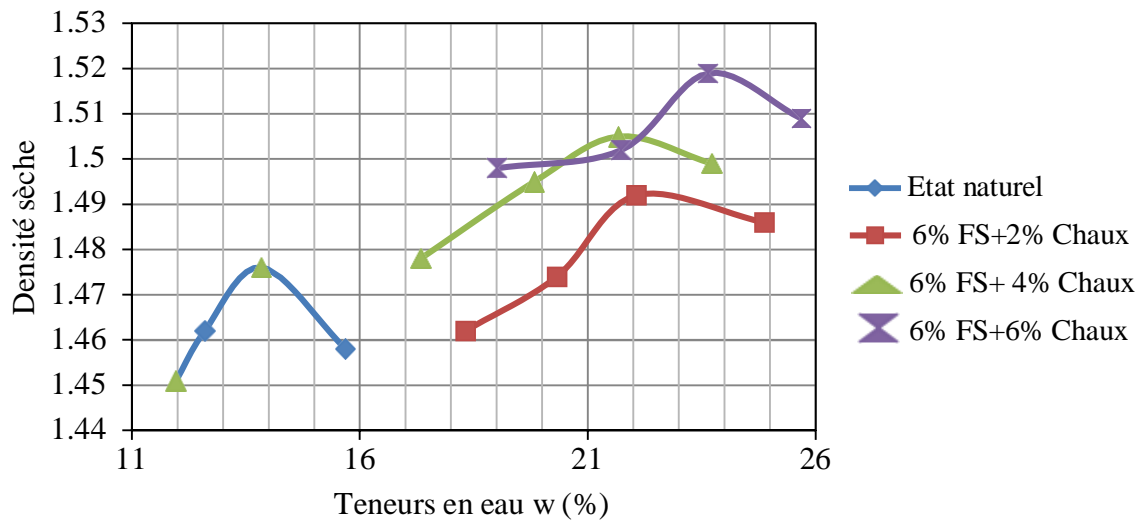


Figure IV.13. Courbes Proctor avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%,4% et 6% de chaux.

La figure IV.13 montre que dans ces essais avec 6% de la fumée de silice et différents pourcentages de chaux (2%, 4%, 6%). La densité sèche augmente de manière régulière à mesure que le pourcentage de chaux augmente. À 2% de chaux, la densité sèche atteint une valeur de 1.492, montrant une augmentation.

Avec 4% de chaux, cette tendance se poursuit avec une densité sèche maximale de 1.505. Enfin, à 6% de chaux, la densité sèche continue d'augmenter pour atteindre une valeur de 1.519, indiquant une amélioration constante sans diminution par rapport aux essais précédents.

Cette augmentation progressive de la densité du sol témoigne de l'effet bénéfique de la combinaison de la fumée de silice et de la chaux sur la compaction et la stabilité du sol.

#### IV.6. Conclusion

La combinaison de la fumée de silice avec la chaux et le ciment, exerce un effet significatif sur les propriétés géotechniques du sol. La fumée de silice agit comme un agent de remplissage fin qui améliore la densité du sol en remplissant les vides entre les particules, tandis que la chaux réagit chimiquement pour former des composés hydratés qui renforcent la matrice du sol.

Les résultats des essais Proctor montrent que l'ajout de fumée de silice, de ciment et de chaux à différents pourcentages influe significativement sur les propriétés mécaniques du sol argileux. La densité sèche du sol augmente progressivement avec l'augmentation des pourcentages de fumée de silice, indiquant une amélioration du compactage et de la stabilité du sol.

Chapitre V  
Essais de compression  
simple

### **V.1. Introduction**

Le but des essais de compression simple dans les sols est de déterminer le comportement d'un échantillon de sol soumis à une charge verticale appliquée de manière progressive. Ces essais sont couramment utilisés en géotechnique pour caractériser les propriétés de compression des sols et pour évaluer leur capacité à supporter des charges.

Les essais de compression simple permettent de mesurer la déformation du sol sous l'application d'une charge et de déterminer des paramètres importants tels que la compressibilité, la consolidation et la résistance à la compression.

### **V.2. Essai de compression simple [NF P 94-077]**

L'essai de compression simple, régi par la norme NF P 94-077, est une méthode géotechnique essentielle pour évaluer la résistance à la compression des sols. Cet essai consiste à appliquer une charge axiale sur un échantillon de sol jusqu'à sa rupture. Les résultats obtenus permettent de déterminer la capacité du sol à supporter des charges, fournissant des données cruciales pour la conception des fondations et autres structures géotechniques.

### **V.3. Principe de l'essai**

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai. La norme définit entre autre :

- la contrainte de rupture ;
- la contrainte au seuil d'écoulement ;
- la déformation à la rupture ;
- la déformation au seuil d'écoulement.

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à des essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.

### **V.4. Appareillage**

La machine d'essai est du type à vitesse de compression constante, elle est constituée de :

- un plateau fixe ;

- un plateau mobile ;
- un mécanisme d'entraînement de mouvement uniforme en vitesse contrôlée ;
- un indicateur d'effort ;
- Indicateur de déformation.

Elle doit permettre à tout instant d'évaluer la distance séparant deux points déterminés de l'éprouvette ou la distance entre les surfaces de contact de la machine.

### **V.5. Eprouvette**

L'éprouvette doit être constituée d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités des éprouvettes doivent être parallèles et perpendiculaires à la direction de l'application de l'effort.

### **V.6. Mode opératoire**

Prélevez un échantillon de sol et moulez-le en un cylindre de dimensions connues. (102 mm de diamètre et 117 mm de hauteur).

Vérifiez les dimensions et la masse de l'échantillon à l'aide d'un calibre et d'une balance de précision.

Placez l'échantillon préparé entre les plateaux de la presse de compression et assurez-vous qu'il est centré et aligné correctement.

Appliquez une charge axiale de manière progressive et contrôlée à une vitesse constante.

Continuez l'application de la charge jusqu'à la rupture de l'échantillon ou jusqu'à atteindre une déformation critique prédéterminée.

Enregistrez en continu la force appliquée et la déformation axiale de l'échantillon à l'aide d'un système d'acquisition de données.

Calculez la résistance à la compression uniaxiale en divisant la charge maximale enregistrée par la section transversale initiale de l'échantillon.

Documentez toutes les observations, mesures et résultats de l'essai, incluant les détails sur la préparation de l'échantillon, les conditions de l'essai, et les valeurs de résistance obtenues.



Figure V.1. Exécution de l'essai de compression uniaxiale.

## V.7. Présentation des résultats

Les différents résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes.

### V.7.1. Essai de compression simple à l'état naturel (sans ajout)

La figure suivante, présente la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile à l'état naturel (sans ajout).

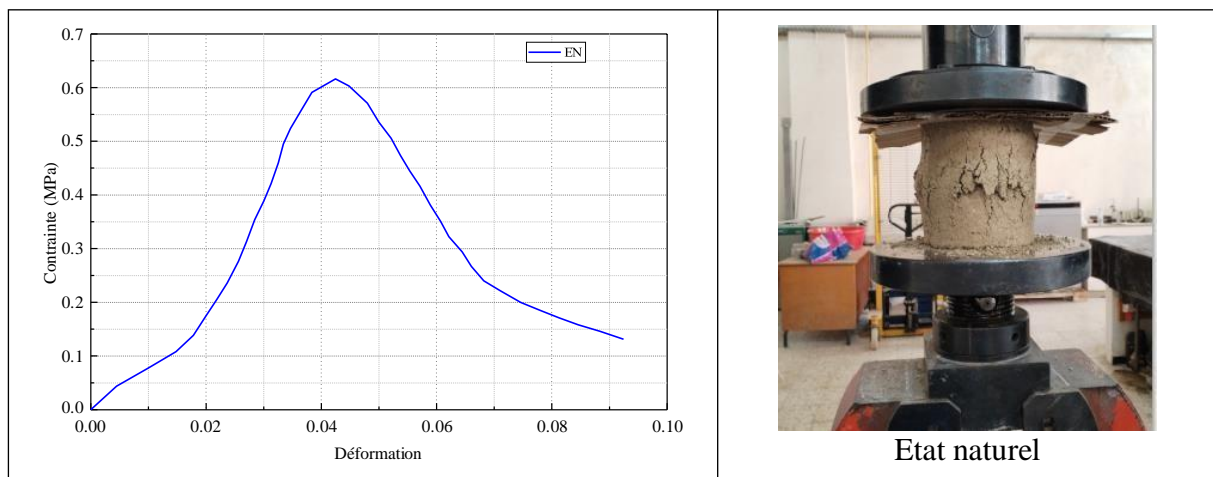


Figure V.2. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) à l'état naturel

### V.7.2. Essai de compression simple avec ajout de 4% de fumée de silice

La figure suivante, présente la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 4% de fumée de silice.

