

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 poudre de
coquilles d'œufs – ciment – chaux sur le
comportement mécanique d'une argile**

Présenté par : M^r CHIKH Fatah

Jury de soutenance :

M ^r BOUDLAL O.	Président	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M ^{me} MEZIANI F.	Promotrice	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M ^{me} AIT BACHIR .	Examinatrice	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M ^r TERBOUCHE F.	Invité	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Madame MEZIANI Faroudja, Maître de conférences à l'UMMTO, pour son encadrement de haute qualité, sa patience inébranlable, sa disponibilité absolue, ainsi que pour ses qualités humaines remarquables. Je suis très reconnaissant envers elle pour la confiance et le soutien qu'elle m'a apportés dès le début de cette tâche.

Monsieur BOUDDLAL Omar, Maître de conférences à l'UMMTO, mérite d'être remercié pour l'honneur qu'il m'a accordé 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 ma sincère gratitude envers Monsieur KAHIL Amar, professeur à l'UMMTO, pour son précieux soutien et les ressources qu'il nous a fournies, qui ont grandement contribué à la réalisation de cette tâche. Sa générosité et ses qualités humaines ont été des atouts précieux tout au long de cette expérience, et cela a été hautement valorisé.

Mes sincères remerciements à Madame BOUAZZOUNI Fatima et Monsieur KHELIFA Sid Ali, responsables du laboratoire de mécanique des sols de l'UMMTO, pour leur soutien constant et leur disponibilité précieuse tout au long de cette tâche. Je tiens également à remercier M. TERBOUCHE Farid qui nous a facilité l'accès au site de prélèvement du sol.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers ma famille, mes amis et toutes les personnes qui ont apporté leur contribution, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, ma
famille et à tous mes amis.

Résumé : Une large variété des méthodes d'amélioration et de stabilisation des mauvais sols est actuellement utilisée et les techniques les plus appropriées sont d'habitude classées comme les méthodes mécaniques, hydromécaniques thermiques et chimiques. Notre recherche vise à étudier l'effet combiné de l'incorporation des trois matériaux (coquilles d'œufs, ciment et chaux) sur le comportement mécanique d'une argile. Des essais d'identification et des tests mécaniques ont été effectués sur les échantillons traités, tels que des essais de compactage avec le Proctor normal et les essais de résistance à la compression simple. Selon les résultats obtenus, l'ajout de coquilles d'œufs, de ciment et de chaux améliore considérablement la capacité portante et la compacité des sols 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. En plus d'améliorer les performances géotechniques des sols, cette étude favorise également une utilisation optimale des stabilisants, ce qui répond aux exigences environnementales et technologiques actuelles du génie civil.

Mots clés : Argile, coquilles d'œufs, ciment, chaux, stabilisants, compactage, Proctor, résistance à la compression.

Abstract: A wide variety of methods for improving and stabilizing poor soils are currently in use, and the most appropriate techniques are usually classified as mechanical, hydromechanical-thermal and chemical. Our research aims to investigate the combined effect of incorporating the three materials (eggshells, cement and lime) on the mechanical behavior of a clay. Identification and mechanical tests were carried out on treated samples, such as compaction tests with the normal Proctor and simple compressive strength tests. According to the results obtained, the addition of eggshells, cement and lime considerably improves the bearing capacity and compactness of soils 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 added. In addition to improving the geotechnical performance of soils, this study also promotes optimal use of stabilizers, thus meeting current environmental and technological requirements in civil engineering.

Keywords: Clay, eggshells, cement, lime, stabilizers, compaction, Proctor, compression strength.

Liste des figures

Chapitre I: Généralités sur les argiles

Figure I.1.	Les constituants généraux de l'argile	- 3 -
Figure I.2.	Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile	- 5 -
Figure I.3.	Représentation schématique de la structure de kaolinite	- 6 -
Figure I.4.	Structure atomique de l'illite	- 6 -
Figure I.5.	Vue microscopique d'un chlorite	- 7 -
Figure I.6.	Répulsion électrostatique entre les particules d'argile chargées négativement, due à une distribution de charge similaire.	- 9 -
Figure I.7.	Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation	- 12 -
Figure I.8.	Représentation du phénomène du retrait gonflement	- 15 -
Figure I.9.	Représentation du phénomène de glissement de terrain	- 16 -
Figure I.10.	Tassement uniforme	- 16 -

Chapitre II: Techniques d'amélioration des sols fins

Figure II.1.	Compactage dynamique.	- 21 -
Figure II.2.	Vibrocompactage.	- 21 -
Figure II.3.	Préchargement des sols.	- 22 -
Figure II.4.	Installation de drains verticaux.	- 23 -
Figure II.5.	Congélation des sols.	- 24 -
Figure II.6.	Le cycle de la chaux	- 27 -
Figure II.7.	Transformation du calcaire en chaux vive	- 27 -
Figure II.8.	Chaux vive	- 28 -
Figure II.9.	Chaux éteinte	- 28 -
Figure II.10.	Lait de chaux	- 29 -
Figure II.11.	Cendre Volante	- 29 -
Figure II.12.	Fumée de silice	- 30 -
Figure II.13.	Coquille d'œuf	- 31 -
Figure II.14.	Poussière de four à ciment	- 31 -
Figure II.15.	Poussière de four à chaux	- 31 -
Figure II.16.	Roche métamorphique de marbre (à gauche) poudre de marbre (à droite)	- 32 -
Figure II.17.	Déchets de verre	- 32 -
Figure II.18.	Poudre de verre	- 33 -
Figure II.19.	Liants pour le traitement des sols argileux.	- 33 -
Figure II.20.	Épandeurs pour traitement des sols argileux.	- 38 -
Figure II.21.	Malaxeurs pour traitement des sols argileux.	- 38 -
Figure II.22.	Rouleaux compacteurs pour traitement des sols argileux.	- 38 -

Chapitre III : Essais d'identification

Figure III.1.	Localisation de la zone d'extraction du sol utilisé	- 41 -
Figure III.2.	Extraction du sol à l'aide d'une pelle mécanique.	- 42 -
Figure III.3.	Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentation.	- 43 -
Figure III.4.	Courbe granulométrique de l'argile.	- 44 -
Figure III.5.	Matériel nécessaire pour la détermination de la masse volumique des particules solides du sol.	- 44 -

Figure III.6.	Détermination de la limite de liquidité (Wl)	- 46 -
Figure III.7.	Limite de liquidité du sol.	- 47 -
Figure III.8.	Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.	- 47 -
Figure III.9.	Abaque de plasticité de Casagrande.	- 48 -
Figure III.10.	Appareillage pour essai bleu de méthylène.	- 50 -
Figure III.11.	Observations de taches de l'essai VBS.	- 51 -
Figure III.12.	Préparation des coquilles d'œufs	- 52 -
Figure III.13.	Poudre des coquilles d'œufs.	- 52 -
Figure III.14.	Ciment utilisé.	- 53 -
Figure III.15.	Chaux utilisée.	- 53 -

Chapitre IV: Essais de compactage

Figure IV.1.	Principe de l'essai Proctor	- 55 -
Figure IV.2.	Courbe Proctor (sans ajout).	- 56 -
Figure IV.3.	Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs.	- 56 -
Figure IV.4.	Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs.	- 57 -
Figure IV.5.	Courbe Proctor à l'état naturel et avec ajout de 2% et 5% de coquilles d'œufs.	- 58 -
Figure IV.6.	Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment.	- 59 -
Figure IV.7.	Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment.	- 60 -
Figure IV.8.	Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4%, et 6% de chaux.	- 61 -
Figure IV.9.	Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de chaux.	- 62 -

Chapitre V: Essais de compression simple

Figure V.1.	Courbe de résistance à la compression (Rc) à l'état naturel (sans ajout).	- 65 -
Figure V.2.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs.	- 65 -
Figure V.3.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs.	- 66 -
Figure V.4.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 2% de ciment	- 67 -
Figure V.5.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 4% de ciment	- 67 -
Figure V.6.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 6% de ciment	- 67 -
Figure V.7.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.	- 68 -
Figure V.8.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 2% de ciment	- 69 -
Figure V.9.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 4% de ciment	- 69 -
Figure V.10.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 6% de ciment	- 69 -
Figure V.11.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.	- 70 -
Figure V.12.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 2% de chaux	- 70 -
Figure V.13.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 4% de chaux	- 71 -
Figure V.14.	Courbe de résistance à la compression (Rc) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 6% de chaux	- 71 -

Figure V.15.	Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.	- 72 -
Figure V.16.	Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 2% de chaux	- 72 -
Figure V.17.	Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 4% de chaux	- 73 -
Figure V.18.	Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 6% de chaux	- 73 -
Figure V.19.	Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.	- 74 -

Liste des tableaux

Chapitre I:Généralités sur les argiles

Tableau I.1. Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux	-8-
Tableau I.2. Caractéristiques physiques générales des argiles.	-11-

Chapitre III : Essais d'identification

Tableau III.1. Les résultats de la teneur en eau.	- 43 -
Tableau III.2. Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique des particules solides.	- 45 -
Tableau III.3. Résultats de limite de liquidité.	- 46 -
Tableau III.4. Résultats de la limite de plasticité.	- 48 -
Tableau III.5. Types des sols en fonction de l'indice de plasticité Ip.	- 49 -
Tableau III.6. Nature du sol en fonction de l'indice de plasticité Ip.	- 49 -
Tableau III.7. Etat du sol en fonction de l'indice de consistance.	- 49 -
Tableau III.8. Classement de la valeur du VBS.	- 51 -

Sommaire

Remerciements**Dédicaces****Résumé****Notation et nomenclature****Liste des figures****Liste des tables****Introduction générale**

-1-

Chapitre I: Généralités sur les argiles

I.1. Introduction

- 3 -

I.2. Définition

- 3 -

I.3. Origine des minéraux argileux

- 3 -

I.4. Structure des sols argileux et liaisons structurales

- 4 -

I.5. Classification des argiles

- 5 -

I.5.1. Minéraux de type 1 :1 (ou T-O)

- 5 -

I.5.2. Minéraux de type 2 :1 (ou T-O-T)

- 6 -

I.5.3. Minéraux de type 2:1:1 (ou T-O-T-O)

- 6 -

I.5.4. Minéraux interstratifiés

- 7 -

I.6. Propriétés des argiles

- 7 -

I.6.1. Plasticité

- 7 -

I.6.2. Surface spécifique

- 7 -

I.6.3. Capacité d'échange cationique (C.E.C.)

- 7 -

I.6.4. Propriétés colloïdales

- 8 -

I.6.5. Propriétés de gonflement

- 8 -

I.6.6. Absorption et adsorption

- 8 -

I.6.7. Rétention des métaux par les argiles

- 8 -

I.6.8. Théorie d'échange d'ions

- 9 -

I.6.9. Échanges d'eau

- 9 -

I.7. Forces entre les minéraux d'argile

- 9 -

I.7.3. Force d'hydratation (attractive-répulsive)

- 10 -

I.8. Les caractéristiques physiques des argiles

- 11 -

I.9. Les caractéristiques mécaniques des argiles

- 12 -

I.10. Le gonflement des argiles

- 12 -

I.11. Les principales causes du gonflement des argiles

- 13 -

I.11.1. Hydratation par adsorption

- 13 -

I.11.1.1. Les forces d'attraction

- 14 -

I.11.1.2. Les forces de répulsion

- 14 -

I.11.2. Hydratation par osmose

- 14 -

I.11.3. Hydratation par capillarité

- 15 -

I.11.4. Transformations chimiques

- 15 -

I.12. Les principaux problèmes des sols argileux

- 15 -

I.12.1. Le phénomène de retrait-gonflement

- 15 -

I.12.2. Le phénomène de glissement

- 16 -

I.12.3. Le phénomène de tassement

- 16 -

I.12.4. Érosion des sols argileux

- 17 -

I.13. Les conséquences dues aux problèmes des sols argileux	- 18 -
I.13.1. Cas des bâtiments	- 18 -
I.13.2. Cas des chaussées	- 18 -
I.13.3. Cas des ouvrages souterrains	- 18 -
I.14. Conclusion	- 19 -

Chapitre II: Techniques d'amélioration des sols fins

II.1. Introduction	- 20 -
II.2. Les techniques d'amélioration des sols	- 20 -
II.2.1. Les méthodes mécaniques	- 20 -
II.2.1.1. Le compactage dynamique	- 21 -
II.2.1.2. Le vibrocompactage	- 21 -
II.2.2. Les méthodes hydromécaniques	- 22 -
II.2.2.1. Le préchargement ou précompression	- 22 -
II.2.2.2. L'accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux	- 22 -
II.2.3. Les méthodes thermiques	- 23 -
II.2.3.1. La déshydratation	- 23 -
II.2.3.2. La congélation	- 23 -
II.2.4. Les méthodes chimiques	- 24 -
A- Exemples de méthodes chimiques :	- 24 -
B- Avantages des méthodes chimiques :	- 24 -
C- Inconvénients des méthodes chimiques :	- 24 -
II.3. Le choix de la technique de traitement des argiles	- 25 -
II.4. Le principe de choix d'une solution de traitement	- 25 -
II.5. Les produits de traitement	- 26 -
II.5.1. Produits conventionnels	- 26 -
II.5.1.1. Ciment	- 26 -
II.5.1.2. Chaux	- 26 -
II.5.1.3. Cendre volante	- 29 -
II.5.1.4. Fumée de silice	- 29 -
II.5.2. Produits non conventionnels	- 30 -
II.5.2.1. Coquille d'œuf calcinée	- 30 -
II.5.2.2. Poussière de four à ciment	- 31 -
II.5.2.3. Poussière de four à chaux	- 31 -
II.5.2.4. Poudre de marbre	- 31 -
II.5.2.5. Poudre de verre	- 32 -
II.6. Action des liants	- 33 -
II.7. Techniques de réalisation	- 34 -
II.7.1. Technique courante : le mélange en place	- 34 -
II.7.1.1. Avantages du mélange en place	- 34 -
II.7.1.2. Inconvénients du mélange en place	- 34 -
II.7.2. Mélange par la technique dite du dépôt reprise	- 34 -
II.7.2.1. Avantages du dépôt reprise	- 34 -

II.7.2.2. Inconvénients du dépôt reprise	- 34 -
II.7.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai	- 34 -
II.7.3.1. Traitement dans le déblai	- 35 -
II.7.3.1.1. Avantages	- 35 -
II.7.3.1.2. Inconvénients	- 35 -
II.7.3.2. Traitement sur le remblai	- 35 -
II.7.3.2.1. Avantages	- 35 -
II.7.3.2.2. Inconvénients	- 35 -
II.8. Les étapes de traitement des sols	- 35 -
II.8.1. Identification du sol	- 35 -
II.8.2. Études de la formulation	- 35 -
II.8.3. La mise en œuvre du sol traité	- 36 -
II.8.4. Contrôle de qualité des travaux	- 36 -
II.9. La méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol	- 36 -
II.9.1. La préparation du sol à traiter	- 36 -
II.9.2. L'épandage	- 37 -
II.9.3. Le malaxage	- 37 -
II.9.4. Le réglage	- 37 -
II.9.5. Le compactage	- 37 -
II.9.6. La protection de surface	- 37 -
II.10. Matériels de traitement	- 37 -
II.10.1. Critères de sélection du matériel :	- 39 -
II.11. Les problèmes à rencontrer lors des opérations de traitement des sols	- 39 -
II.11.1. Le froid et le gel	- 39 -
II.11.2. La présence d'éléments néfastes à la prise hydraulique	- 39 -
II.11.2.1. Les sulfates	- 39 -
II.11.2.2. Les matières organiques	- 39 -
II.11.3. Le problème du climat par rapport à la cinétique de durcissement	- 39 -
II.11.4. Les émissions de poussière	- 40 -
II.12. Conclusion	- 40 -
Chapitre III : Essais d'identification	
III.1. Introduction	- 41 -
III.2. Matériaux utilisés	- 41 -
III.2.1. Sol utilisé	- 41 -
III.2.1.1. Prélèvement des échantillons	- 42 -
III.2.1.2. La teneur en eau [NF P94-050]	- 42 -
III.2.1.3. Analyse granulométrique [NF P 94-056]	- 43 -
III.2.1.4. Détermination de la masse volumique des particules solides [NF P 94- 054]	- 44 -
III.2.1.5. Les limites d'Atterberg [NF P 94-051]	- 45 -
A- La limite de liquidité	- 45 -
B- La limite de plasticité	- 47 -

III.2.1.6. Essai au bleu de Méthylène (VBS) [NF P 94-068]	- 50 -
III.2.2. La coquille d'œuf	- 51 -
III.2.3. Ciment utilisé	- 52 -
III.2.4. Chaux utilisée	- 53 -
III.3. Conclusion	- 53 -

Chapitre IV: Essais de compactage

IV. 1. Introduction	- 54 -
IV.2. Essais Proctor normal	- 54 -
IV.3. Résultats et interprétations	- 55 -
IV.3.1. Essai Proctor a l'état naturel	- 55 -
IV.3.2. Essai Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs	- 56 -
IV.3.2. Essai Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs	- 57 -
IV.3.3. Comparaison des résultats	- 58 -
IV.3.4. Essais Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de ciment)	- 58 -
IV.3.5. Essais Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de ciment)	- 59 -
IV.3.6. Essais Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de chaux)	- 60 -
IV.3.7. Essais Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de chaux)	- 61 -
IV.4. Conclusion	- 62 -

Chapitre V:Essais de compression simple

V.1. Introduction	- 64 -
V.2. Principe de l'essai de compression simple (NF P 94-071-1)	- 64 -
V.3. Résultats des essais de compression simple	- 65 -
V.3.1. Essai de compression simple à l'état naturel (sans ajout)	- 65 -
V.3.2. Essai de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs	- 65 -
V.3.3. Essai de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs	- 66 -
V.3.4. Interprétation des résultats	- 66 -
V.3.5. Essais de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment	- 66 -
V.3.6. Essais de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment	- 68 -
V.3.7. Essais de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux	- 70 -
V.3.8. Essais de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux	- 72 -
V.5. Conclusion	- 74 -
Conclusion générale	-75-
Références bibliographiques	-76-

Introduction

Générale

En génie civil, le sol désigne un matériau composé de particules minérales naturelles dont les dimensions se situent dans des limites prédéfinies. Parmi ces particules, l'argile joue un rôle crucial. Utilisée depuis des millénaires pour la poterie et la construction, l'argile est une matière première polyvalente qui continue d'être essentielle dans divers secteurs de la vie quotidienne. Son exploitation s'étend aujourd'hui jusqu'aux domaines avancés des travaux publics et du bâtiment, où ses propriétés uniques sont exploitées pour des applications variées, de la conception de fondations solides à la réalisation de revêtements protecteurs. La diversité des caractéristiques géotechniques de l'argile en fait un sujet d'étude incontournable dans le domaine du génie civil, où sa plasticité et ses réactions aux variations environnementales exigent des approches de stabilisation et de traitement spécifiques pour assurer la durabilité et la fiabilité des structures construites.