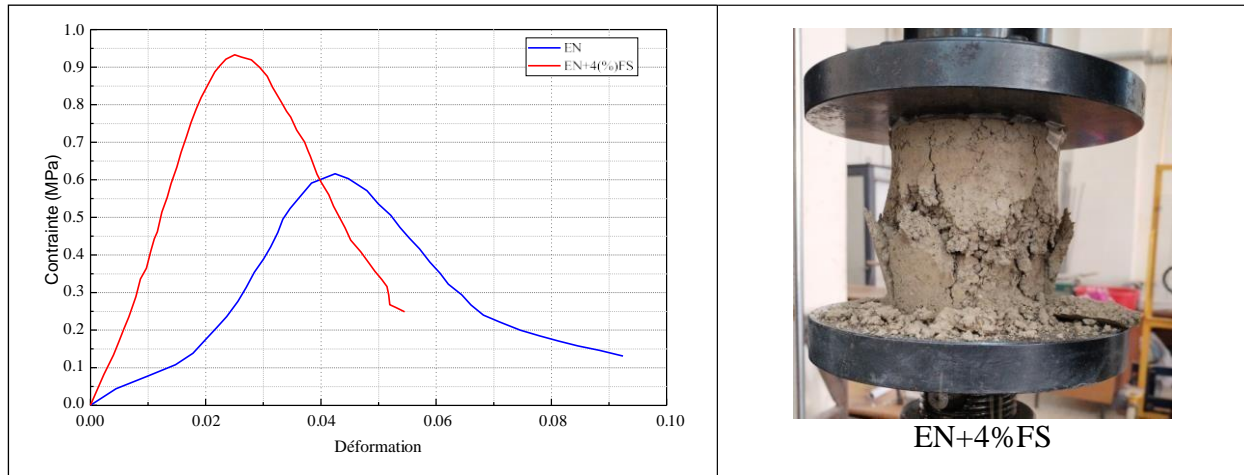


Figure V.3. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 4% de fumée de silice.

### V.7.3. Essai de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice

La figure suivante présente, la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 6% de fumée de silice.

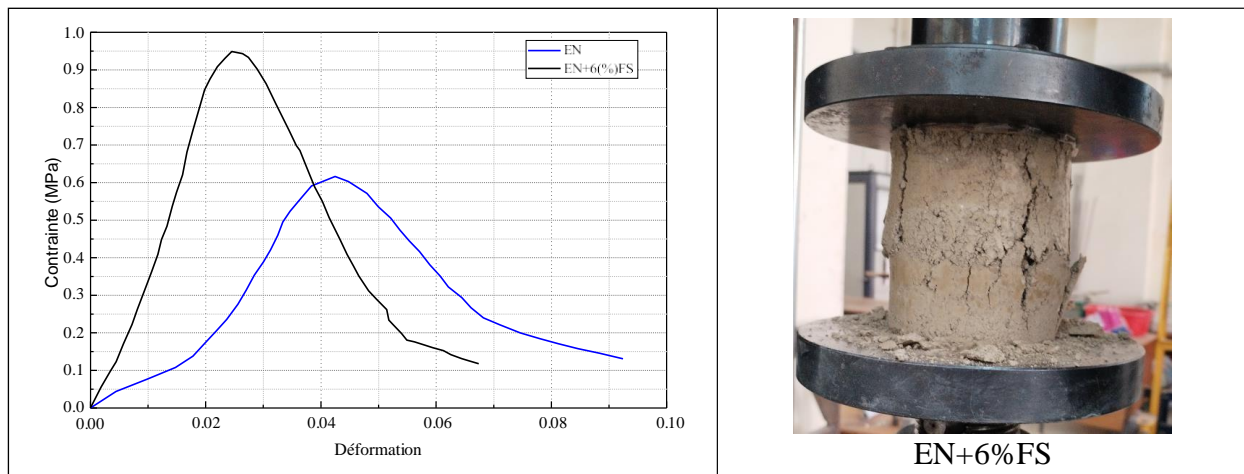


Figure V.4. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice.

### V.7.4. Interprétation des résultats

Les résultats des essais de compression simple montrent que l'état naturel (EN) du sol présente une résistance à la compression de 0.616 MPa. L'ajout de 4% de fumée de silice (FS) augmente significativement cette résistance à 0.948 MPa, probablement en raison de l'amélioration de la densité et de la cohésion du sol grâce à la capacité de la fumée de silice à remplir les vides et à renforcer les liaisons entre les particules d'argile. En revanche, l'ajout de 6% de fumée de silice réduit la résistance à 0.939 MPa, suggérant qu'une surconcentration de

fumée de silice peut perturber la structure optimale du sol, entraînant une agglomération excessive et une diminution de la cohésion.

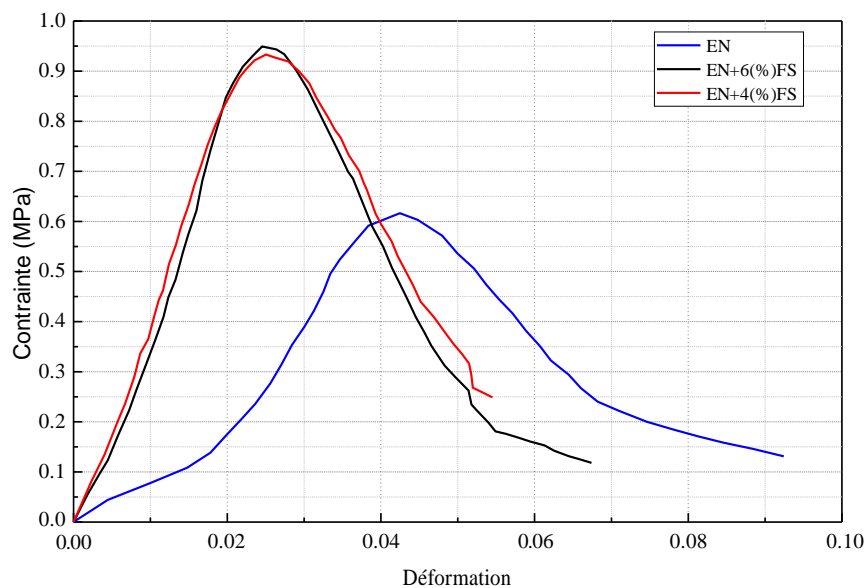


Figure V.5. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) à l'état naturel et avec ajout de 4% et 6% de fumée de silice.

Ces résultats indiquent que l'optimisation de la quantité de fumée de silice est cruciale pour maximiser la résistance et la stabilité du sol.

#### V.8. Essais de compression simple avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de ciment.

Les figures suivantes, présentent la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de ciment.