Le comportement des sols argileux représente un défi majeur pour les ingénieurs lors de la conception et de la construction d'infrastructures civiles. Ce matériau est caractérisé par sa capacité à changer de manière significative en fonction de son humidité. À des niveaux d'eau spécifiques, l'argile devient malléable et plastique, ce qui influence sa capacité à supporter des charges et à maintenir sa forme sous contrainte. Ces variations de consistance sont souvent accompagnées de changements volumétriques notables, tels qu'un gonflement important lorsque l'humidité augmente ou un retrait significatif en périodes de faibles précipitations. Ces phénomènes sont directement influencés par la structure minéralogique unique de chaque type d'argile, ce qui nécessite une compréhension approfondie pour anticiper et gérer efficacement ces comportements dans les projets d'ingénierie.

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.

Le but de l'étude réalisée est, l'étude de l'effet combiné de l'ajout de coquilles d'œufs, de ciment et de chaux sur le comportement mécanique d'une argile.

Le mémoire est divisé en deux parties. La première partie, est étude bibliographique sur 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 solidité 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 d'amélioration des sols fins » présente une synthèse bibliographique sur l'amélioration et les divers matériaux 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 matériaux étudiés ainsi que les essais d'identification réalisés.
- **Le quatrième chapitre** « Essais de compactage » présente les méthodologies employées pour réaliser les essais Proctor normal, 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, ou on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur les argiles

I.1. Introduction

Les argiles, en raison de leurs propriétés géotechniques sont considérées comme des sols instables, créant donc un handicap économique et technique pour les différentes parties impliquées dans ce domaine, se gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas, par conséquent, les performances nécessaires pour supporter des charges. Ce chapitre consiste en une recherche bibliographique sur les sols argileux, les types de minéraux argileux, les principaux problèmes et les désordres liés.

I.2. Définition

Les argiles sont des roches sédimentaires fines constituées de minuscules particules de minéraux argileux, généralement de taille inférieure à 2 micromètres. Elles sont omniprésentes à la surface de la terre et jouent un rôle important dans de nombreux processus environnementaux, notamment la rétention d'eau, le cycle des nutriments et la pollution des sols [1].

Le terme "argile" désigne généralement l'ensemble des particules fines présentes dans le sol. En termes de taille de grain, le mot argile a deux sens. Il désigne d'abord les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 μm . Au sens agronomique du terme, une argile est la fraction minérale d'un sol dont les particules ont des dimensions inférieures à 2 μm [2].

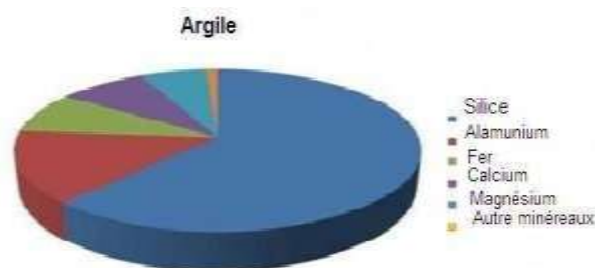


Figure I.1. Les constituants généraux de l'argile

I.3. Origine des minéraux argileux

Les minéraux argileux se forment par altération physique et chimique des roches et minéraux primaires. Les principaux processus d'altération à l'origine des minéraux argileux sont :

- l'altération hydrologique : L'eau, en présence d'oxygène et de dioxyde de carbone, dissout et altère les roches et minéraux primaires, libérant des ions en solution. Ces ions peuvent ensuite se recombinaer pour former de nouveaux minéraux, dont les minéraux argileux ;
- l'altération par les acides organiques : Les acides organiques produits par la décomposition de la matière organique peuvent également dissoudre et altérer les roches et minéraux primaires, contribuant à la formation de minéraux argileux ;
- l'altération par les gels ferrugineux : Les gels ferrugineux, formés à partir de l'oxydation du fer, peuvent adsorber et précipiter des ions en solution, contribuant également à la formation de minéraux argileux [3].

I.4. Structure des sols argileux et liaisons structurelles

Les minéraux argileux ont une structure en feuillets, composée de couches tétraédriques et octaédriques. Les couches tétraédriques sont formées d'atomes de silicium (Si) entourés de quatre atomes d'oxygène (O). Les couches octaédriques sont formées d'atomes d'aluminium (Al) ou de magnésium (Mg) entourés de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle (OH) [4].

Les feuillets sont maintenus ensemble par des liaisons ioniques et des forces de Van der Waals. Les liaisons ioniques se forment entre les cations présents dans les couches octaédriques et les anions présents dans les couches tétraédriques. Les forces de Van der Waals sont des forces d'attraction intermoléculaires faibles qui existent entre les dipôles permanents ou induits des atomes et des molécules.

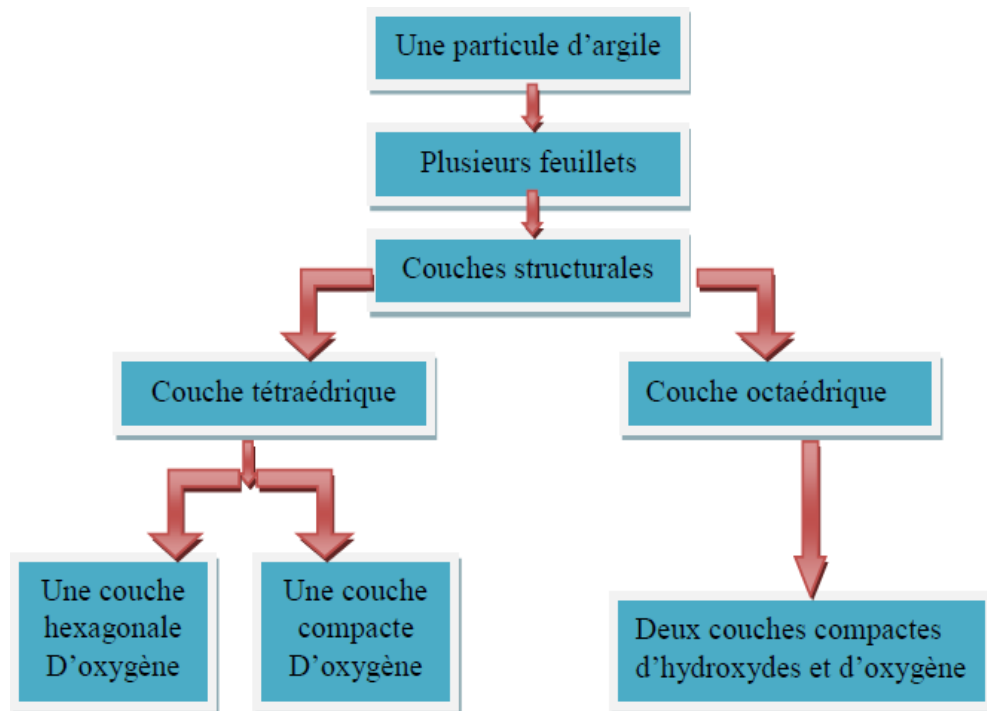


Figure I.2. Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile

La structure en feuillets des minéraux argileux confère aux sols argileux de nombreuses propriétés importantes, notamment [5] :

- la plasticité : Les sols argileux sont plastiques, ce qui signifie qu'ils peuvent être moulés dans différentes formes lorsqu'ils sont humides. Cela est dû à la capacité des feuillets argileux de glisser les uns sur les autres ;
- la rétention d'eau : Les sols argileux ont une grande capacité de rétention d'eau, car les feuillets argileux peuvent adsorber des molécules d'eau entre leurs couches ;
- le gonflement : Les sols argileux peuvent gonfler et se contracter en fonction de la teneur en eau. Lorsque les sols argileux sont humides, les feuillets argileux absorbent de l'eau et se gonflent. Lorsque les sols argileux sèchent, les feuillets argileux perdent de l'eau et se contractent.

I.5. Classification des argiles

Les minéraux argileux peuvent être classés en fonction de leur structure cristalline en trois groupes principaux :

I.5.1. Minéraux de type 1 :1 (ou T-O)

Les minéraux de type 1 :1 sont constitués d'une seule couche tétraédrique liée à une seule couche octaédrique. Ils ont une structure cristalline simple et sont généralement les moins

réactifs chimiquement des minéraux argileux. La kaolinite est un exemple de minéral de type 1 :1 [6].

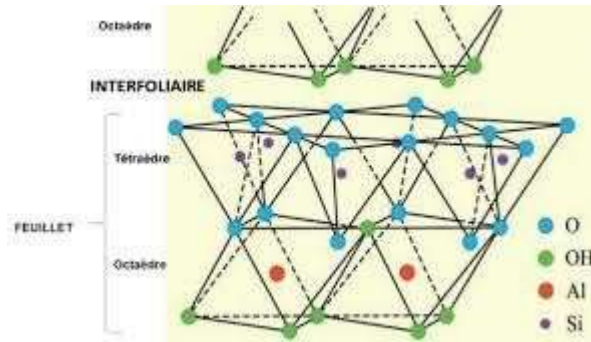


Figure I.3. Représentation schématique de la structure de kaolinite

I.5.2. Minéraux de type 2 :1 (ou T-O-T)

Les minéraux de type 2 :1 sont les plus communs et les plus importants des minéraux argileux. Ils sont constitués de deux couches tétraédriques prises en sandwich entre une couche octaédrique. Cette structure en sandwich confère aux minéraux de type 2 :1 une plus grande surface et une plus grande charge que les minéraux de type 1 :1. Cela les rend plus réactifs chimiquement et leur permet d'adsorber une plus grande quantité d'eau et d'autres molécules. La smectite et l'illite sont des exemples de minéraux de type 2 :1 [6].

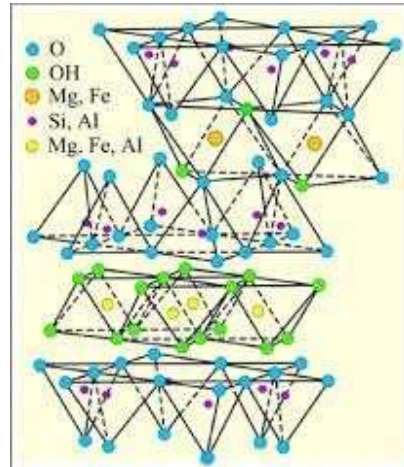


Figure I.4. Structure atomique de l'illite

I.5.3. Minéraux de type 2:1:1 (ou T-O-T-O)

Les minéraux de type 2:1:1 sont similaires aux minéraux de type 2 :1, mais ils comportent une couche supplémentaire d'hydroxydes octaédriques entre les deux couches tétraédriques et la couche octaédrique centrale. La vermiculite et la chlorite sont des exemples de minéraux de type 2:1:1 [6].

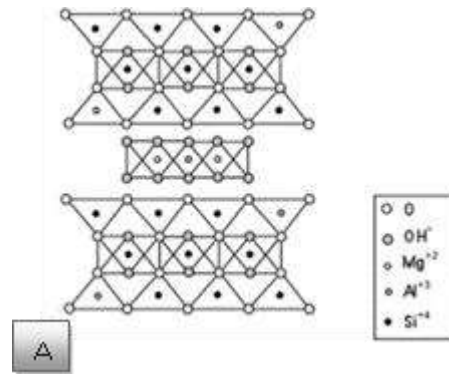


Figure I.5. Vue microscopique d'un chlorite

I.5.4. Minéraux interstratifiés

Les minéraux interstratifiés sont constitués de couches de différents types de minéraux argileux empilées les unes sur les autres. Ils peuvent présenter des propriétés variables en fonction de la composition et de l'arrangement des couches [6].

I.6. Propriétés des argiles

Les argiles possèdent une multitude de propriétés qui les rendent uniques et précieuses dans divers domaines. Ces propriétés découlent de leur structure en feuillets et de leur composition chimique [7].

I.6.1. Plasticité

La plasticité est la capacité des argiles à être moulées dans différentes formes lorsqu'elles sont humides. Cette propriété est due à la capacité des feuillets d'argile de glisser les uns sur les autres lorsque l'argile est suffisamment hydratée. La plasticité des argiles est variable en fonction de leur type et de leur composition [8].

I.6.2. Surface spécifique

Les argiles ont une surface spécifique extrêmement élevée, c'est-à-dire une grande surface par unité de masse. Cela s'explique par la structure en feuillets des argiles, qui offre une grande surface accessible aux molécules et aux ions. Cette propriété confère aux argiles une grande capacité d'adsorption, c'est-à-dire la capacité de fixer des molécules à leur surface [9].

I.6.3. Capacité d'échange cationique (C.E.C.)

La capacité d'échange cationique (C.E.C.) est la capacité des argiles à adsorber et à échanger des cations (ions chargés positivement). Cette propriété est due aux charges négatives présentes sur la surface des feuillets d'argile. La C.E.C. des argiles est variable en fonction de leur type et de leur composition. Les argiles smectiques ont généralement une C.E.C. plus élevée que les argiles kaolinitiques [10].

Tableau I.1. Surface spécifique et C.E.C de quelques minéraux argileux

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C (milliéquivalent/100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	10-40
Smectites	600-700	80	700-800	80-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

I.6.4. Propriétés colloïdales

Les argiles se comportent comme des colloïdes lorsqu'elles sont dispersées dans l'eau. Cela signifie que les particules d'argile ont une taille suffisamment petite pour rester en suspension dans l'eau pendant de longues périodes. Les propriétés colloïdales des argiles sont dues à leur surface spécifique élevée et à leurs charges négatives.

I.6.5. Propriétés de gonflement

Les argiles ont la capacité de gonfler lorsqu'elles sont mises en contact avec l'eau. Ce phénomène est dû à l'hydratation des cations échangeables présents sur la surface des feuillets d'argile. Le gonflement des argiles peut avoir des conséquences importantes sur la structure du sol, notamment en termes de perméabilité et de porosité.

I.6.6. Absorption et adsorption

Les argiles peuvent absorber et adsorber une grande variété de molécules et d'ions. L'absorption est un processus physique dans lequel les molécules pénètrent dans la structure poreuse de l'argile. L'adsorption est un processus chimique dans lequel les molécules et les ions se fixent à la surface des feuillets d'argile par des forces électrostatiques ou des liaisons chimiques [9].

I.6.7. Rétention des métaux par les argiles

Les argiles ont une grande capacité à retenir les ions métalliques, ce qui peut avoir des implications importantes pour la pollution des sols et la disponibilité des nutriments pour les plantes. La rétention des métaux par les argiles dépend de plusieurs facteurs, notamment du type d'argile, du pH du sol et de la nature du métal [9].

I.6.8. Théorie d'échange d'ions

La théorie d'échange d'ions explique le mécanisme par lequel les argiles adsorbent et échangent des cations. Selon cette théorie, les cations échangeables présents sur la surface des feuillets

d'argile sont en équilibre dynamique avec les cations présents dans la solution environnante. Cet échange d'ions joue un rôle important dans la fertilité du sol et dans la qualité de l'eau.

I.6.9. Échanges d'eau

Les argiles peuvent échanger de l'eau avec leur environnement. Ce phénomène est dû à l'hydratation des cations échangeables présents sur la surface des feuillets d'argile. Les échanges d'eau entre les argiles et le sol ont un impact important sur la structure du sol et sur la disponibilité de l'eau pour les plantes [10].

I.7. Forces entre les minéraux d'argile

Les forces entre les feuillets d'argile déterminent la structure et les propriétés des sols argileux. Trois types de forces principales interviennent [11] :

- Forces de répulsion : Ces forces sont dues aux charges négatives présentes sur la surface des feuillets d'argile. Elles tendent à repousser les feuillets d'argile les uns des autres [11].

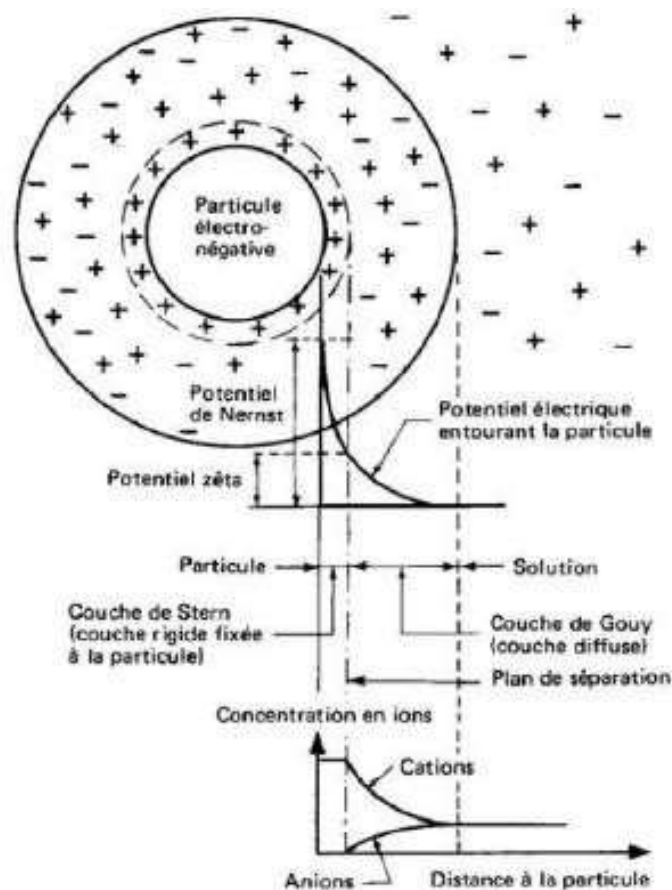


Figure I.6. Répulsion électrostatique entre les particules d'argile chargées négativement, due à une distribution de charge similaire.

- Forces d'attraction : Ces forces proviennent de l'attraction électrostatique entre les charges négatives des feuillets d'argile et les cations échangeables adsorbés à leur surface, ainsi que des forces de Van der Waals qui existent entre les feuillets. Les forces d'attraction tendent à rapprocher les feuillets d'argile les uns des autres [11].
- Force d'hydratation (attractive-répulsive) : La présence d'eau autour des feuillets d'argile crée une force d'hydratation. Cette force est à la fois attractive et répulsive. L'attraction est due à la formation de liaisons hydrogène entre l'eau et les cations échangeables. La répulsion est due à l'encombrement des molécules d'eau autour des feuillets d'argile. L'équilibre entre ces forces d'attraction et de répulsion détermine l'espacement des feuillets d'argile et influence la stabilité des argiles en suspension.

I.7.3. Force d'hydratation (attractive-répulsive)

L'équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion détermine l'espacement des feuillets d'argile et influence la stabilité des argiles en suspension [12].

Plusieurs facteurs peuvent affecter cet équilibre :

- la nature des cations échangeables : Les cations divalents (comme le calcium) ont tendance à rapprocher les feuillets d'argile que les cations monovalents (comme le sodium). Cela s'explique par le fait que les cations divalents ont une charge plus élevée et peuvent donc se lier à plusieurs sites d'échange sur les feuillets d'argile ;
- la concentration en électrolytes : La présence d'électrolytes (sels) dans la solution augmente la force d'attraction entre les feuillets d'argile, ce qui peut les rapprocher ;
- le pH : Le pH de la solution peut également affecter la force d'hydratation. À pH bas, les charges négatives des feuillets d'argile sont plus importantes, ce qui augmente la force de répulsion entre les feuillets. À pH élevé, les charges négatives des feuillets d'argile sont partiellement neutralisées par les ions OH^- , ce qui diminue la force de répulsion et permet aux feuillets de se rapprocher.

I.8. Les caractéristiques physiques des argiles

Les argiles présentent plusieurs caractéristiques physiques importantes [13] :

- Densité : La densité des argiles varie généralement entre 2,5 et 2,8 g/cm³.
- Couleur : La couleur des argiles dépend de la composition minéralogique et de la présence d'impuretés. Les argiles smectitiques sont généralement grises ou brunes, tandis que les argiles kaolinitiques sont souvent blanches ou jaunâtres.

- Granulométrie : Les particules d'argile ont une taille inférieure à 2 micromètres.
- Porosité : Les argiles ont une porosité élevée, c'est-à-dire qu'elles contiennent une grande quantité de vides. Cette porosité est due à la structure en feuillets des argiles.
- Perméabilité : La perméabilité des argiles est faible, c'est-à-dire qu'elles sont peu perméables à l'eau. Cela s'explique par la petite taille des pores et par la charge négative des feuillets d'argile, qui repousse les molécules d'eau.

Tableau I.2. Caractéristiques physiques générales des argiles.

Caractéristiques physiques	Notation	Valeur moyenne	Unité
Poids volumique humide	γ ou γ_h	16 à 22	KN/m ³
Poids volumique sec	γ_d	10 à 20	KN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	19 à 22	KN/m ³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 à 12	KN/m ³
Densité relative	G_s	2.60 à 2.86	/
Porosité	η	0.20 à 0.80	/
Indice des vides	e	0.3 à 1	/
Teneur en eau	w	10 à 20	%

I.9. Les caractéristiques mécaniques des argiles

Les argiles présentent également plusieurs caractéristiques mécaniques importantes [14] :

- Cohésion : Les argiles ont une grande cohésion, c'est-à-dire qu'elles ont tendance à adhérer les unes aux autres. Cette cohésion est due aux forces d'attraction entre les feuillets d'argile.
- Adhésion : Les argiles ont également une grande adhésion, c'est-à-dire qu'elles ont tendance à adhérer à d'autres surfaces. Cette adhésion est due aux forces de Van der Waals entre les feuillets d'argile et la surface à laquelle elles adhèrent.
- Plasticité : La plasticité des argiles a déjà été évoquée précédemment. Elle permet aux argiles d'être moulées dans différentes formes lorsqu'elles sont humides.
- Friabilité : Les argiles sont généralement friables, c'est-à-dire qu'elles se cassent facilement lorsqu'elles sont sèches.

I.10. Le gonflement des argiles

Le gonflement des argiles est un phénomène important qui a des conséquences sur la structure du sol et sur la disponibilité de l'eau pour les plantes.

Le gonflement des argiles se produit lorsque les cations échangeables présents sur la surface des feuillets d'argile s'hydratent. Cela attire les molécules d'eau entre les feuillets d'argile, ce qui les pousse à se séparer les uns des autres [15].

L'ampleur du gonflement des argiles dépend de plusieurs facteurs :

- la nature des cations échangeables : Les cations divalents (comme le calcium) ont tendance à faire gonfler les argiles plus que les cations monovalents (comme le sodium). Cela s'explique par le fait que les cations divalents ont une charge plus élevée et peuvent donc se lier à plus d'eau.
- la composition minéralogique des argiles : Les argiles smectitiques ont tendance à gonfler plus que les argiles kaoliniques.

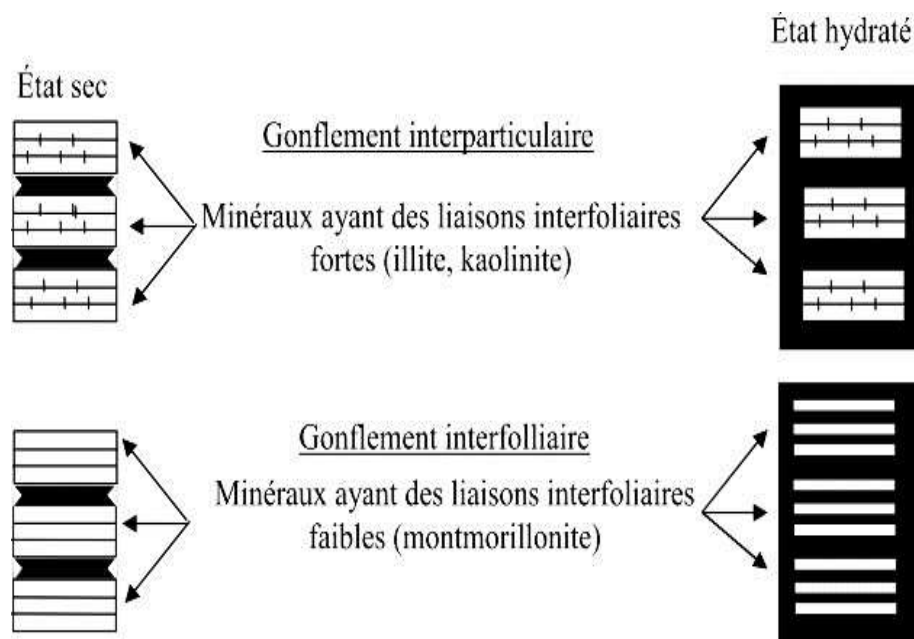


Figure I.7. Mécanisme de gonflement des argiles par hydratation

Figure I.8.

I.11. Les principales causes du gonflement des argiles

Les quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement sont :

- hydratation par adsorption ;
- hydratation par osmose ;
- hydratation par capillarité ;

- transformations chimiques.

I.11.1. Hydratation par adsorption

Le gonflement des argiles par adsorption est un phénomène complexe qui implique l'interaction entre les feuillets d'argile et les molécules d'eau. Les principales forces d'attraction et de répulsion qui contribuent à ce phénomène sont les suivantes [16] :

I.11.1.1. Les forces d'attraction

Le gonflement des argiles par adsorption est principalement causé par deux types de forces d'attraction :

- forces électrostatiques : Les feuillets d'argile possèdent une charge négative permanente due au remplacement de cations Si^{4+} par des cations Al^{3+} ou Fe^{3+} dans leur structure tétraédrique. Cette charge négative est compensée par des cations échangeables (généralement Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) adsorbés à la surface des feuillets. Lorsque ces cations échangeables s'hydratent (se lient à des molécules d'eau), ils attirent les molécules d'eau par des forces dipôle-dipôle, favorisant ainsi l'hydratation des argiles ;
- forces de Van der Waals : Ces forces intermoléculaires faibles existent entre toutes les molécules, y compris l'eau. Elles contribuent également à l'attraction entre les molécules d'eau et les feuillets d'argile, mais leur force est généralement inférieure à celle des forces électrostatiques.

I.11.1.2. Les forces de répulsion

Le gonflement par adsorption est contrecarré par des forces de répulsion qui s'opposent à l'approche des feuillets d'argile :

- répulsion électrostatique : Les charges négatives présentes sur les feuillets d'argile se repoussent mutuellement, ce qui tend à les éloigner les uns des autres. Lorsque les cations échangeables s'hydratent et augmentent l'espacement entre les feuillets, cela peut conduire à un gonflement important ;
- répulsion due aux forces de Born : Ces forces, également appelées forces de répulsion stérique, résultent de la superposition des nuages d'électrons des molécules d'eau. Elles contribuent à la répulsion entre les molécules d'eau et les feuillets d'argile, mais leur force est généralement plus faible que celle des forces électrostatiques.

L'équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion détermine l'ampleur du gonflement de l'argile.

I.11.2. Hydratation par osmose

L'osmose est un phénomène qui se produit lorsque deux solutions de concentrations en solutés différentes sont séparées par une membrane semi-perméable. Dans le cas des argiles, la membrane semi-perméable est constituée par les feuillets d'argile eux-mêmes.

Si une solution d'eau pure (faible concentration en solutés) est en contact avec une argile saturée en cations échangeables (concentration élevée en cations), les molécules d'eau ont tendance à migrer de la solution pure vers la solution concentrée en cations, traversant les feuillets d'argile. Ce mouvement d'eau entraîne un gonflement de l'argile [16].

I.11.3. Hydratation par capillarité

La capillarité est un phénomène qui se produit dans les pores fins des matériaux, tels que les argiles. Les forces de tension superficielle de l'eau attirent les molécules d'eau dans les pores, ce qui entraîne un gonflement du matériau.

Dans le cas des argiles, les pores fins se situent entre les feuillets d'argile et entre les particules d'argile elles-mêmes. L'hydratation par capillarité est particulièrement importante dans les sols argileux secs, où les forces de capillarité sont plus fortes en raison de la faible teneur en eau [16].

I.11.4. Transformations chimiques

Certaines transformations chimiques peuvent également contribuer au gonflement des argiles. Par exemple, l'oxydation de la matière organique présente dans les argiles peut libérer des ions H^+ , ce qui peut entraîner une hydratation par adsorption des argiles [16].

I.12. Les principaux problèmes des sols argileux

Les propriétés des sols argileux peuvent entraîner des problèmes pour les constructions et les infrastructures. Voici quelques-uns des principaux problèmes rencontrés :

I.12.1. Le phénomène de retrait-gonflement

Le phénomène de retrait-gonflement est un problème important car il peut affecter la stabilité des structures construites sur ces sols.

- Retrait : Cela entraîne une diminution du volume du sol, appelée retrait. Ce retrait peut provoquer des fissures dans les fondations des bâtiments et des affaissements de terrain.

- **Gonflement** : Lorsque les sols argileux sont exposés à l'eau, les phénomènes d'hydratation décrits précédemment (adsorption, osmose, capillarité) provoquent une augmentation du volume du sol. Ce gonflement peut exercer des pressions importantes sur les fondations des bâtiments et des canalisations souterraines, pouvant entraîner des fissures et des ruptures.

Les cycles répétés de retrait et de gonflement peuvent fragiliser les structures construites sur des sols argileux [17].

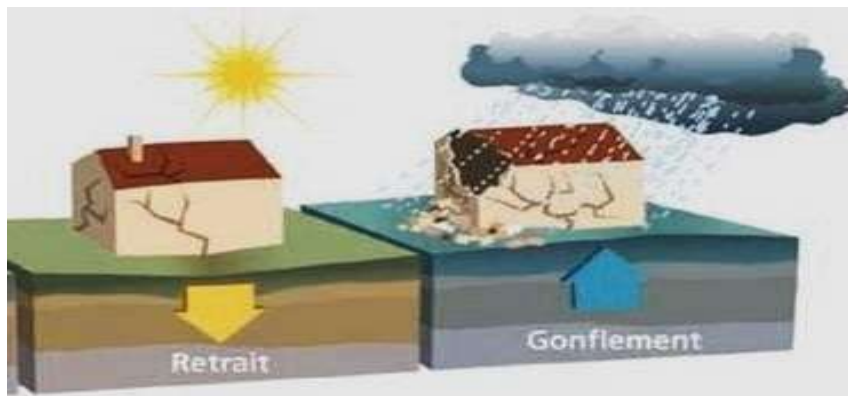


Figure I.8. Représentation du phénomène du retrait gonflement

I.12.2. Le phénomène de glissement

Le phénomène de glissement se produit lorsque des sols argileux saturés en eau sont situés sur une pente. L'eau peut lubrifier les surfaces de glissement potentielles, ce qui peut entraîner le déplacement des masses de sol argileux vers le bas de la pente.

Les glissements de terrain peuvent avoir des conséquences graves, notamment des dommages aux infrastructures, des inondations et des pertes de vies humaines [17].

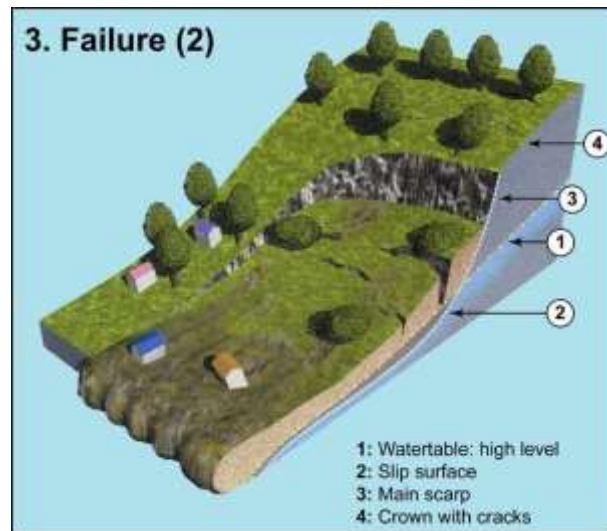


Figure I.9. Représentation du phénomène de glissement de terrain

I.12.3. Le phénomène de tassement

Le tassement se produit lorsque des charges sont appliquées à un sol argileux, ce qui peut entraîner une compaction du sol et une diminution de son volume.