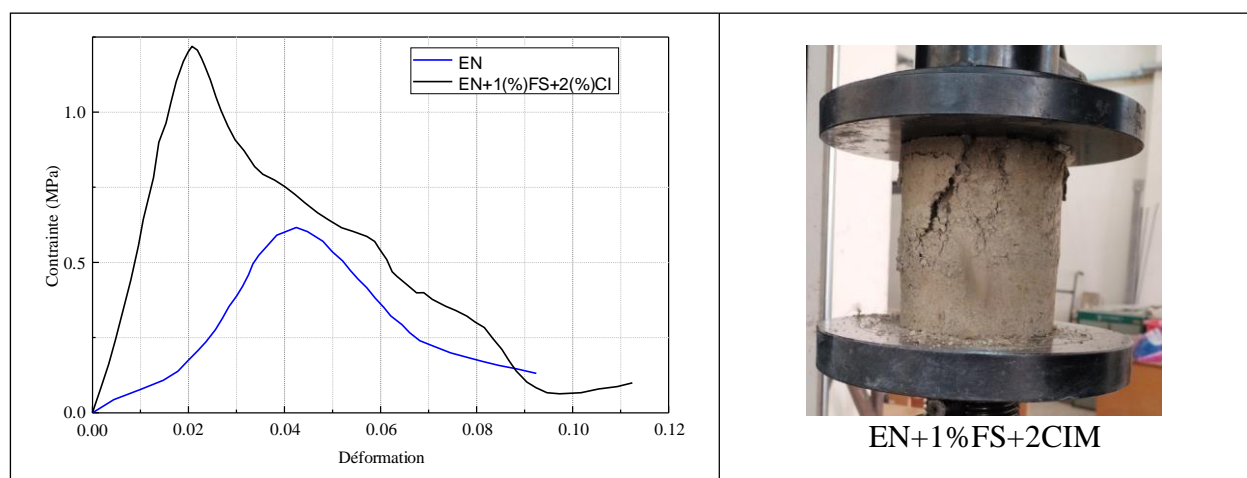


Figure V.6. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de ciment

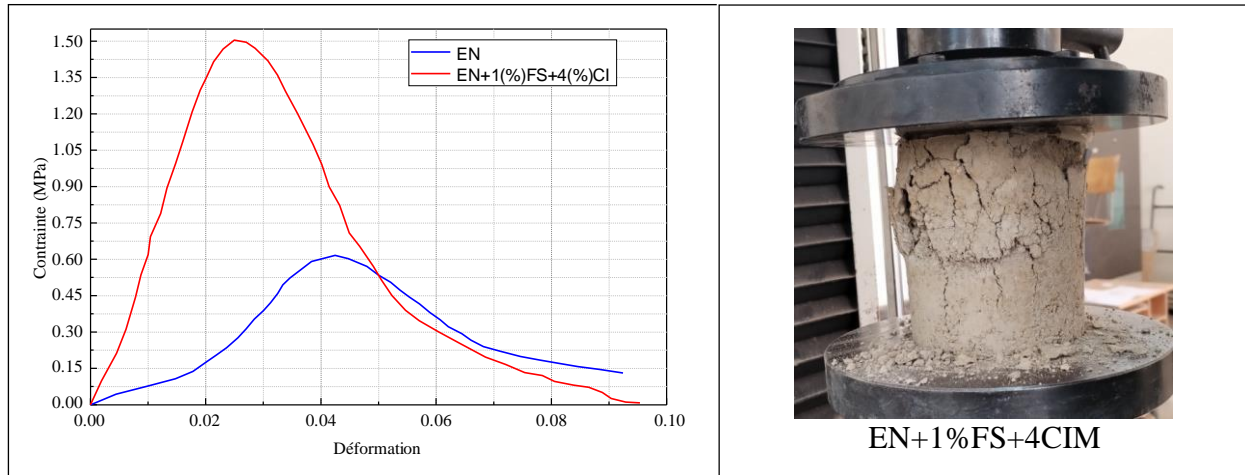


Figure V.7. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de ciment

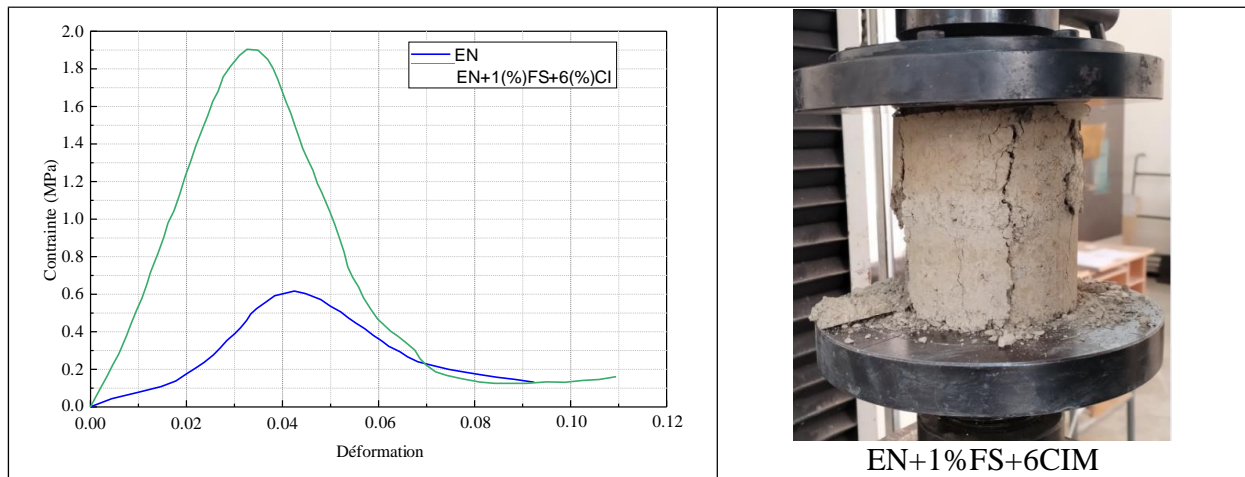


Figure V.8. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de ciment

D'après la figure V.9, les résultats des essais de compression simple montrent des améliorations progressives de la résistance à la compression avec l'ajout combiné de fumée de silice (FS) et de ciment (CI) par rapport à l'état naturel (EN). Le sol naturel (EN) a une résistance de 0.616 MPa. Avec l'ajout de 1% de FS et 2% de (CI), la résistance augmente de manière significative à 1.504 MPa, indiquant une synergie positive entre la fumée de silice et le ciment, qui améliore la cohésion et la compaction du sol. En augmentant le pourcentage du ciment à 4%, la résistance reste élevée jusqu'à une valeur de 1.219 MPa.

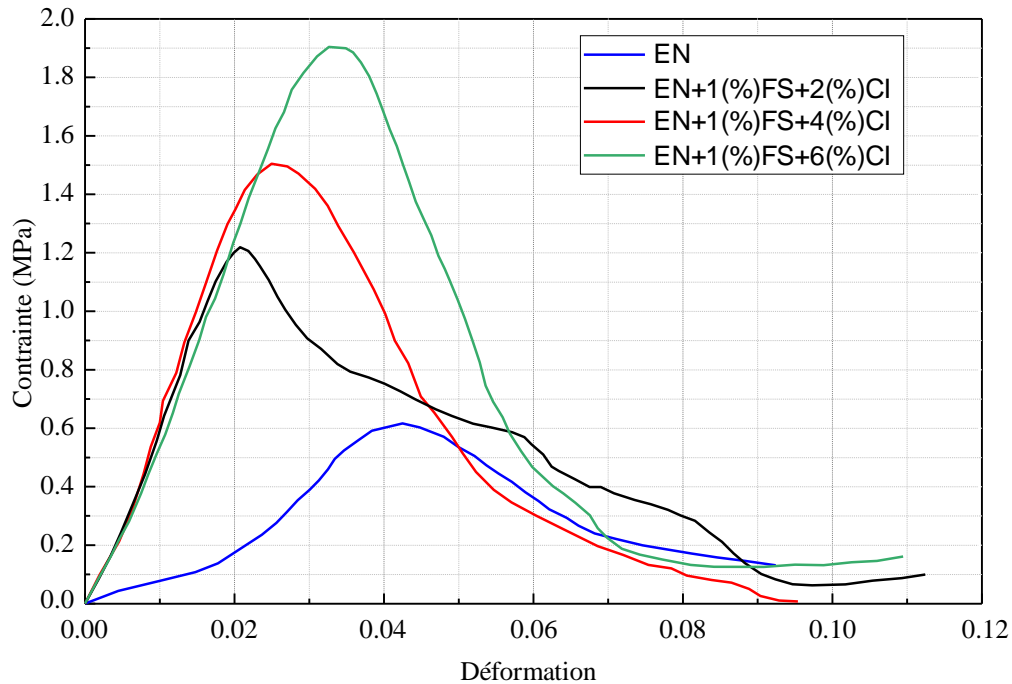


Figure V.9. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment.

Avec 6% de ciment, la résistance atteint un maximum de 1.903 MPa, démontrant que l'augmentation du ciment continue de renforcer le sol de manière substantielle. Ces résultats illustrent l'effet synergique de la fumée de silice et du ciment, où l'optimisation des pourcentages permet d'obtenir une résistance maximale du sol.

#### V.9. Essais de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de ciment.

Les figures suivantes, présentent la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment.

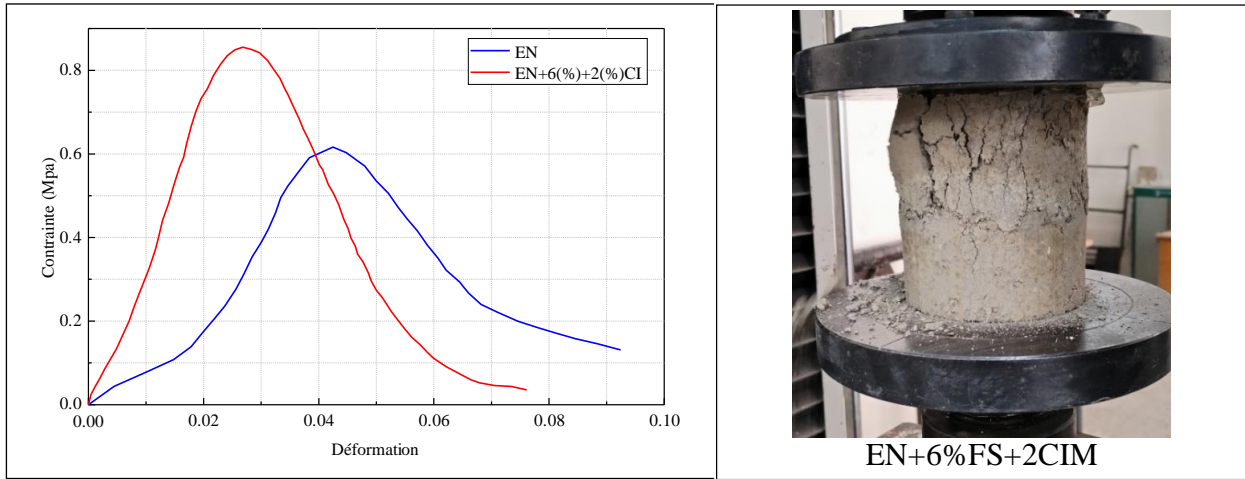


Figure V.10. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de ciment

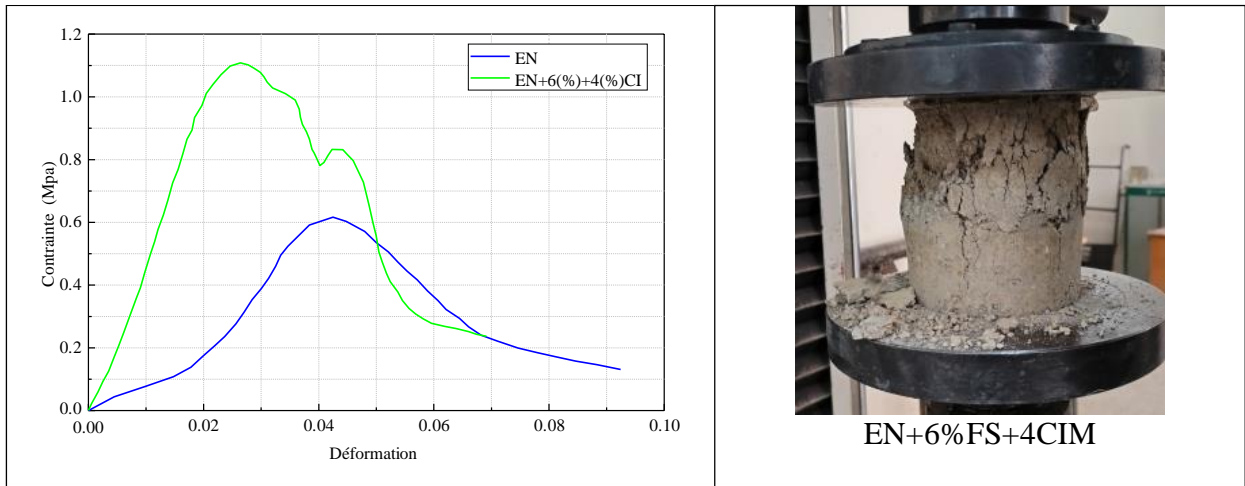


Figure V.11. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de ciment

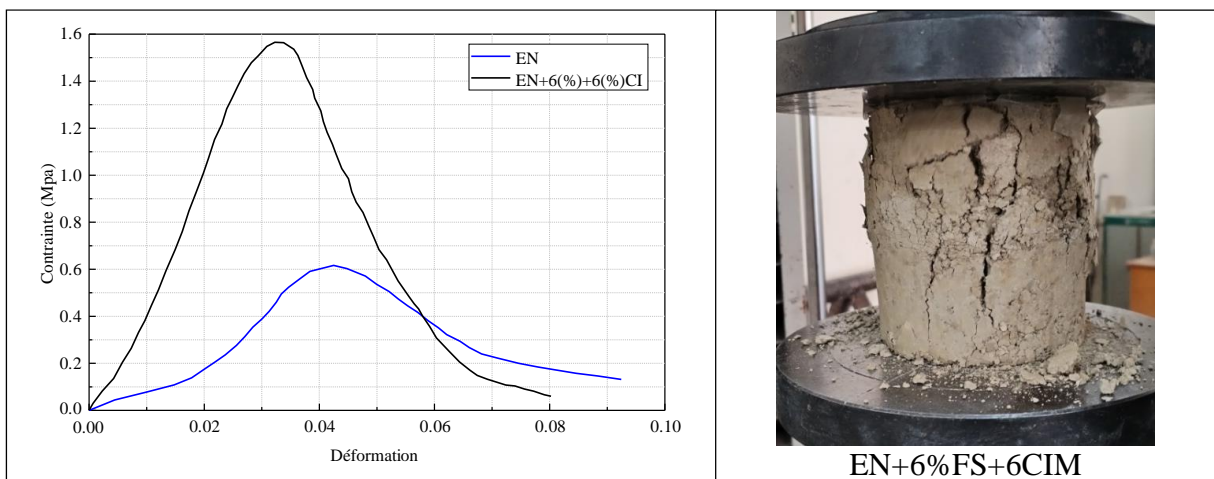


Figure V.12. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 6% de ciment

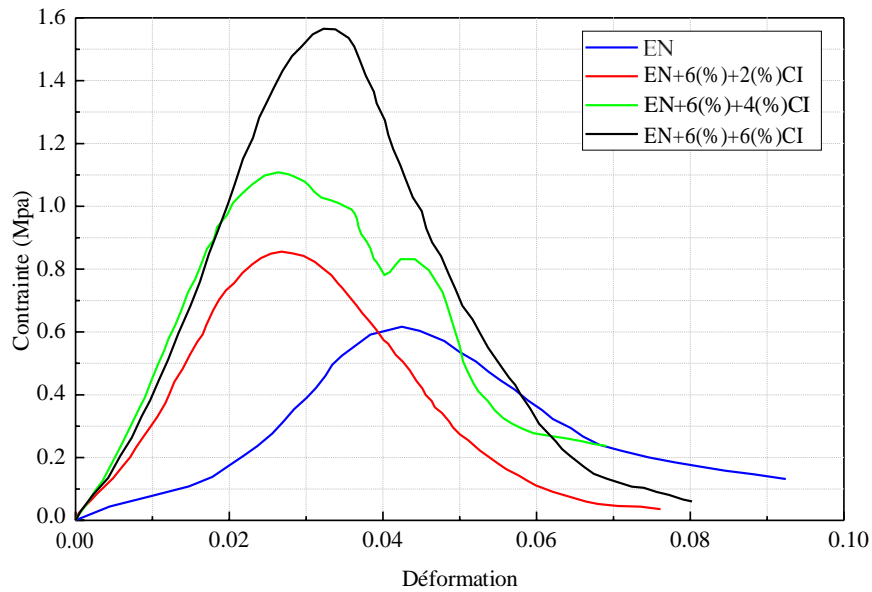


Figure V.13. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de ciment.