La construction de bâtiments, de routes ou d'autres infrastructures peut exercer des charges importantes sur le sol et provoquer un tassement. Une baisse du niveau de la nappe phréatique peut également entraîner un tassement du sol argileux.

Le tassement peut avoir des conséquences graves, notamment des fissures dans les bâtiments, des affaissements de terrain et des ruptures de canalisations [17].

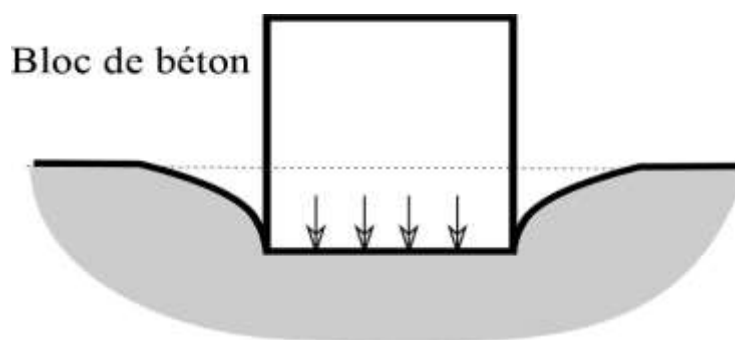


Figure I.10. Tassement uniforme

I.12.4. Érosion des sols argileux

L'érosion des sols argileux est un problème important, car elle peut entraîner la perte de la couche arable fertile et la dégradation des sols.

L'érosion des sols argileux peut être causée par plusieurs facteurs :

- l'eau de ruissellement : Lors de fortes pluies, l'eau peut ruisseler sur la surface du sol et emporter les particules fines d'argile ;
- le vent : Le vent peut également éroder les sols argileux secs et fins, surtout en l'absence de végétation pour les protéger ;
- les activités humaines : Certaines activités humaines, telles que le défrichage des forêts et le surpâturage, peuvent accélérer l'érosion des sols argileux.

L'érosion des sols peut avoir des conséquences graves, notamment la perte de productivité agricole, la sédimentation des cours d'eau et la pollution de l'eau [17].

I.13. Les conséquences dues aux problèmes des sols argileux

Les phénomènes précédents peuvent entraîner des désordres que ça soit sur les structures ou sur les routes [17].

I.13.1. Cas des bâtiments

Les problèmes de sols argileux peuvent avoir des conséquences importantes sur les bâtiments, notamment :

- fissures dans les murs et les fondations dues au retrait et au gonflement du sol ;
- affaissement des bâtiments causé par le tassement du sol ;
- infiltrations d'eau dans les sous-sols due à des fissures dans les fondations ;
- ruptures de canalisations souterraines causées par le mouvement du sol.

Pour limiter ces problèmes, il est important de réaliser une étude de sol approfondie avant de construire sur un terrain argileux. Cette étude permet de déterminer les propriétés du sol et de prendre des mesures appropriées pour stabiliser le sol, telles que le drainage, le remblayage ou le pieutage.

I.13.2. Cas des chaussées

Les problèmes de sols argileux peuvent également affecter les chaussées :

- fissures et affaissements de la chaussée dus au retrait et au gonflement du sol ;
- formation de nids-de-poule causés par le tassement du sol et le passage répété des véhicules ;
- glissements de terrain sur les routes situées sur des pentes instables.

Pour limiter ces problèmes, il est important de choisir un revêtement de chaussée adapté au type de sol argileux et de mettre en place un système de drainage efficace pour évacuer l'eau du sol.

I.13.3. Cas des ouvrages souterrains

Les problèmes de sols argileux peuvent également avoir des conséquences importantes sur les ouvrages souterrains, tels que les tunnels, les puits pétroliers et les monuments historiques.

- Tunnels : Les sols argileux peuvent exercer des pressions importantes sur les parois des tunnels, ce qui peut entraîner des déformations et des effondrements.
 - Gonflement : Lorsque les argiles entourant le tunnel absorbent l'eau, elles peuvent gonfler et exercer une pression croissante sur les parois du tunnel, pouvant conduire à des fissures et des ruptures.
 - Retrait : À l'inverse, en cas de sécheresse prolongée, le retrait des argiles peut créer des vides autour du tunnel, fragilisant sa structure.
- Puits pétroliers : Les sols argileux peuvent migrer dans les puits pétroliers en raison de leur faible perméabilité. Cette migration d'argile peut obstruer les équipements et réduire la production de pétrole.
 - Gonflement des argiles dans la formation géologique entourant le puits peut également réduire le diamètre du puits et entraver la circulation du pétrole.
- Monuments historiques : Les fondations des monuments historiques construits sur des sols argileux peuvent être fragilisées par les cycles de retrait-gonflement et le tassement du sol. Ces mouvements peuvent entraîner des fissures dans les structures et compromettre leur stabilité à long terme.

Pour limiter ces problèmes, il est important de réaliser des études géotechniques approfondies avant de construire des ouvrages souterrains dans des zones à sols argileux. Ces études permettent d'identifier les propriétés du sol et de mettre en place des mesures de stabilisation appropriées.

I.14. Conclusion

Les sols argileux présentent des propriétés spécifiques qui peuvent entraîner des problèmes pour les constructions et les infrastructures. Il est important de comprendre ces propriétés et de prendre des mesures appropriées pour limiter les risques liés aux sols argileux. Une étude approfondie du sol et la mise en œuvre de techniques de stabilisation adaptées sont cruciales pour garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages construits sur ce type de terrain.

Chapitre II

Techniques d'amélioration des sols fins

II.1. Introduction

Les argiles sont des roches sédimentaires fines composées majoritairement de minéraux argileux hydratés, comme la smectite, l'illite et la kaolinite. Leur granulométrie très faible (particules inférieures à 2 μm) leur confère des propriétés spécifiques :

- faible perméabilité : l'eau s'écoule lentement à travers les argiles, ce qui peut entraîner des problèmes de drainage et de stabilité des constructions ;
- gonflement au contact de l'eau : les argiles peuvent augmenter significativement de volume lorsqu'elles absorbent de l'eau, ce qui peut provoquer des soulèvements et des fissures dans les structures ;
- plasticité : les argiles peuvent être facilement moulées et déformées, ce qui peut poser des problèmes de portance pour les fondations [18].

Ces caractéristiques peuvent compromettre la stabilité des ouvrages construits sur des sols argileux. C'est pour cela, il est nécessaire d'adopter des méthodes d'amélioration pour résoudre ces problématiques. Il existe de nombreuses techniques qui permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols [19]. Dans ce chapitre sont présentées les différentes techniques d'amélioration des sols ainsi que les méthodes d'exécution.

II.2. Les techniques d'amélioration des sols

Les techniques d'amélioration des sols visent à modifier les propriétés des sols argileux in situ (sur place) afin d'en optimiser le comportement géotechnique. On distingue les différentes méthodes suivantes :

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

II.2.1. Les méthodes mécaniques

Ces méthodes cherchent à densifier le sol et à en augmenter la résistance au cisaillement (capacité à résister aux déformations). Elles se divisent en deux groupes :

- le compactage dynamique ;
- le vibro-compactage.

II.2.1.1. Le compactage dynamique

Le compactage dynamique est une technique de densification par impact. On utilise des pieux lourds équipés de pointes massives larguées d'une certaine hauteur pour créer des ondes de choc se propageant dans le sol. Ces ondes provoquent le tassement et la densification du sol argileux, en particulier des couches profondes (Figure II.1).

Cette technique est particulièrement efficace pour les sols argileux fins et saturés en eau, car les ondes de choc se propagent mieux en milieu humide [20].



Figure II.1. Compactage dynamique.

II.2.1.2. Le vibrocompactage

Le vibrocompactage (Figure II.2) est une technique de densification par vibration. On utilise des rouleaux vibrants lourds pour transmettre des vibrations au sol et le compacter.

Cette méthode est moins puissante que le compactage dynamique mais plus simple à mettre en œuvre. Elle convient mieux aux sols argileux peu profonds et relativement secs [21].

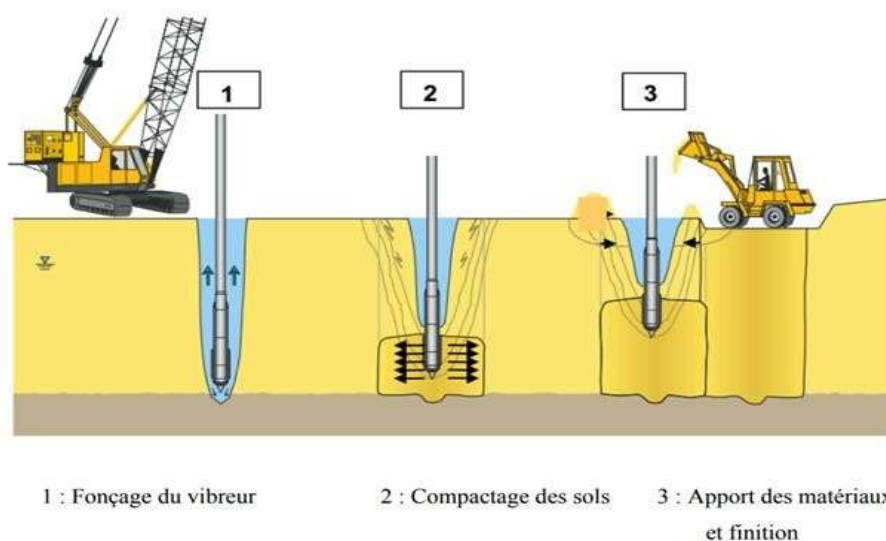


Figure II.2. Vibrocompactage.

II.2.2. Les méthodes hydromécaniques

Ces méthodes visent à améliorer la perméabilité des sols argileux et à en accélérer la consolidation (processus d'expulsion de l'eau contenue dans les pores du sol). Elles se divisent en deux groupes :

- le préchargement ou précompression ;
- l'accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux.

II.2.2.1. Le préchargement ou précompression

Le préchargement consiste à appliquer une surcharge temporaire sur le sol argileux à l'aide de remblais (Figure II.3). Cette surcharge accélère l'écoulement de l'eau interstitielle et la consolidation du sol, ce qui réduit sa compressibilité et sa sensibilité au gonflement.

Cette technique est particulièrement adaptée aux sols argileux profonds devant supporter des charges importantes. La surcharge est maintenue pendant une durée variable en fonction de l'épaisseur de la couche d'argile et de sa perméabilité. Une fois la consolidation suffisante atteinte, la surcharge est retirée [22].



Figure II.3. Préchargement des sols.

II.2.2.2. L'accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux

Cette technique consiste à installer des drains verticaux préfabriqués (en géotextile ou en matière composite) dans le sol argileux. Ces drains permettent un drainage vertical plus rapide de l'eau interstitielle, accélérant ainsi la consolidation du sol (Figure II.4).

Cette méthode est particulièrement efficace pour les sols argileux fins et saturés en eau, où l'écoulement naturel de l'eau est très lent [23].

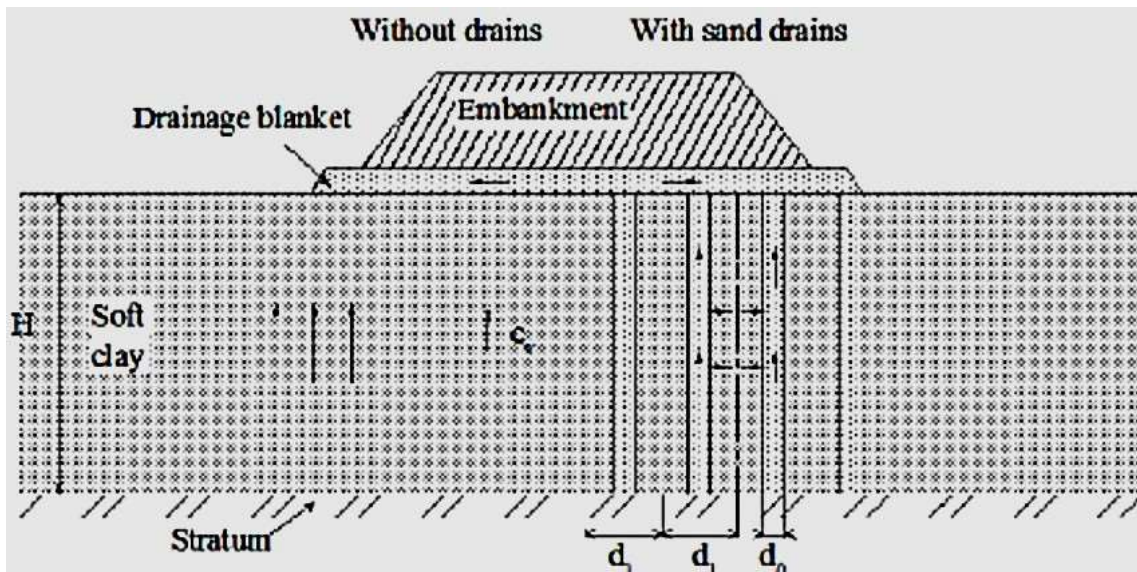


Figure II.4. Installation de drains verticaux.

II.2.3. Les méthodes thermiques

Les méthodes thermiques visent à modifier les propriétés des sols argileux en utilisant de la chaleur ou du froid. Elles sont moins courantes que les méthodes mécaniques et hydromécaniques, mais peuvent être efficaces dans certains cas spécifiques.

II.2.3.1. La déshydratation

La déshydratation consiste à retirer l'eau contenue dans les pores du sol argileux en chauffant le sol. Cette technique peut être réalisée par différentes méthodes chauffage par :

- convection : on utilise des brûleurs ou des résistances électriques pour chauffer directement le sol ;
- circulation d'air chaud : on injecte de l'air chaud dans des tubes installés dans le sol ;
- rayons infrarouges : on utilise des lampes à infrarouges pour chauffer le sol en surface.

La déshydratation permet de réduire la teneur en eau du sol argileux, ce qui a pour effet d'améliorer sa résistance au cisaillement et sa stabilité. Cette technique est particulièrement efficace pour les sols argileux fins et saturés en eau [24].

II.2.3.2. La congélation

La congélation consiste à geler l'eau contenue dans les pores du sol argileux. La glace formée dans les pores du sol augmente sa rigidité et sa résistance au cisaillement (Figure II.5). Cette technique est particulièrement efficace pour les sols argileux saturés en eau et instables [23].

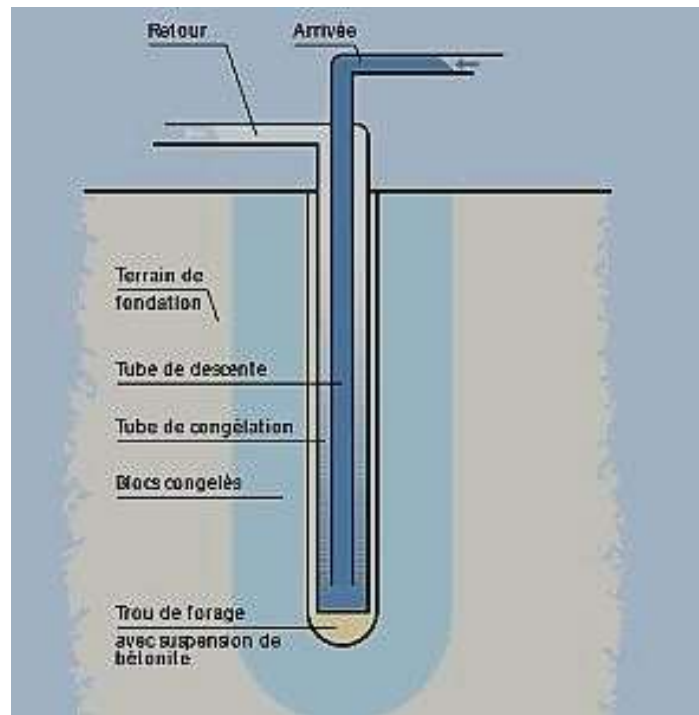


Figure II.5. Congélation des sols.

II.2.4. Les méthodes chimiques

Les méthodes chimiques visent à modifier les propriétés des sols argileux en ajoutant des produits chimiques, comme la chaux, les liants hydrauliques ou les polymères. Ces produits peuvent améliorer la résistance au cisaillement, la perméabilité et la stabilité des sols argileux.

A- Exemples de méthodes chimiques :

- Stabilisation à la chaux : la chaux réagit avec les argiles pour former des composés cimentaires qui améliorent la résistance au cisaillement et la perméabilité du sol.
- Stabilisation aux liants hydrauliques : les liants hydrauliques, comme le ciment ou le plâtre, sont ajoutés au sol pour former une matrice cimentaire qui renforce le sol.
- Stabilisation aux polymères : les polymères peuvent être ajoutés au sol pour améliorer sa cohésion et sa résistance au cisaillement [25].