D'après la figure V.13, les résultats des essais de compression simple montrent une variation notable de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de l'ajout de 6% de fumée de silice (FS) et de différents pourcentages de ciment (CI) par rapport à l'état naturel (EN). Le sol à l'état naturel (EN) présente une résistance de 0.616 MPa. L'ajout de 6% de FS et 2% de CI augmente cette résistance à une valeur de 0.855 MPa, indiquant une amélioration modérée due à la combinaison des deux stabilisants.

Avec 4% de ciment, la résistance monte de façon plus significative à 1.108 MPa, démontrant un renforcement efficace de la structure du sol grâce à une meilleure liaison et compaction. En augmentant le ciment à 6%, la résistance continue d'augmenter pour atteindre 1.565 MPa, suggérant que la combinaison de la fumée de silice avec une plus grande quantité de ciment améliore encore davantage la cohésion et la performance globale du sol. Ces résultats montrent que l'optimisation de la combinaison de fumée de silice et de ciment est cruciale pour maximiser la résistance à la compression du sol.

#### **V.10. Essais de compression simple avec ajout de 1% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.**

Les figures suivantes, présentent la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

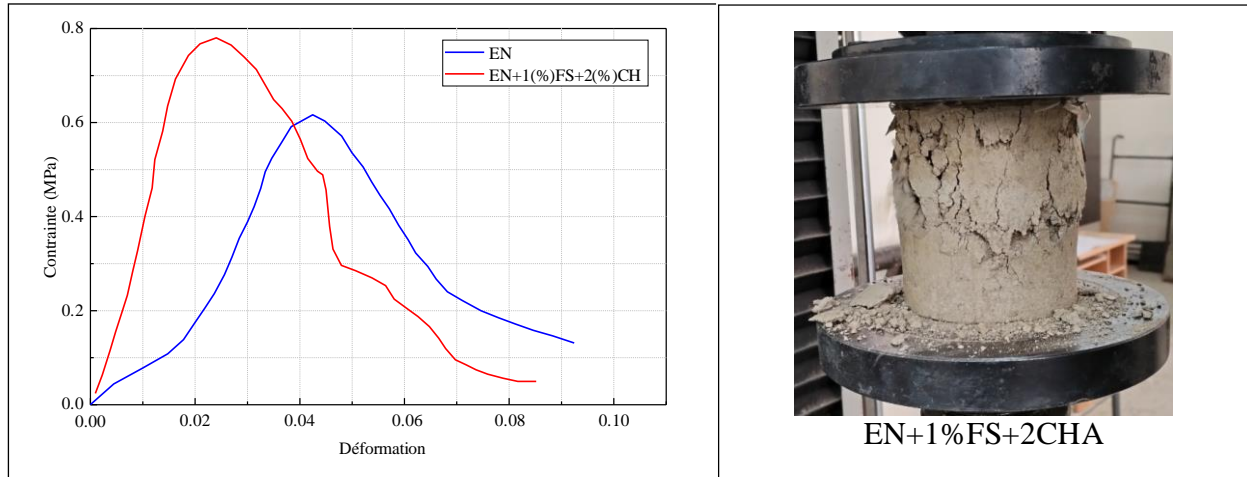


Figure V.14. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2% de chaux

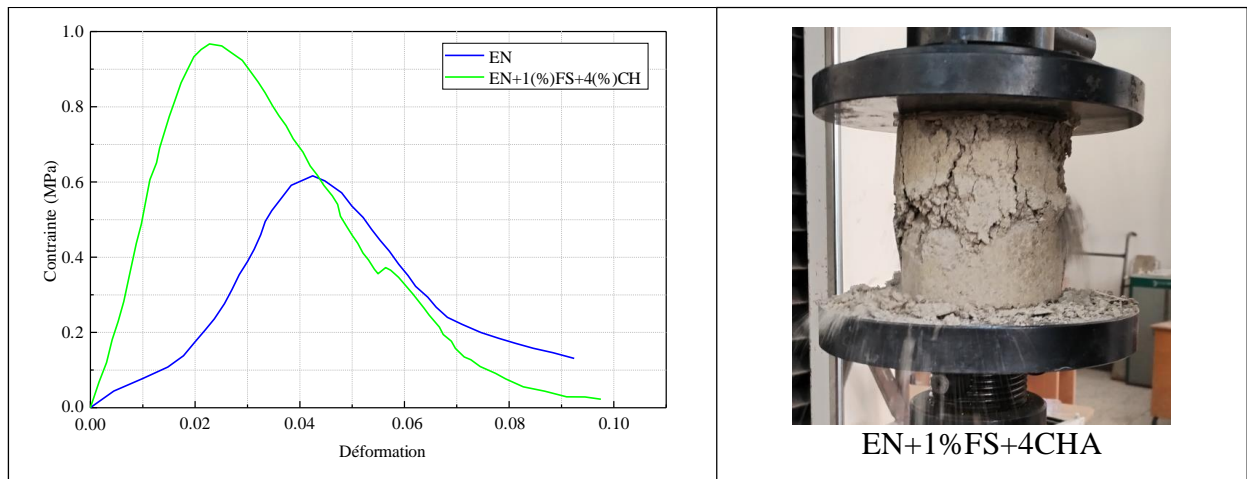


Figure V.15. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 4% de chaux

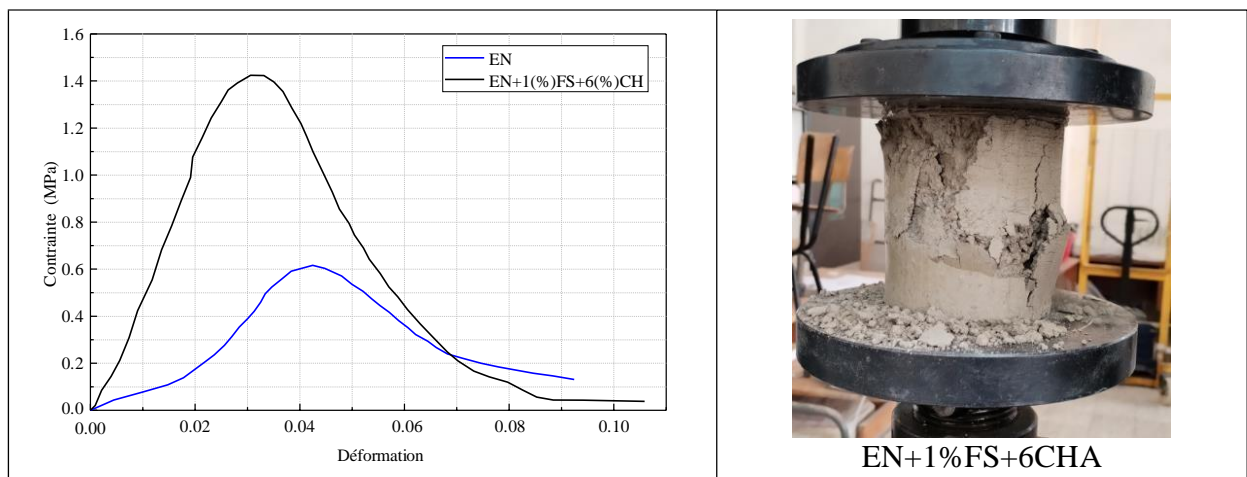


Figure V.16. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 6% de chaux

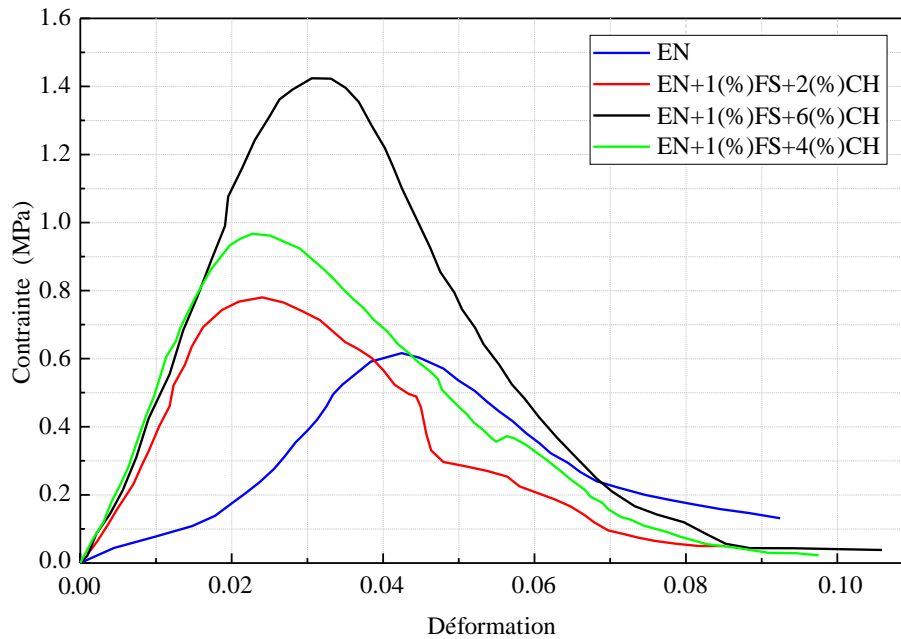


Figure V.17. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 1% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

Les résultats des essais de compression simple, d'après la figure V.17, montrent une amélioration de la résistance à la compression ( $R_c$ ) du sol naturel (EN) lorsqu'il est stabilisé avec 1% de fumée de silice (FS) et différents pourcentages de chaux (CH). Le sol naturel à l'état naturel (EN) présente une résistance de 0.616 MPa. Avec l'ajout de 1% de FS et 2% de CH, la résistance augmente à 0.780 MPa, indiquant un renforcement notable du sol grâce à la réaction entre la fumée de silice et la chaux.

L'augmentation du pourcentage de la chaux à 4%, améliore la résistance à une valeur de 0.967 MPa. Enfin, avec ajout de 6% de chaux, la résistance diminue pour atteindre une valeur de 1.424 MPa. Cela suggère qu'un excès de chaux a conduit à une mauvaise interaction avec la fumée de silice, compromettant ainsi la cohésion et la performance globale du sol.

Ces résultats montrent que l'ajout combiné de fumée de silice et de chaux améliore systématiquement la résistance à la compression du sol, avec une efficacité optimale à des pourcentages modérés de chaux.

#### V.11. Essais de compression simple avec ajout de 6% de fumée de silice et de 2%, 4% et 6% de chaux.

Les figures suivantes, présentent la variation de la résistance à la compression ( $R_c$ ) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 6% de fumée de silice, et de 2%, 4% et 6% de chaux.

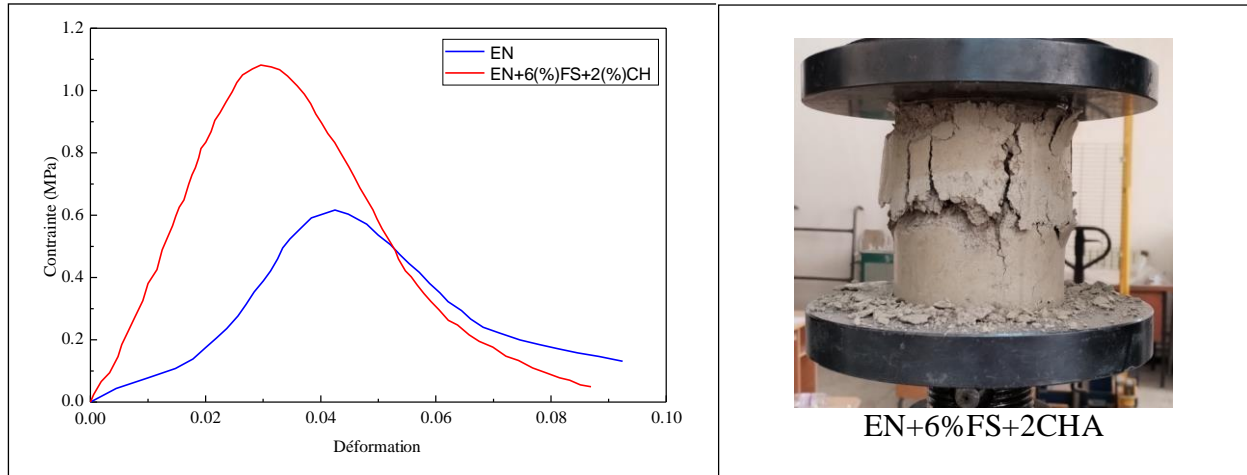


Figure V.18. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 2% de chaux

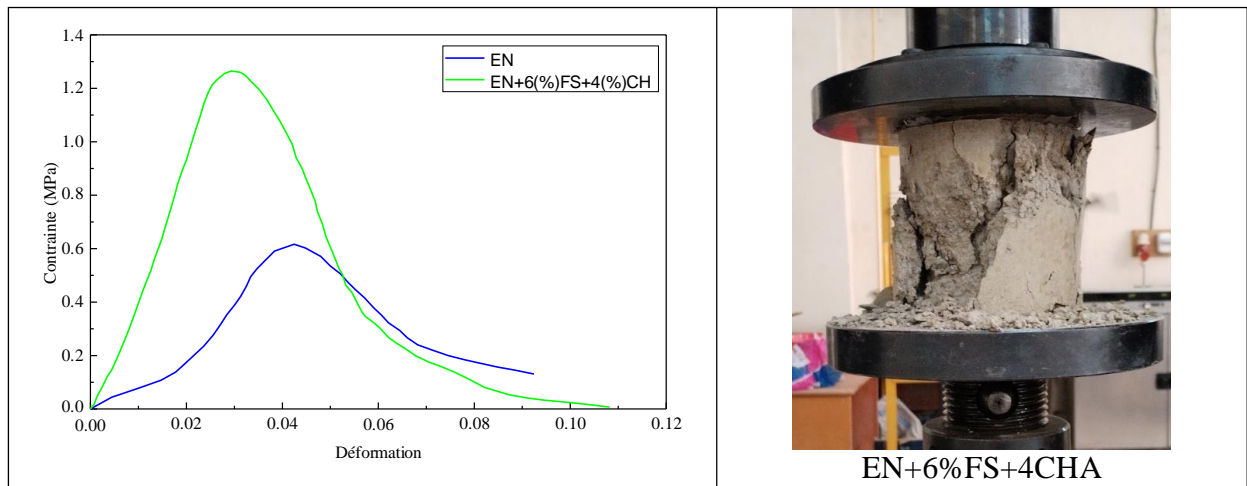


Figure V.19. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 4% de chaux

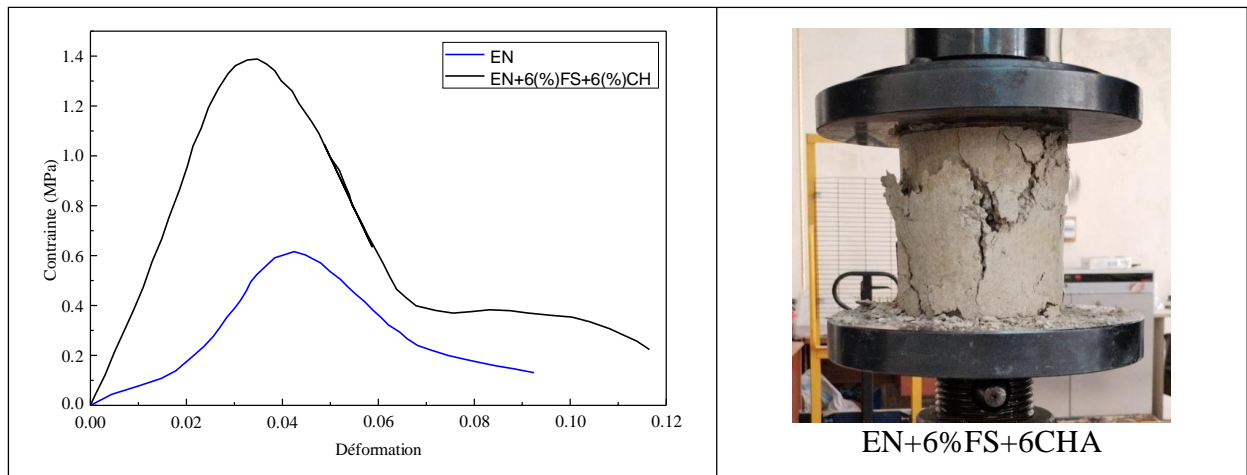


Figure V.20. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de Silice et 6% de chaux