B- Avantages des méthodes chimiques :

- Amélioration significative des propriétés géotechniques du sol.
- Permet de traiter des sols argileux très problématiques.
- Relativement simple à mettre en œuvre.

C- Inconvénients des méthodes chimiques :

- Coût élevé des produits chimiques.
- Impact environnemental potentiel.
- Nécessite une expertise technique pour la mise en œuvre.

II.3. Le choix de la technique de traitement des argiles

Le choix de la technique de traitement des argiles la plus adaptée dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- les propriétés géotechniques du sol argileux (granulométrie, teneur en eau, plasticité, compressibilité, etc.) ;
- les conditions de sol (profondeur de la couche d'argile, présence de nappes phréatiques, etc.) ;
- les exigences du projet (type de construction, charges à supporter, délais, etc.) ;
- les contraintes économiques et environnementales.

Il est important de réaliser une étude géotechnique approfondie du sol avant de choisir et mettre en œuvre une technique de traitement des argiles. Cette étude permettra de déterminer les caractéristiques du sol et de sélectionner la méthode la plus performante et la plus économique pour répondre aux besoins du projet de construction.

II.4. Le principe de choix d'une solution de traitement

Le choix d'une solution de traitement des sols argileux doit se baser sur une analyse approfondie des besoins du projet, des caractéristiques du sol et des contraintes économiques et environnementales. Il est important de considérer les points suivants :

- l'efficacité de la technique : la technique choisie doit permettre d'améliorer les propriétés géotechniques du sol de manière suffisante pour répondre aux exigences du projet ;
- la faisabilité de la technique : la technique choisie doit être réalisable sur le terrain, compte tenu des conditions de sol et des moyens disponibles ;
- la rentabilité économique : le coût de la technique choisie doit être raisonnable par rapport aux avantages attendus ;
- l'impact environnemental : la technique choisie doit avoir un impact environnemental minimal.

Il est souvent nécessaire de comparer plusieurs techniques de traitement avant de faire un choix définitif. Il est également important de consulter un géotechnicien expérimenté pour obtenir des conseils sur le choix de la technique la plus adaptée à un projet spécifique.

II.5. Les produits de traitement

Différents produits de traitement peuvent être utilisés pour améliorer le comportement ou les propriétés des sols. Ces produits peuvent être regroupés en deux catégories :

- produits conventionnels ;
- produits non conventionnels.

II.5.1. Produits conventionnels

II.5.1.1. Ciment

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées des sels minéraux anhydres réactifs qui se transforment en présence d'eau en un matériau solide (véritable roche artificielle). Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à partir du clinker, obtenu par la combinaison chimique à très haute température de calcaire et d'argile. Le clinker est ensuite broyé avec des ajouts, dans des proportions très précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques.

Il existe différents types de ciments aux propriétés spécifiques :

- Ciment Portland : le type de ciment le plus courant, il offre une bonne résistance et une prise rapide.
- Ciment Portland modificateur : formulé pour améliorer certaines propriétés, comme la résistance aux sulfates ou la prise lente.
- Ciment pouzzolanique : contient des cendres volantes et présente une meilleure résistance aux produits chimiques et à l'eau de mer.

II.5.1.2. Chaux

La chaux est obtenue par calcination de pierres calcaires (Figure II.6) très pures à haute température (± 950 °C).

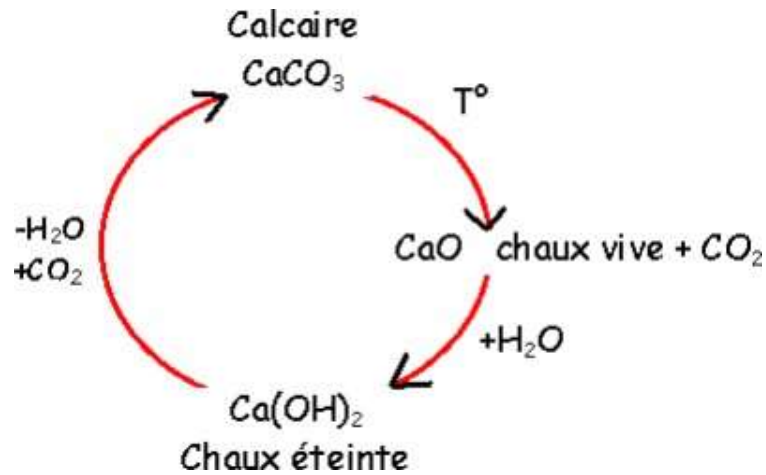


Figure II.6. Le cycle de la chaux

La chaux peut exister sous les trois formes suivantes :

- Chaux vive : la chaux vive ou l'oxyde de calcium (CaO) provient de la calcination de calcaire (Figure II.7 et figure II.8).



Figure II.7. Transformation du calcaire en chaux vive



Figure II.8. Chaux vive

- Chaux éteinte : elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive (Figure II.9).



Figure II.9. Chaux éteinte

- Lait de chaux : le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la

réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement des sols présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs, alors que la chaux vive achevée au contraire de les dessèche (Figure II.10).



Figure II.10. Lait de chaux

II.5.1.3. Cendre volante

Les cendres volantes sont des fines particules recueillies lors du dépeussierage des gaz résultant de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques. Leur composition est en relation avec les différents types de matières incombustibles présentes dans le charbon. D'une façon générale, les éléments présents sont : le silicium, l'aluminium le fer, le calcium et le magnésium (Figure II.11).



Figure II.11. Cendre Volante

II.5.1.4. Fumée de silice

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium (Figure II.12). Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage. La norme distingue deux

classes A et B : les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.



Figure II.12. Fumée de silice

II.5.2. Produits non conventionnels

II.5.2.1. 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 les substances organiques et l'eau. Le carbonate de calcium (CaCO_3), le constituant majeur de la coquille, est un cristal amorphe qui se produit naturellement sous forme de calcite (cristal hexagonal) (Figure II.13).



Figure II.13. Coquille d'œuf

II.5.2.2. Poussière de four à ciment

C'est un sous-produit du processus de fabrication de ciment (Figure II.14). Il contient de l'oxyde de calcium réactif (CaO) et des alcalins composés. Ce matériau est retiré du gaz d'échappement du four à ciment par un système de contrôle de la pollution de l'air.



Figure II.14. Poussière de four à ciment

II.5.2.3. Poussière de four à chaux

La poussière de four à chaux est un sous-produit obtenu à partir du processus de fabrication de la chaux vive et contient de grandes quantités de calcium, il est physiquement similaire à la poussière de four à ciment par contre la composition chimique est différente (Figure II.15).



Figure II.15. Poussière de four à chaux

II.5.2.4. Poudre de marbre

Le marbre est défini comme une roche métamorphique qui s'est entièrement recristallisée et durcie dans des conditions hydrothermales. La poussière de marbre produite par la coupe et le broyage du marbre a une taille de particule très fine, non plastique (Figure II.16).



Figure II.16. Roche métamorphique de marbre (à gauche) poudre de marbre (à droite)

II.5.2.5. Poudre de verre

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) (Figure II.17). La poudre de verre peut être considérée en tant que source alternative de matière pouzzolanique car elle dispose de propriétés chimiques (oxyde de silice SiO_2) et physiques (structure amorphe) compatibles pour l'activation alcaline en stabilisation des sols (Figure II.18).



Figure II.17. Déchet de verre



Figure II.18. Poudre de verre

II.6. Action des liants

Les liants, comme la chaux, les ciments, les liants hydrauliques routiers (LHR) et les polymères, modifient les propriétés physico-chimiques des sols argileux, améliorant ainsi leur comportement géotechnique (Figure II.19).



Figure II.19. Liants pour le traitement des sols argileux.

Leur action se manifeste principalement par deux mécanismes :

- l'amélioration : qui consiste à modifier la structure du sol argileux sans en changer la nature. On utilise généralement des liants faiblement réactifs, comme la chaux ou les LHR, pour : flocculer les argiles : les particules d'argile se regroupent en flocons plus gros, ce qui améliore la perméabilité du sol et réduit sa plasticité [23].
- La stabilisation : qui consiste à transformer la nature du sol argileux en créant de nouveaux composés. On utilise généralement des liants fortement réactifs, comme les ciments ou les polymères, pour : former une matrice cimentaire : les liants réagissent

avec l'eau et les argiles pour former des composés cimentaires qui durcissent et renforcent le sol [25].

II.7. Techniques de réalisation

Les techniques de réalisation des mélanges sol-liant varient en fonction du type de sol, du liant utilisé et des exigences du projet.

II.7.1. Technique courante : le mélange en place

Le mélange en place est la technique la plus courante pour le traitement des sols argileux. Elle consiste à mélanger le sol et le liant directement sur le site de construction, à l'aide de machines spécialisées, comme des malaxeurs ou des stabilisatrices.

II.7.1.1. Avantages du mélange en place

- Simplicité de mise en œuvre.
- Adaptabilité à des géométries complexes.
- Permet de traiter des sols en place, sans excavation [23].

II.7.1.2. Inconvénients du mélange en place

- Difficulté d'homogénéisation du mélange.
- Sensibilité aux conditions météorologiques.
- Nécessite un matériel adapté.

II.7.2. Mélange par la technique dite du dépôt reprise

La technique du dépôt reprise consiste à extraire le sol du site, le mélanger avec le liant dans une usine de traitement, puis à le transporter et le compacter sur place.

II.7.2.1. Avantages du dépôt reprise

- Contrôle précis du dosage et de l'homogénéisation du mélange.
- Qualité supérieure du sol traité.
- Moins sensible aux conditions météorologiques [26].

II.7.2.2. Inconvénients du dépôt reprise

- Coût plus élevé que le mélange en place.
- Nécessite une usine de traitement et un transport du sol.
- Moins adaptable à des géométries complexes [25].

II.7.3. Traitement dans le déblai ou sur le remblai

Le traitement peut être réalisé dans le déblai, c'est-à-dire sur le sol en place avant remblaiement, ou sur le remblai, c'est-à-dire après apport de matériaux. Le choix de la technique dépend des caractéristiques du projet et des contraintes du site.

II.7.3.1. Traitement dans le déblai**II.7.3.1.1. Avantages**

- Permet de traiter des sols argileux en place.
- Peut améliorer la portance du sol existant [28].

II.7.3.1.2. Inconvénients

- Difficulté d'homogénéisation du mélange
- Sensibilité aux conditions météorologiques [23].

II.7.3.2. Traitement sur le remblai**II.7.3.2.1. Avantages**

- Contrôle précis du dosage et de l'homogénéisation du mélange.
- Qualité supérieure du sol traité.
- Moins sensible aux conditions météorologiques [29].

II.7.3.2.2. Inconvénients

- Nécessite un apport de matériaux.
- Augmente le coût du projet [30].

II.8. Les étapes de traitement des sols

Le traitement des sols argileux implique une série d'étapes cruciales pour garantir la réussite du projet.

II.8.1. Identification du sol

La première étape consiste à identifier les caractéristiques du sol argileux à traiter. Cela implique la réalisation d'études géotechniques pour déterminer :

- la granulométrie du sol (proportion des différentes tailles de particules) ;
- la teneur en eau du sol ;
- les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité) ;
- la résistance au cisaillement du sol [28].

II.8.2. Études de la formulation

Une fois le sol identifié, on procède à des études de formulation pour déterminer :

- le type de liant le plus adapté aux caractéristiques du sol et aux exigences du projet (amélioration, stabilisation) ;
- le dosage optimal de liant nécessaire pour atteindre les propriétés mécaniques souhaitées du sol traité ;
- la compatibilité du liant avec le sol et l'environnement.

Ces études peuvent inclure des essais en laboratoire sur des échantillons de sol mélangés à différentes proportions de liant [25].

II.8.3. La mise en œuvre du sol traité

La mise en œuvre du sol traité dépend de la technique choisie (mélange en place, dépôt-reprise) et des caractéristiques du projet. Elle comprend généralement les étapes suivantes :

- préparation du sol : nivellement et scarification du sol pour une meilleure incorporation du liant ;
- dosage et mélange : introduction du liant dans la proportion définie par les études et mélange homogène avec le sol ;
- compactage : compactage du sol traité pour atteindre la densité et la portance souhaitées ;
- curage : protection du sol traité contre les intempéries pendant la phase de prise du liant [29].

II.8.4. Contrôle de qualité des travaux

Le contrôle de la qualité est crucial pour garantir l'efficacité du traitement du sol. Il comprend généralement :

- des essais de laboratoire sur des échantillons prélevés pendant et après la mise en œuvre pour vérifier le dosage de liant et les propriétés mécaniques du sol traité ;
- un suivi in situ de la portance et du tassement du sol traité [31].

II.9. La méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol

La chaux est un liant couramment utilisé pour le traitement des sols argileux, en raison de sa capacité à améliorer leurs propriétés physico-mécaniques. La méthode d'utilisation de la chaux implique plusieurs étapes clés :

II.9.1. La préparation du sol à traiter

Avant d'appliquer la chaux, il est essentiel de préparer le sol pour assurer une homogénéisation optimale du mélange. Cela implique :

- le dessèchement du sol : un sol trop humide peut empêcher une bonne dispersion de la chaux ;
- le broyage des mottes : les gros morceaux de sol peuvent entraver le mélange homogène ;

- l'élimination des végétaux et débris : ils peuvent affecter la réaction entre la chaux et le sol.

II.9.2. L'épandage

La chaux est généralement épandue sur le sol à sec à l'aide d'un épandeur mécanique. La quantité de chaux appliquée dépend des caractéristiques du sol et des objectifs de traitement.

II.9.3. Le malaxage

Une fois la chaux épandue, elle doit être mélangée uniformément avec le sol. Le malaxage peut être réalisé à l'aide d' :

- un malaxeur rotatif : pour une grande surface ou des volumes importants de sol ;
- une lame de niveleuse : pour des petites surfaces ou des traitements superficiels ;
- un labour : pour une incorporation en profondeur de la chaux.

II.9.4. Le réglage

Le réglage consiste à ajuster la teneur en eau du sol traité pour obtenir les conditions optimales de réaction entre la chaux et les argiles. L'eau est généralement ajoutée progressivement pendant le malaxage.

II.9.5. Le compactage

Le compactage du sol traité est crucial pour atteindre la densité et la portance souhaitées. Le type de rouleau utilisé dépend de la nature du sol et de l'épaisseur de la couche compactée.

II.9.6. La protection de surface

Après le compactage, la surface du sol traité doit être protégée du dessèchement et de l'érosion par une couche de protection, comme un film plastique ou un jet de bitume [32].

II.10. Matériels de traitement

Le choix du matériel de traitement dépend de la technique utilisée, de la quantité de sol à traiter et des contraintes du site.

Voici quelques exemples de matériels couramment utilisés :

- Épandeurs : pour l'épandage uniforme de la chaux ou d'autres liants sur le sol (Figure II.20).



Figure II.20. Épandeurs pour traitement des sols argileux.

- Malaxeurs : pour le mélange homogène du liant avec le sol (Figure II.21).



Figure II.21. Malaxeurs pour traitement des sols argileux.

- Lames de niveleuse : pour le malaxage et le nivellement superficiels du sol traité.
- Rouleaux compacteurs : pour le compactage du sol traité et l'obtention de la densité souhaitée (Figure II.22).



Figure II.22. Rouleaux compacteurs pour traitement des sols argileux.

- Camions citernes : pour le transport d'eau ou de liant liquide.

- Matériel de laboratoire : pour la réalisation d'essais de caractérisation du sol et de contrôle de la qualité du traitement.

II.10.1. Critères de sélection du matériel :

- Performance : capacité du matériel à traiter la quantité de sol requise dans les délais impartis.
- Fiabilité : robustesse du matériel et minimisation des pannes.
- Facilité d'utilisation : ergonomie et simplicité d'emploi pour les opérateurs.
- Coût : investissement initial et coûts d'exploitation (maintenance, carburant).
- Impact environnemental : émissions de gaz à effet de serre et nuisances sonores [23].

II.11. Les problèmes à rencontrer lors des opérations de traitement des sols

Le traitement des sols argileux peut s'avérer complexe et rencontrer divers obstacles qu'il faut prendre en compte et anticiper [25].

II.11.1. Le froid et le gel

Les basses températures peuvent ralentir, voire empêcher, la prise des liants hydrauliques comme la chaux ou le ciment. Des mesures de protection contre le gel, comme l'utilisation de couvertures isolantes ou l'ajout d'accélérateurs de prise, peuvent être nécessaires.

II.11.2. La présence d'éléments néfastes à la prise hydraulique

Certains éléments présents dans le sol peuvent affecter la réaction entre le liant et les argiles, nuisant à la résistance et à la durabilité du traitement.

II.11.2.1. Les sulfates

Les sulfates réagissent avec la chaux pour former des sels de calcium sulfatés qui peuvent limiter la résistance du sol traité. Des analyses préalables du sol sont essentielles pour identifier la présence de sulfates et adapter la technique de traitement en conséquence.

II.11.2.2. Les matières organiques

Les matières organiques peuvent également perturber la prise hydraulique des liants. Un dessèchement et une aération du sol peuvent être nécessaires pour favoriser la dégradation des matières organiques avant le traitement.

II.11.3. Le problème du climat par rapport à la cinétique de durcissement

Le temps de durcissement des liants dépend de divers facteurs, tels que la température et l'humidité. Il est crucial de planifier les opérations de traitement en tenant compte des conditions climatiques locales et de prendre des mesures de protection contre les intempéries si nécessaires.

II.11.4. Les émissions de poussière

Le mélange et le compactage du sol traité peuvent générer des poussières fines, nuisibles pour la santé des travailleurs et l'environnement. Des mesures de prévention, comme le port de masques et l'utilisation de systèmes d'arrosage, doivent être mises en place pour limiter les émissions de poussière.

II.12. Conclusion

Le traitement des sols argileux est une technique polyvalente et en constante évolution qui offre de nombreux avantages pour les projets de construction. En combinant une analyse approfondie du sol, une sélection judicieuse de la technique de traitement et une mise en œuvre soignée, il est possible d'améliorer durablement les propriétés des sols argileux et de les rendre aptes à la construction de manière fiable, économique et respectueuse de l'environnement.

Chapitre III

Présentation et identification des matériaux utilisés

III.1. Introduction

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, minéralogiques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

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.

Identifier un sol c'est connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose. Ces propriétés sont déterminées par des essais normalisés appelés essais géotechniques dont les plus répandus sont : analyse granulométrique, limite d'Atterberg, bleu de méthylène, les différentes masses volumiques.

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) à 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). 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).

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_w : la masse de l'eau

M_s : la masse sèche

M_h : la masse humide

M_s : la masse sèche

Les différents résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.1 suivant :

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

Echantillon	1	2	3	4	5
M_h (g)	42.1	42.9	39.7	52.7	62.2
M_s (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 $80\mu\text{m}$, la séparation se fait par tamisage. Au-delà on utilise le tamisage par sédimentométrie.

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



Figure III.3. Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage et 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.

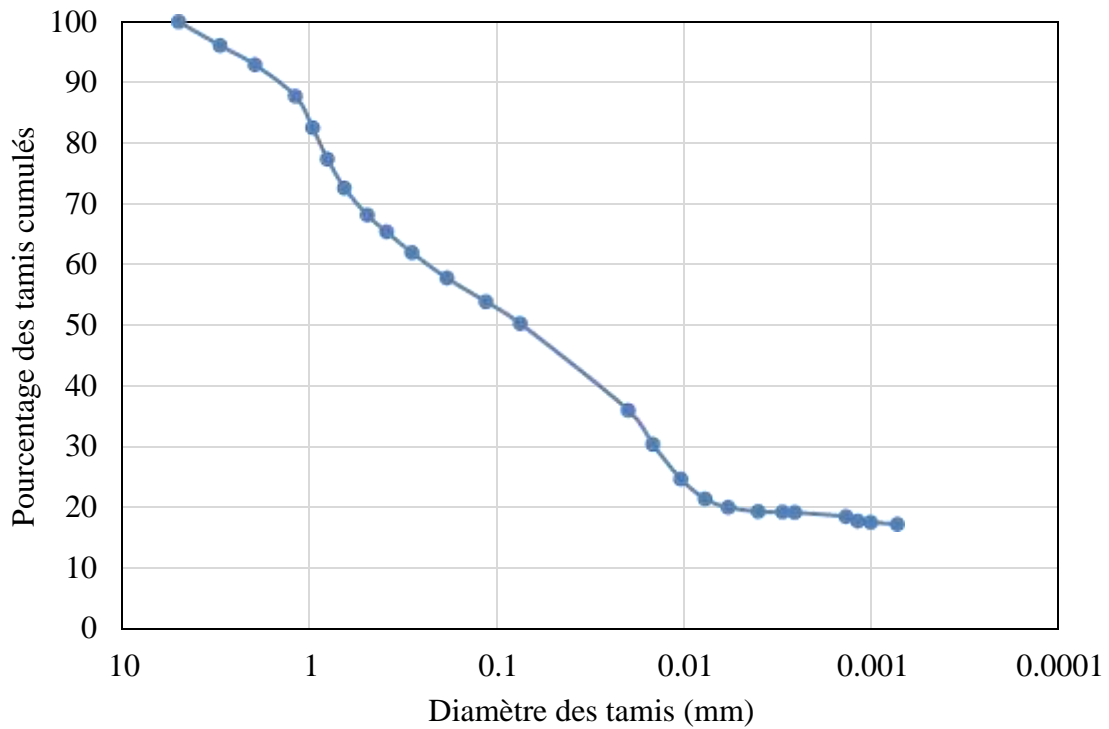


Figure III.4. Courbe granulométrique de l'argile.

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.



Figure III.5. Matériel nécessaire pour la détermination de la masse volumique des particules solides du sol.

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

$$\rho_s = \frac{\rho_w (M_2 - M_1)}{M_4 + M_2 - M_1 - M_3}$$

avec :

M_1 : 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

ρ_w : la masse volumique de l'eau = 1000 Kg/m³.

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

M_1	M_2	M_3	M_4	ρ_w (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
206.9	256.6	785.6	764	1	1.779

La masse volumique des particules solides est : 1.779 g/cm³.

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

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).

La limite de liquidité se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande qui est constitué d'une coupelle dans laquelle on met l'échantillon et d'une came mue par une manivelle qui soulève la coupelle et la laisse brusquement retomber sur un socle rigide. On étale environ 70g de sol dans la coupelle (b), puis avec l'outil à rainure on creuse au milieu de la coupelle un sillon

dans la pâte (c). On soumet alors la coupelle à un certain nombre de chocs jusqu'à ce que le sillon se referme sur 1(cm) (d).



Figure III.6. 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 (Mh) (g)	Masse sèche (Ms) (g)	La masse de l'eau (Mw) (g)	Teneur en eau $W = \frac{Mw}{Ms} * 100$ (%)
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.

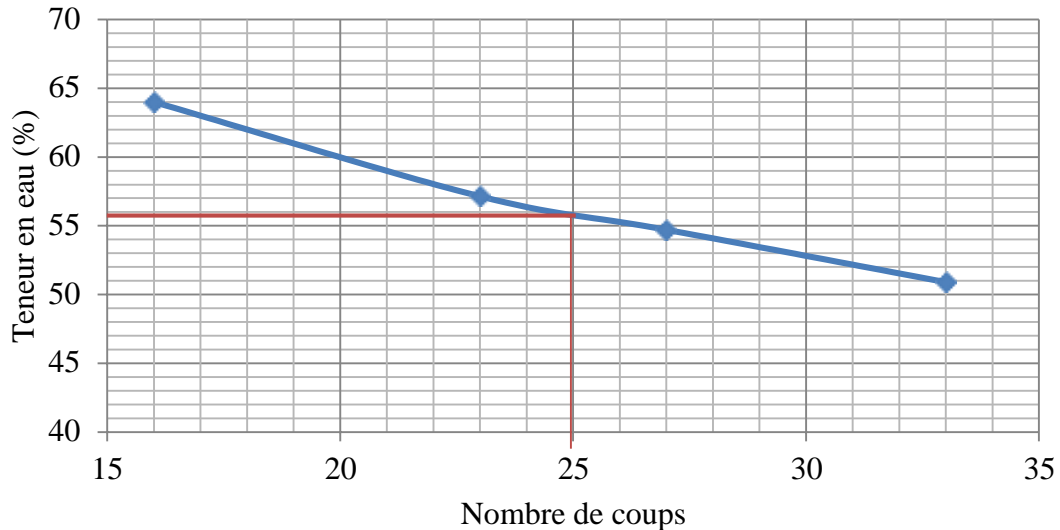


Figure III.7. Limite de liquidité du sol.

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. On prélève une portion d'échantillon préparée auparavant afin de former une boule. Celle-ci est roulée à la main sur une plaque lisse, le but d'obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. Au moment où il atteint 3 mm de diamètre, le rouleau doit mesurer environ 10 à 15 cm de long. La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément le rouleau se fissure 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.8. Rouleaux pour la détermination de la 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 (%)	Wp=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.

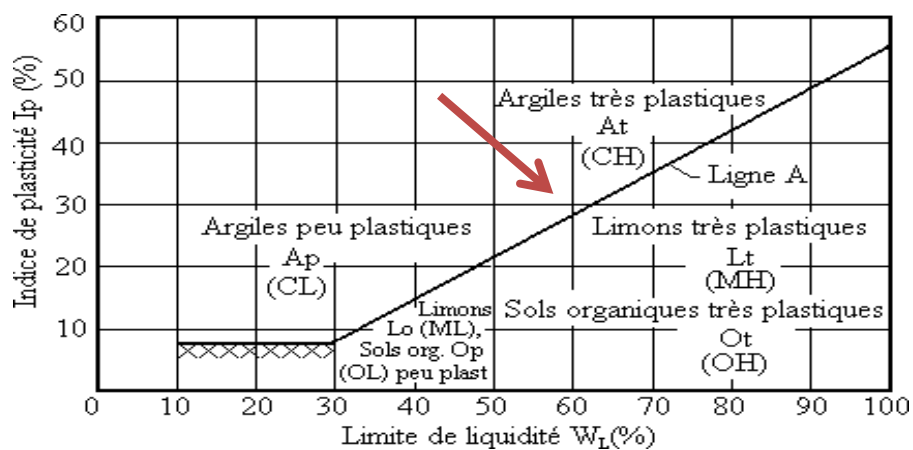


Figure III.9. Abaque de plasticité de Casagrande.

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

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.

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.

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.



Figure III.10. Appareillage pour essai bleu de méthylène.

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 $700 \pm 100 \text{ tr/min}$ 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 $400 \pm 100 \text{ tr/min}$.

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 tâche 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 tache est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5 cm³ 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.

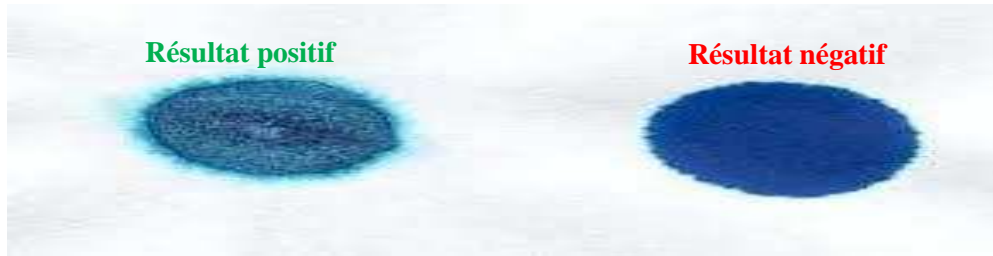


Figure III.11. Observations de taches de l'essai VBS.

La valeur du VBS est calculée avec la formule suivante :

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

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.

Selon les résultats obtenus, la valeur au bleu de méthylène est : $\text{VBS} = 7.8$

La classification est faite en utilisant le tableau III.8:

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

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

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

III.2.2. La coquille d'œuf

La coquille d'œuf a été collectée à partir des boulangeries locales. Dans un premier temps, la coquille d'œuf a été rincée plusieurs fois avec de l'eau pour éliminer les impuretés et une partie de la matière organique. Ensuite, elle a été séchée à l'air libre puis légèrement

concassée pour faciliter sa transformation en poudre à l'aide d'un moulin à café afin de la préparer pour les essais.



Figure III.12. Préparation des coquilles d'œufs



Figure III.13. Poudre des coquilles d'œufs.

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.14. 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.15. Chaux utilisée.

III.3. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des paramètres d'identification réalisés au laboratoire, afin de mieux présenter les aspects physiques et minéralogiques du matériau étudié. Les essais d'identification nous ont permis de mieux connaître le sol étudié.

Chapitre IV

Essais de compactage

IV. 1. Introduction

Au début des années 1930, Proctor trouve une solution pour déterminer la densité maximum des sols. Dans un environnement contrôlé (pour un volume contrôlé), le sol peut être compacté jusqu'à un point où il n'y a plus qu'un minimum d'air présent dans le sol, simulant les conditions d'un sol in situ. À partir de là, la densité sèche peut être déterminée en mesurant simplement le poids du sol avant et après compactage, calculant la teneur en eau et la densité sèche.

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.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des principes de base de l'essai Proctor normal ainsi que les différents résultats obtenus sous forme de tableaux et de courbes illustrant le comportement d'un sol argileux en fonction des ajouts de coquilles d'œufs, de ciment et de chaux à différents pourcentages.

IV.2. Essais Proctor normal

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.

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 masse volumique sèche du matériau correspondant à une valeur particulière de la teneur en eau. Ces deux valeurs sont appelées caractéristiques optimales de compactage.



(a) Préparation de l'échantillon



(b) Humidification de l'échantillon



(c) Compactage de l'échantillon



(d) Démoulage de l'éprouvette

Figure IV.1. Principe de l'essai Proctor

IV.3. Résultats et interprétations

Les différents résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes, selon différents pourcentages d'ajout.

IV.3.1. Essai Proctor a l'état naturel

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

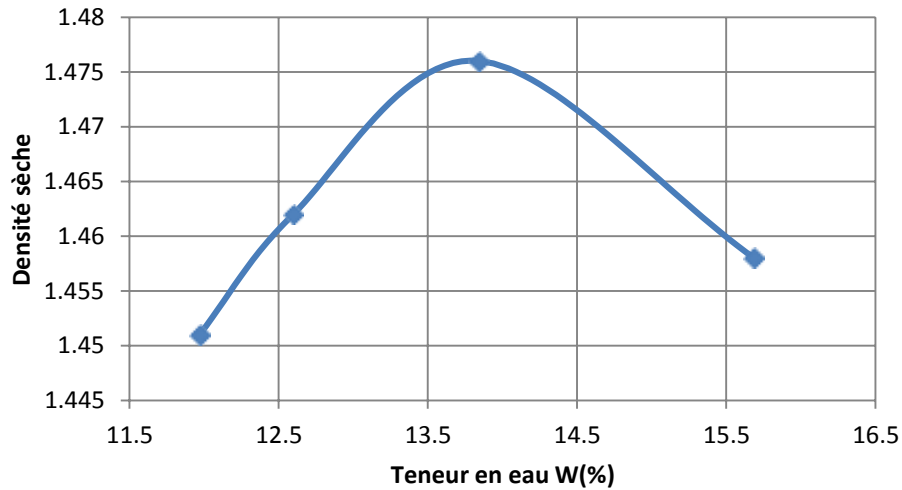


Figure IV.2. Courbe Proctor (sans ajout).

Selon la figure IV.2, l'essai Proctor à l'état naturel révèle que la densité sèche du sol argileux fluctue en fonction de la quantité d'eau, atteignant un maximum de 1.476 à une teneur en eau de 13,845%. En dépit de cette concentration en eau, à 15,686%, la densité sèche diminue pour atteindre une valeur de 1.458, ce qui suggère que l'utilisation excessive d'eau diminue l'efficacité du compactage. Ainsi, la concentration idéale d'eau pour optimiser la densité sèche du sol est de 13,845 %.

IV.3.2. Essai Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs

La figure suivante présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 2% coquilles d'œufs.

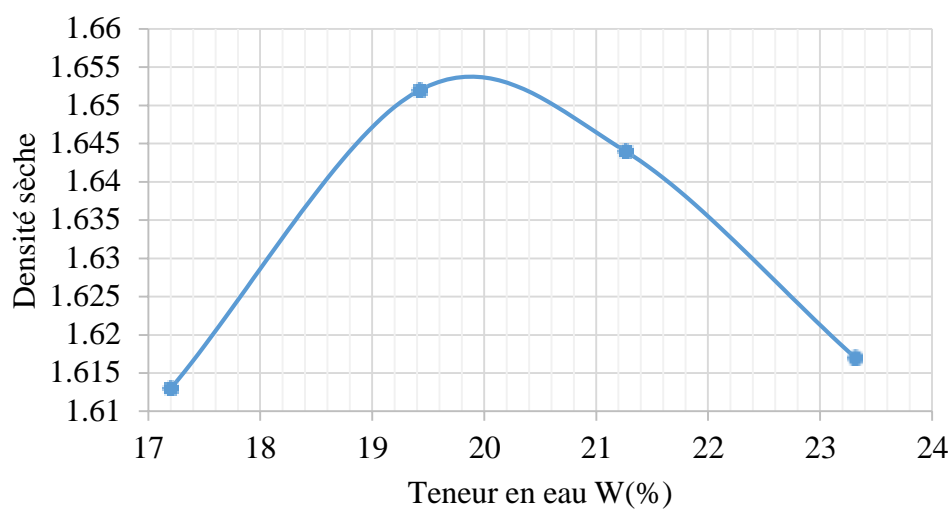


Figure IV.3. Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs.