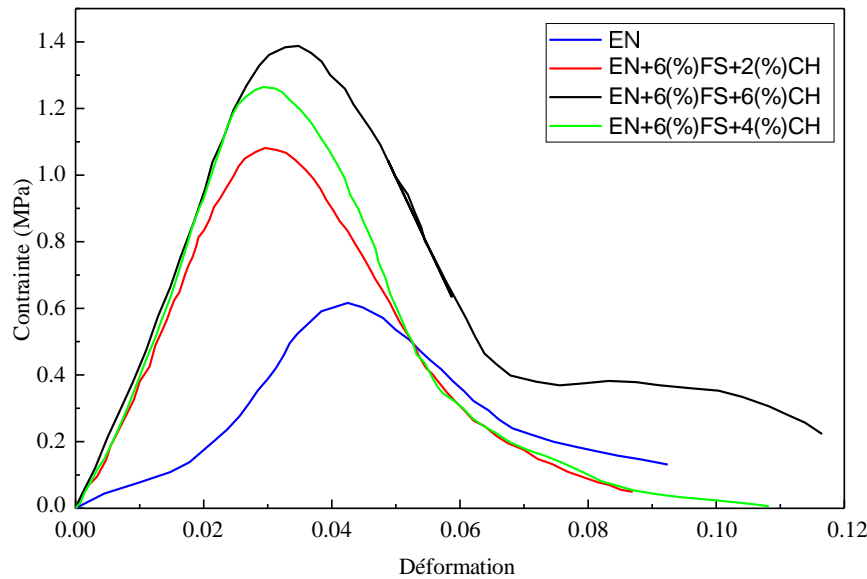


Figure V.21. Courbe de résistance à la compression ( $R_c$ ) avec ajout de 6% de fumée de silice et 2%, 4% et 6% de chaux.

D'après la figure V.21, les essais de compression simple montrent une variation significative de la résistance à la compression ( $R_c$ ) du sol naturel (EN) lorsqu'il est stabilisé avec 6% de fumée de silice (FS) et à des différents pourcentages de chaux (CH). Le sol naturel présente une résistance de 0.616 MPa. Avec l'ajout de 6% de FS et 2% de CH, la résistance augmente à 1.081 MPa, indiquant une amélioration substantielle due à la réaction entre la fumée de silice et la chaux, qui renforce la structure du sol.

L'augmentation de la chaux à 4% augmente la résistance à une valeur de 1.388 MPa, démontrant une amélioration continue et marquée de la cohésion et de la capacité portante du sol. Cependant, avec 6% de chaux, la résistance atteint 1.264 MPa, montrant une légère diminution par rapport à l'ajout de 4% de chaux.

Ces résultats montrent que, l'ajout de chaux améliore globalement la résistance du sol, mais une augmentation au-delà de 4% peut entraîner une diminution de l'efficacité de la stabilisation, probablement en raison d'un excès de chaux qui pourrait nuire à la cohésion optimale des particules du sol.

## V.12. Récapitulatif des résultats obtenus

Les essais de compression simple révèlent que l'ajout de fumée de silice, combinée avec du ciment ou de la chaux, améliore la résistance à la compression du sol argileux. À l'état naturel, la résistance est de 0.616 MPa. Avec 4% de fumée de silice, elle augmente à 0.948 MPa, mais diminue avec 6% de fumée de silice. L'ajout de ciment à 1% de fumée de silice montre une

augmentation notable de la résistance, avec un maximum de 1.903 MPa pour 6% de ciment. De même, l'ajout de chaux améliore la résistance, atteignant un maximum de 1.565 MPa pour 1% de fumée de silice et 6% de chaux. En résumé, les combinaisons optimales pour améliorer la résistance du sol sont celles avec 1% de fumée de silice et des pourcentages élevés de ciment ou de chaux.

### **V.13. Conclusion**

Les résultats des essais de compression simple révèlent des tendances variées en fonction des combinaisons d'ajouts. Par exemple, l'ajout de 6% de fumée de silice montre une augmentation de la résistance à la compression avec le ciment, mais une diminution avec la chaux. Les résultats mettent en évidence que les mélanges avec 1% de fumée de silice et des pourcentages élevés de ciment ou de chaux sont les plus efficaces pour améliorer à la fois la compaction et la résistance du sol argileux. Ces conclusions soulignent l'importance de choisir judicieusement les matériaux d'amendement pour optimiser les performances géotechniques des sols.

# **Conclusion générale**

L'intégration de la fumée de silice, du ciment et de la chaux dans les applications géotechniques représente une avancée significative, pour améliorer les propriétés des sols argileux.

Le but de l'étude est, d'étudier l'effet combiné de la fumée de silice, du ciment et de la chaux sur le comportement mécanique d'une argile. L'ajout de ces matériaux, a été évalué à travers une série d'essais de compactage selon le Proctor normal et des essais de résistance à la compression simple.

Les résultats obtenus, révélant une modification notable au niveau de la densité sèche maximale et de la résistance mécanique en fonction des pourcentages d'incorporation. Cette étude non seulement optimise les performances géotechniques des sols, mais également promeut une utilisation durable et efficiente des ressources, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'ingénierie civile moderne.

Cette étude met en évidence l'efficacité de ces stabilisants pour renforcer la capacité portante et la stabilité du sol étudié, tout en répondant aux exigences environnementales et technologiques actuelles.

D'après les résultats obtenus, les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont :

- Les résultats des essais Proctor normal ont démontré que, l'incorporation de la fumée de silice, du ciment et de la chaux à différents dosages influe d'une manière significative, sur les propriétés mécaniques du sol argileux. La densité sèche du sol augmente progressivement avec l'augmentation des pourcentages de la fumée de silice, ce qui indique une amélioration du compactage et de la stabilité du sol étudié.
- Les essais de compression simple ont révélé des variations selon les combinaisons d'ajouts. Par exemple, l'ajout de 6% de fumée de silice montre une augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout du ciment, mais une diminution avec la chaux.
- Ces résultats mettent en évidence que les mélanges contenant 1% de fumée de silice avec des proportions élevées de ciment ou de chaux sont les plus efficaces pour améliorer à la fois la compaction et la résistance du sol argileux.

Cette étude souligne l'importance de choisir judicieusement les matériaux d'amendement pour mieux optimiser les performances géotechniques des sols.

# **Références Bibliographiques**

- [1] **Wakim, J. (2005)** : « Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses » thèse de doctorat. France.
- [2] **Dananaj, I., Frankovská, J., Janotka, I (2005)**. The influence of smectite content on microstructure and geotechnical properties of calcium and sodium bentonites. *Appl. Clay Sci.*, 28, pp. 223-232.
- [3] **Tucker, M. E. 2001**, *Sedimentary Petrology - An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks* 3ème éditions, Edition La Livrothèque, Marseille, France.
- [4] **Caillere, S, Henin, S, et Esteoule, J. (1963)**. Nouvelles études sur la synthèse des minéraux argileux à partir de gels. *Clay Minerals Bulletin*, 5, 272-278.
- [5] **Cuisinier, O. (2002)**. " Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés "Thèse de Docteur de l'I.N.P. L, France, soutenue le 31.10.2002. 172p.
- [6] **Cuisinier, O. Masrouri, F. (2003)**. " Comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté sous très forte succion "compte rendu mécanique 331, pp203-210.
- [7] **Hafsi, A. (1993)**. " Théorie de la double couche et gonflement des argiles non saturées ".Euromech colloquium N°209 : Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23-27. 1993.
- [8]. **Gueddouda, M. K. (2004)**. " Stabilisation des argiles gonflants par ajout du sable de dune, cas : région de Laghouat ". Mémoire de magistère. U.S.T. Oran, soutenue Juin 2004.136p.
- [9] **Behim, M**, Sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitier d'el Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire thèse. Université Badji mokhtar Annaba. 2005.
- [10] **Bengraa, L. (2004)**. " Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran «. Mémoire de magistère. U.S.T. Oran, soutenue le 21.06.2004, 102p.
- [11] **Mitchell J.K. (1993)**. *Fundamentals of soil behaviour*. 2<sup>ème</sup> ed., John Wiley and Sons, New York, 437p.
- [12] **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
- [13] **Amirouche, L, 2011**. "Etude du pouvoir de sorption du cuivre et du zinc et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes" Mémoire Magister de l'UMMTO.
- [14] **Fagel, N, (2005)**. " Cours Géologie des argiles ", Département Géologie, Université de Liège. Belgique.
- [15] **Warkentin, B. P. and Bozozuk, M. (1961)** Shrinking and swelling properties of two Canadian clays: *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mecanics and Foundation Engineering*, v. 1. pp. 851-855.