Selon cette figure IV.3, on observe une amélioration significative de la densité sèche du sol argileux avec l'ajout de 2% de coquilles d'œufs pour toutes les teneurs en eau étudiées. Les coquilles d'œufs permettent un compactage plus efficace, avec une densité sèche maximale de 1.652 à une teneur en eau de 19.423 %, par rapport à une densité sèche maximale de 1.476 et une teneur en eau de 13.845 % sans ajout. Cela démontre que les coquilles d'œufs favorisent une meilleure interaction entre les particules du sol, ce qui permet un compactage plus efficace à des teneurs en eau plus élevées et élargissant la plage des teneurs en eau pour un compactage optimal.

IV.3.2. Essai Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs

La figure suivante présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 5% de coquilles d'œufs.

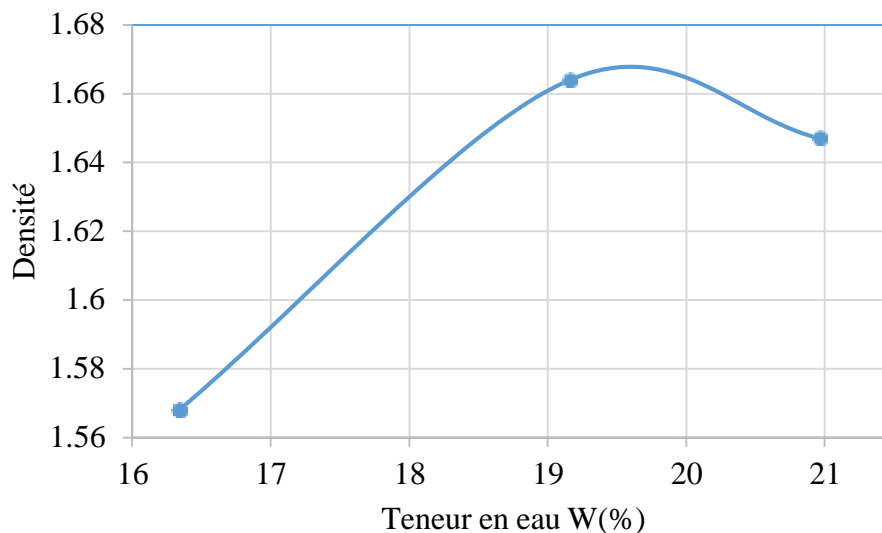


Figure IV.4. Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs.

En utilisant 5% de coquilles d'œufs pour toutes les teneurs en eau étudiées, on constate une amélioration notable de la densité sèche du sol argileux, comme le montre la figure IV.4. Les coquilles d'œufs sont ajoutées pour un compactage plus efficace, avec une densité sèche maximale de 1.664 à une teneur en eau de 19.159 %, contre 1.476 à une teneur en eau de 13.845 % sans ajout. Cela met en évidence le fait que les coquilles d'œufs favorisent une interaction plus efficace entre les particules du sol, ce qui permet un compactage plus efficace à des teneurs en eau plus faibles et élargissent la plage de teneurs en eau pour un compactage optimal.

IV.3.3. Comparaison des résultats

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile à l'état naturel (sans ajout), et avec ajout de 2%, et 5% de coquilles d'œufs.

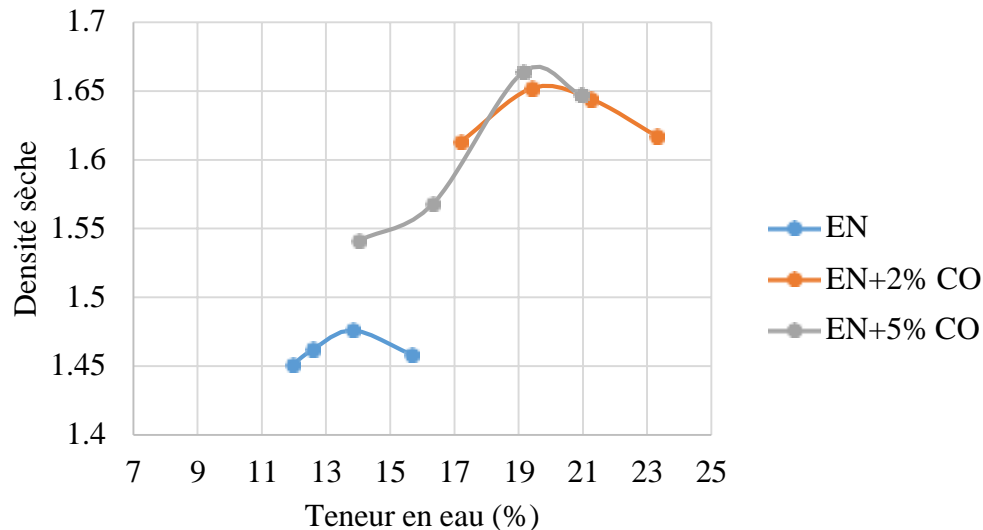


Figure IV.5. Courbe Proctor à l'état naturel et avec ajout de 2% et 5% de coquilles d'œufs.

Selon la représentation graphique IV.5, les tests Proctor effectués à l'état naturel du sol (EN) et avec des ajouts de 2% et 5% de coquilles d'œufs (CO) révèlent une amélioration significative de la densité sèche maximale. La densité sèche maximale de l'état naturel est de 1.476. Lorsque 2% de coquilles d'œufs sont ajoutées, la densité sèche augmente considérablement à 1.652, ce qui témoigne d'une amélioration significative de la compaction du sol. En ajoutant 5% de coquilles d'œufs, la densité sèche maximale maintient une légère amélioration pour atteindre 1.664. La croissance progressive semble indiquer que les coquilles d'œufs contribuent à améliorer la structure du sol en augmentant la densité sèche maximale, sans doute en comblant les vides et en favorisant une meilleure liaison entre les particules du sol.

Ces résultats démontrent que l'ajout de coquilles d'œufs est efficace pour améliorer la compaction du sol argileux, avec des gains supplémentaires obtenus en augmentant le pourcentage d'ajout.

IV.3.4. Essais Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de ciment)

La figure suivante, présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 2% de coquilles d'œufs pour 2%, 4%, et 6% de ciment.

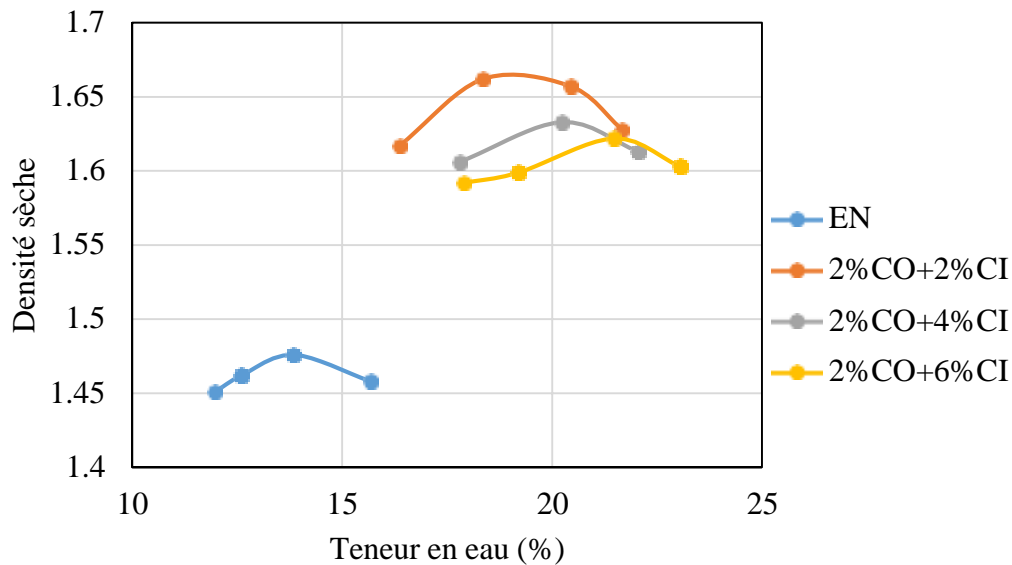


Figure IV.6. Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment.

D'après la figure IV.6, les tests Proctor qui ont comparé l'état naturel du sol (EN) avec des ajouts combinés de 2% de coquilles d'œufs (CO) et de différentes proportions de ciment (CI) montrent des variations intéressantes dans la densité sèche maximale. La densité sèche maximale du sol dans son état naturel est de 1.476. En ajoutant 2 % de coquilles d'œufs et 2 % de ciment, la densité sèche maximale atteint 1.662, ce qui indique une amélioration importante de la compaction grâce à l'effet synergique de la combinaison des matériaux ajoutés.

Toutefois, en augmentant la proportion de ciment à 4%, la densité sèche maximale diminue légèrement à 1.633. Cette réduction peut être due à une diminution de la compacité du mélange, ce qui pourrait entraîner une moindre compaction sous les mêmes conditions de compactage.

En incorporant 6 % de ciment, la densité sèche maximale diminue légèrement jusqu'à atteindre 1.622. Selon cette tendance, un excès de ciment peut diminuer l'efficacité de la compaction, probablement en créant une structure trop rigide et moins capable de réorganiser les particules de sol de manière optimale.

IV.3.5. Essais Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de ciment)

La figure suivante présente la variation de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment.

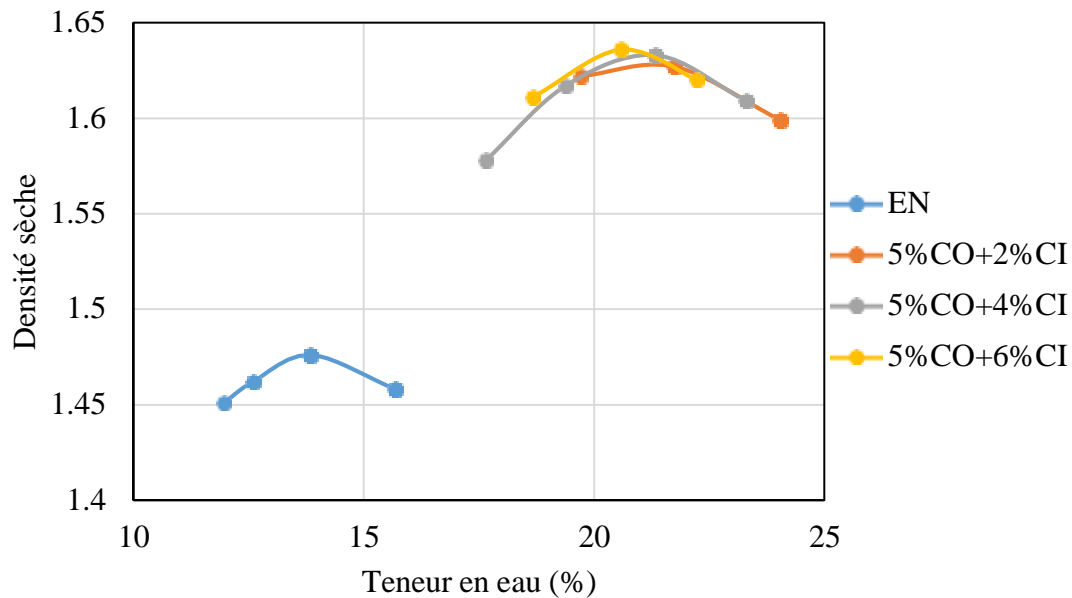


Figure IV.7. Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de ciment.

Les essais Proctor comparant l'état naturel du sol (EN) avec des ajouts combinés de 5% de coquilles d'œufs (CO) et de différentes proportions de ciment (CI) révèlent des variations intéressantes dans la densité sèche maximale. Tel est illustré dans la figure IV.7. Le sol dans son état naturel a une densité sèche maximale de 1.476. L'incorporation de 5% de coquilles d'œufs et 2% de ciment entraîne une augmentation de la densité sèche maximale à 1.627, ce qui témoigne d'une amélioration significative de la compaction grâce à l'effet combiné des matériaux introduits.

Lorsque la proportion de ciment est augmentée à 4%, la densité sèche maximale reste stable à 1.633, montrant une légère augmentation par rapport à l'ajout de 2% de ciment. Cette tendance suggère que l'ajout de ciment continue de contribuer positivement à la compaction du sol jusqu'à ce niveau.

En augmentant la proportion de ciment à 6%, la densité sèche maximale atteint 1.636. Cette augmentation, bien que modeste, indique que l'ajout de ciment au-delà de 4% continue à améliorer la compaction.

IV.3.6. Essais Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de chaux)

La figure suivante présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de chaux.

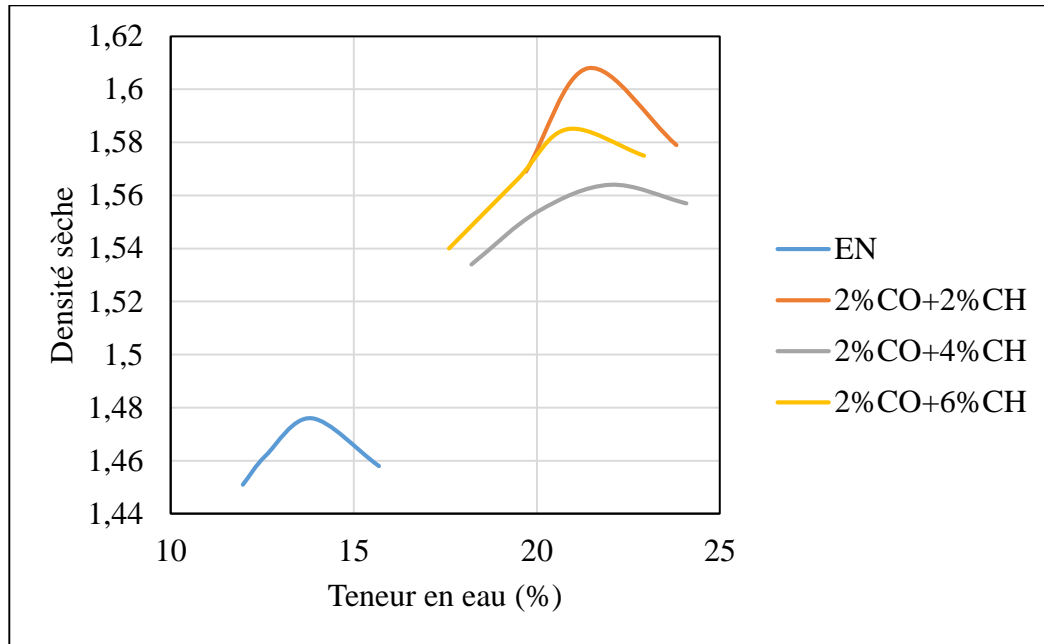


Figure IV.8. Courbe Proctor avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 2%, 4%, et 6% de chaux.

D'après l'exemple, les recherches Proctor qui ont comparé l'état naturel du sol (EN) avec des ajouts combinés de 2% de coquilles d'œufs (CO) et de différentes proportions de chaux (CH) révèlent des variations intéressantes dans la densité sèche obtenue. La densité sèche maximale du sol dans son état naturel est de 1.476. Avec 2% de coquilles d'œufs et 2% de chaux, la densité sèche maximale est de 1.608, ce qui indique une amélioration importante de la compaction par l'effet stabilisateur de la chaux associée aux coquilles d'œufs.

Cependant, lorsque la proportion de chaux est augmentée à 4%, la densité sèche maximale diminue à 1.564. Cette réduction suggère que l'augmentation de la chaux à ce niveau peut dépasser l'optimum de stabilisation et commencer à perturber la structure du sol, conduisant à une compaction moins efficace.

Lorsque la proportion de chaux est augmentée de 6 %, la densité sèche maximale augmente légèrement pour atteindre 1,585. L'élévation légère par rapport à l'ajout de 4 % de chaux suggère que la quantité de chaux commence à retrouver un équilibre favorable à la compaction, mais elle ne parvient pas aux niveaux observés avec seulement 2 % de chaux.

IV.3.7. Essais Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs (2%, 4% et 6% de chaux)

La figure suivante présente la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau de l'argile, avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de chaux.

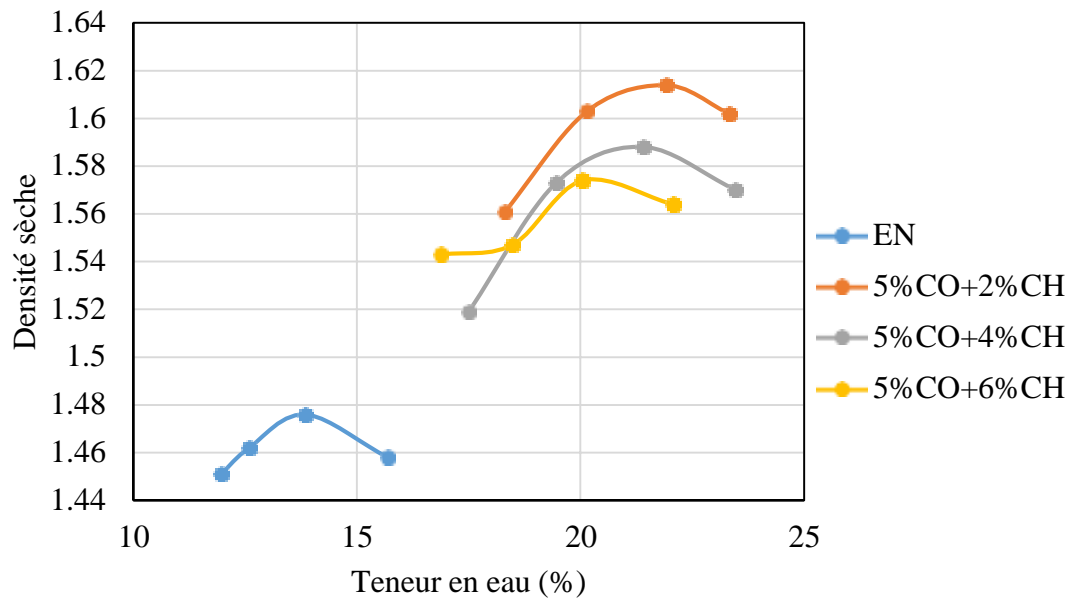


Figure IV.9. Courbe Proctor avec ajout de 5% de coquilles d'œufs avec 2%, 4% et 6% de chaux.