- [16] **Caillere. S, Henin. S, et Rautureau. M, 1982** - "Minéralogie des argiles", édition Masson tome 1 et 2. P 184 ; 1982a.
- [17] **Meunier. A, 2002**- "Argiles" édition scientifique GB ; 2002.
- [18] **Technique de l'ingénieur (1996)**. Construction C2. [C301 (1-20), C 208 (1-15)].
- [19] **Frederic, 2001** - "Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels" Thèse de Doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 2001.
- [20] **Jozja, N, 2003**- "Etude de matériaux argileux Albanais : Caractérisation multi-échelle d'une bentonite magnésienne, Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité", Thèse de Doctorat de l'université d'Orléans, 2003.
- [21] **Grim, E, 1962** - "Applied clay mineralogy" Mc Graw-Hill, New York, 422 p; 1962.
- [22] **Derroueche.F**, Décoloration par adsorption des eaux résiduaires textiles chargées en colorants acides par les bentonites locales, Diplôme de Magister, Université M'Hamed bougara- Boumerdes-Algérie, 2006/2007.
- [23] **Lerau, 2006** - "Cours de géotechnique", Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, avril 2006.
- [24] **Calvet.R.** « Le sol propriétés et fonctions ». Tome 1 constitution et structure, phénomène aux interfaces. Edition France agricole Dunod, PP 122-123, 2003.
- [25] **Costet, et Sanglerat, 1981**- "Cours pratiques de mécanique des sols", plasticité et calcul des tassements, 3ème Edition, Dunod, janvier 1981.
- [26] **Boudlal, O., & Melbouci, E. B. (2012)**. Étude macroscopique du comportement des multicouches (argile-marne) de la Grande Kabylie (Algérie): étude expérimentale à l'appareil triaxial. *European journal of environmental and civil engineering*, 16(6), 669-682.
- [27] **Babouri.R, (2008)** : stabilisation des sols argileux par la chaux cas des de koilinite de GHELMA » mémoire de magister université de MSILA, Algerie.
- [28] **Hamidi, B., Nikraz, H., & Varaksin, S. (2009)**. Une revue des techniques d'amélioration du sol orientées sur l'impact. *Australian Geomechanics*, 44(2), 17-24.
- [29] **Moseley, M. P., & Kirsch, K. (2004)**: Ground improvement. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [30] **J. Mecsi, A. Gökalp, R. Düzceer**, Compactage des remblais hydrauliques par la technique de vibroflotation, In: *Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Université de Pécs, Hungary, 2005.
- [31] **P.H.V. Truong**, Dynamic excess pore water pressures by dynamic soil masses and dynamic water heights. *Int. J. Geol.* 3(6) (2012) 77-83.
- [32] **Gökalp. A, Düzceer. R**, vibratory deep compaction of hydraulic fills. In: *Proceeding of The XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ISSMGE, Prague, Czech Republic, 2003.

- [33] **Andrus. R.D, Chung. R.M**, Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines. Report, NISTIR 5714, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1995.
- [34] **Bell, F.G., (1978)**. Méthodes de traitement des sols instables. Editions Eyrolles, France, 240p.
- [35] **Zoubir. W (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.
- [36] **Association Française de normalisation**. « Ciments et chaux », Paris, Afnor, 2003
- [37] **Ecole d'Avignon**. « Technique et pratique de la chaux », Paris, Eyrolles, 2003
- [38] **Houben.H, Guillaux. H**, « Traité de construction en terre », Parenthèses, Juin 1995.
- [39] **Bensalem.A**, Caractérisation et exploitation de l'argile de benazzouz dans la construction routière. Thèse pour l'obtention du Diplôme de Magister Option Géotechnique.université badjimokhtar-annaba. Année 2010.
- [40] **ASTM, C618. (2007)**. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [41] **Diamond, S., & Lopez-Flores, F. (1981, November)**. Comparative studies of the effects of lignitic and bituminous fly ashes in hydrated cement systems. In Material Research Society. In: Effects of Fly Ash Incorporation in Cement an Concrete: Proc. Sympos. N Annual Meeting. (Diamond, S.(Ed.)). Boston (pp. 112-123).
- [42] **Sezer, A., İnan, G., Yilmaz, H. R., & Ramyar, K. (2006)**. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. Building and environment, 41(2), 150-155.
- [43] **Buhler, R. L., & Cerato, A. B. (2007)**. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class C fly ash. In Problematic soils and rocks and in situ characterization (pp. 1-10).
- [44] **Kalkan. E, Akbulut. S, (2004)**, The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. Engineering Geology, V, 73. P, 145-156.
- [45] **Ngouallat, M. (2022)**, Etude des mécanismes internes liés à la stabilisation des sols fins argileux à l'aide de la mélasse de canne à sucre (Doctoral dissertation, Université Marien Ngouabi; Ecole Nationale Supérieure polytechnique).
- [46] **Sachin N. Bhavsar Hiral B. Joshi Priyanka K. Shrof Patel Ankit J (2014)**. Impact of Marble Powder on Engineering Properties of Black Cotton Soil. International Journal for Scientific Research & Development. V 2.
- [47] **Jair J.A. Baldovino, Ronaldo L.S. Izzo, Juliana L. Rose, Matheus D.I. Domingos (2021)**. Strength, durability, and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization. Construction and Building Materials. V 271.

- [48] **Rebouh (2012)**. Impact de la pollution de l'air provoquée par la cimenterie tahar djouad sur la sante publique et le cadre bati -cas de hamma bouziane imprégné de margines. E. L. C. En vue de l'obtention du diplôme de magister en architecture et urbanisme.
- [49] **Jegandan, S., Liska, M., Osman, A. A., & Al-Tabbaa, A. (2010)**. Sustainable binders for soil stabilisation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 163(1), 53-61.
- [50] **Hossain, K. M. A., & Mol, L. (2011)**. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. Construction and Building Materials, 25(8), 3495-3501.
- [51] **Yi, Y., Li, C., & Liu, S. (2015)**. Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay. Journal of materials in civil engineering, 27(4), 04014146.
- [52] **Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., & Chinkulkijniwat, A. (2012)**. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash. Journal of materials in civil engineering, 24(2), 184-193.
- [53] **Samar, M. (1998)**. Élaboration d'un ciment sans clinker à base de co-produits industriels (Doctoral dissertation).
- [54] **Amante. E, Benelli. P, et Oliveira. D, 2013**, "A literature review on adding value to solid residues: egg shells", Journal on Cleaner Production Volume 46 May 2013.
- [55] **Li. B, Wei, et Xu. C, 2009**, «Application of wast eggshell as low-coast for biodiesel production", Bioresource Technology Volume 100, Issue 11, June 2009.
- [56] **Amu. O, Fajobi. A, et Oke. A, 2005**, "Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil", journal of an applied sciences ISSN 1812-5654.
- [57] **Bensaifi. E. (2020)**, Etude du comportement des marnes et des matériaux argileux gonflants : traitement et réutilisation dans les projets routiers. Thèse pour l'obtention du Diplôme de doctorat, Option : Mécanique des chaussées, Matériaux et Géotechnique Routière (MCMGR) Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [NF P94-050] Norme française, Teneur en eau à l'état naturel.
- [NF P 94-056] Norme française, Analyse granulométrique par tamisage.
- [NF P94-057] Norme française, Analyse granulométrique par sédimentométrie.
- [NF P 94-051] Norme française, détermination des limites d'Atterberg.
- [NF P 94- 054] Norme française, détermination de la masse volumique des particules solides des sols
- [NF P 94-068] Norme française, Valeur au bleu de méthylène.
- [NF P 94-093] Norme française, paramètres optimaux de compactage (Proctor).
- [NF P 94-077] Norme française, Compression Simple (Uniaxial)