Les essais Proctor comparant l'état naturel du sol (EN) avec des ajouts combinés de 5% de coquilles d'œufs (CO) et de différentes proportions de chaux (CH) montrent des différences significatives dans la densité sèche maximale. Tel est illustré dans cette figure. Le sol dans son état naturel a une densité sèche maximale de 1.476. La densité sèche maximale avec 5% de coquilles d'œufs et 2% de chaux atteint 1.614, ce qui suggère une amélioration significative de la compaction grâce à l'effet stabilisateur des coquilles d'œufs associé à une faible quantité de chaux.

Cependant, lorsque la proportion de chaux est augmentée à 4%, la densité sèche maximale diminue légèrement à 1.588. Cette réduction suggère que à ce pourcentage de chaux, la structure du sol peut commencer à être perturbée, réduisant ainsi l'efficacité de la compaction.

En augmentant la proportion de chaux à 6%, la densité sèche maximale continue de diminuer légèrement pour atteindre la valeur 1.574. Cette tendance indique que l'ajout excessif de la chaux en combinaison avec les coquilles d'œufs n'améliore pas la compaction et peut même avoir un effet néfaste sur la densité sèche maximale atteinte.

IV.4. Conclusion

Les essais Proctor réalisés avec l'ajout de coquilles d'œufs ont montré des améliorations significatives de la densité sèche maximale du sol à l'état naturel. L'ajout de 2% et 5% de

coquilles d'œufs a augmenté la densité sèche maximale par rapport à l'état naturel, démontrant l'efficacité de ce matériau comme stabilisant.

L'incorporation de ciment en combinaison avec les coquilles d'œufs a produit des résultats variables. Avec 2% de coquilles d'œufs, l'ajout de ciment a initialement augmenté la densité sèche maximale, mais des pourcentages plus élevés de ciment ont légèrement diminué cette densité. De même, avec 5% de coquilles d'œufs, la densité sèche maximale a fluctué en fonction de la quantité de ciment ajoutée, indiquant que l'équilibre entre ces deux matériaux est crucial pour optimiser les propriétés du sol.

L'ajout de chaux, en combinaison avec les coquilles d'œufs, a également montré une tendance similaire. L'augmentation des pourcentages de chaux avec 2% et 5% de coquilles d'œufs a entraîné des augmentations initiales de la densité sèche maximale, suivies de légères diminutions à des pourcentages plus élevés de chaux. Cela suggère que, bien que la chaux améliore la densité du sol, il existe un point optimal au-delà duquel l'ajout supplémentaire de chaux n'est pas bénéfique.

En résumé, les coquilles d'œufs améliorent la densité sèche maximale du sol argileux, et leur combinaison avec du ciment ou de la chaux nécessite un dosage optimal pour maximiser les améliorations des propriétés mécaniques du sol.

Chapitre V

Essais de compression simple

V.1. Introduction

Un essai de compression est l'un des types d'essais mécaniques les plus fondamentaux, avec les essais de traction et de flexion. Les essais de compression sont utilisés pour déterminer le comportement d'un matériau sous des charges d'écrasement appliquées, et sont généralement réalisés en appliquant une pression compressive à un éprouvette (généralement de géométrie cubique ou cylindrique) à l'aide de platines ou montages spécialisés sur une machine d'essai universelle.

Pendant l'essai, diverses propriétés du matériau sont calculées et représentées sous la forme d'un diagramme de taux de contrainte-déformation qui sert à déterminer des qualités telles que la limite élastique, la limite proportionnelle, le point de limite d'élasticité, la limite d'élasticité, et pour certains matériaux, la résistance à la compression.

Dans ce chapitre, sont présentés les principes de base d'un essai de compression simple, ainsi que les différents résultats obtenus lors des essais effectués au niveau du laboratoire béton de la faculté du génie de la construction à l'université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou.

V.2. Principe de l'essai de compression simple (NF P 94-071-1)

L'essai de compression simple, consiste à mesurer la résistance à la compression des échantillons cylindriques, compacté statiquement, à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale déduite de l'essai Proctor. L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à une force axiale jusqu'à la rupture. La résistance à la compression simple (R_c) est définie comme la contrainte mesurée à la rupture.

Les éprouvettes réalisées, sont placées entre les deux plateaux parallèles de la presse. L'axe de l'éprouvette est orthogonal aux plateaux. La force est appliquée ensuite de manière continue et uniforme. La force maximale subie par l'éprouvette est enregistrée. La résistance à la compression simple est calculée ensuite selon l'équation suivante :

$$R_c = F/S$$

avec :

R_c : résistance à la compression simple (MPa)

F : charge maximale supportée par l'éprouvette (kN)

S : surface de l'éprouvette en (mm²)

V.3. Résultats des essais de compression simple

Les différents résultats obtenus, sont présentés sous forme de courbes.

V.3.1. 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).

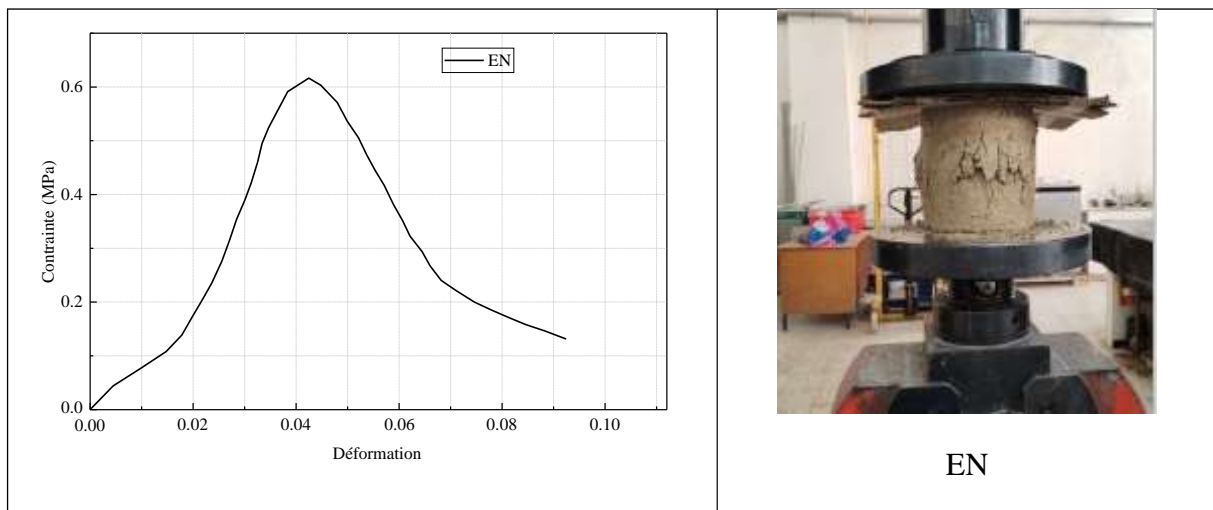


Figure V.1. Courbe de résistance à la compression (R_c) à l'état naturel (sans ajout).

V.3.2. Essai de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs

La figure V.2, présente la variation de la résistance à la compression (R_c) en fonction de la déformation de l'éprouvette d'argile avec ajout de 2% de coquilles d'œufs.

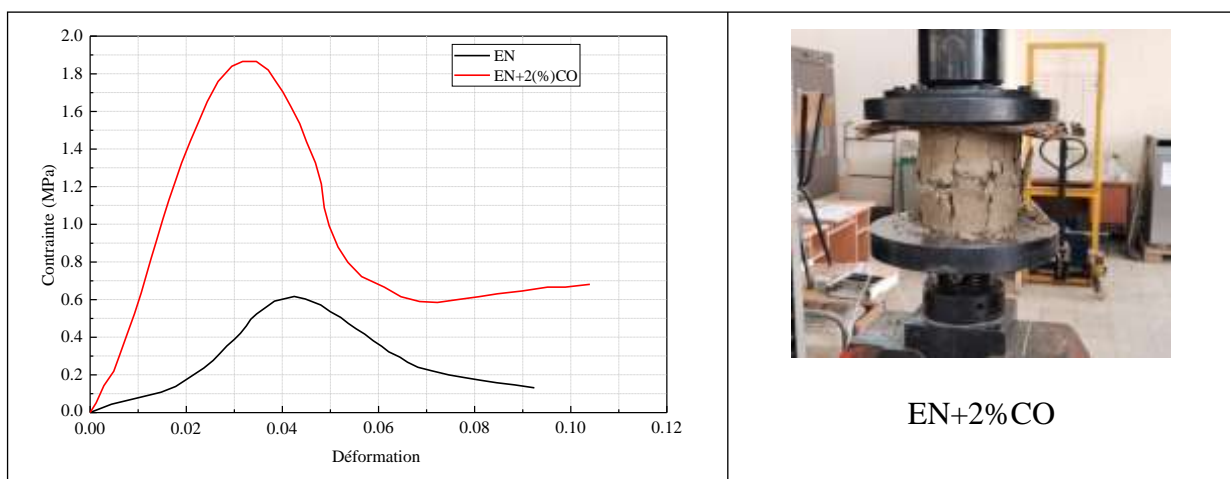


Figure V.2. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs.

V.3.3. Essai de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs

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 5% de coquilles d'œufs.

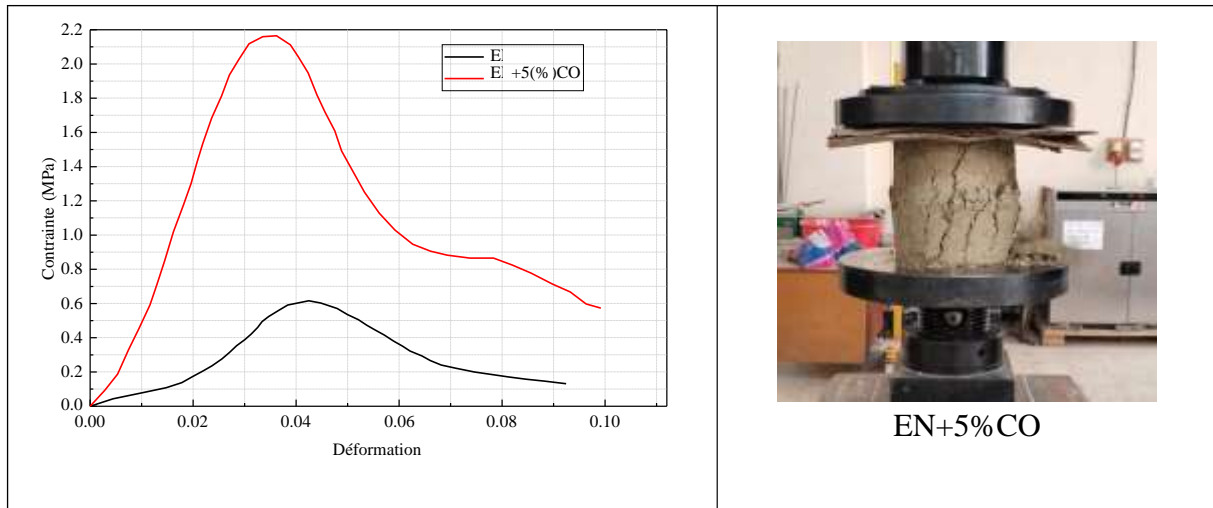


Figure V.3. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs.

V.3.4. Interprétation des résultats

Les essais de compression simple, montrent que l'ajout de coquilles d'œufs (CO) améliore significativement la résistance à la compression du sol naturel (EN). L'état naturel du sol présente une résistance maximale à la compression de 0.616 MPa. Avec l'ajout de 2% de CO, la résistance passe à 1.864 MPa, indiquant une amélioration notable. En augmentant à 5% de CO, la résistance atteint 2.165 MPa, soulignant une amélioration encore plus marquée. Ces résultats démontrent que les coquilles d'œufs renforcent efficacement le sol, augmentant sa résistance à la compression.

V.3.5. Essais de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs avec 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 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.

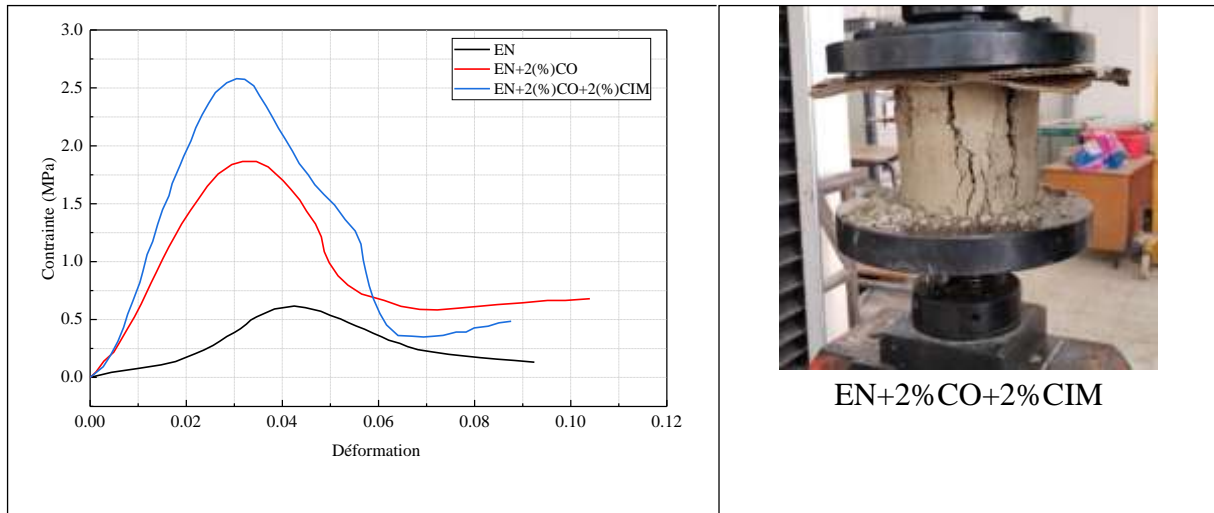


Figure V.4. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 2% de ciment

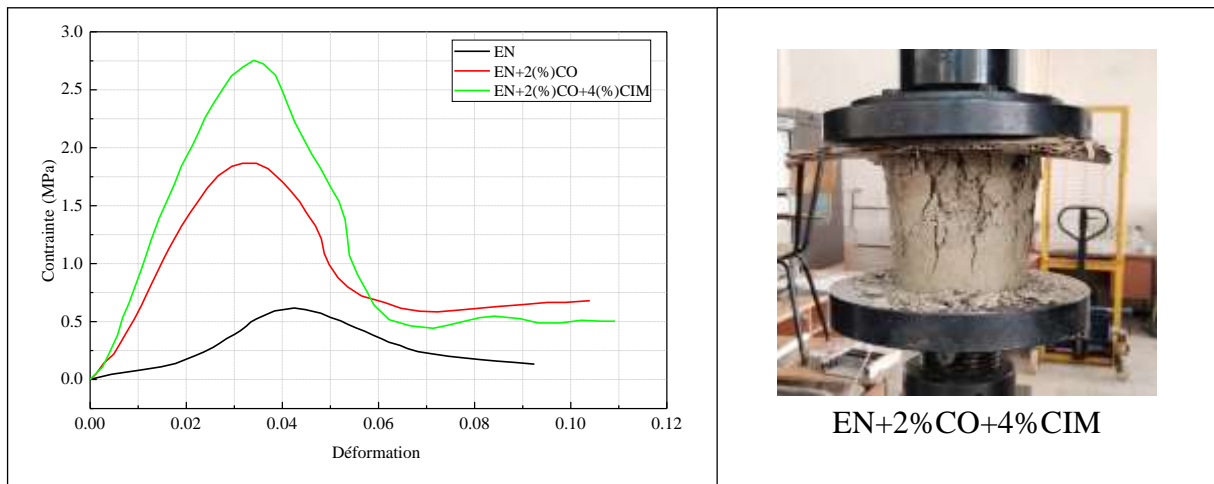


Figure V.5. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 4% de ciment

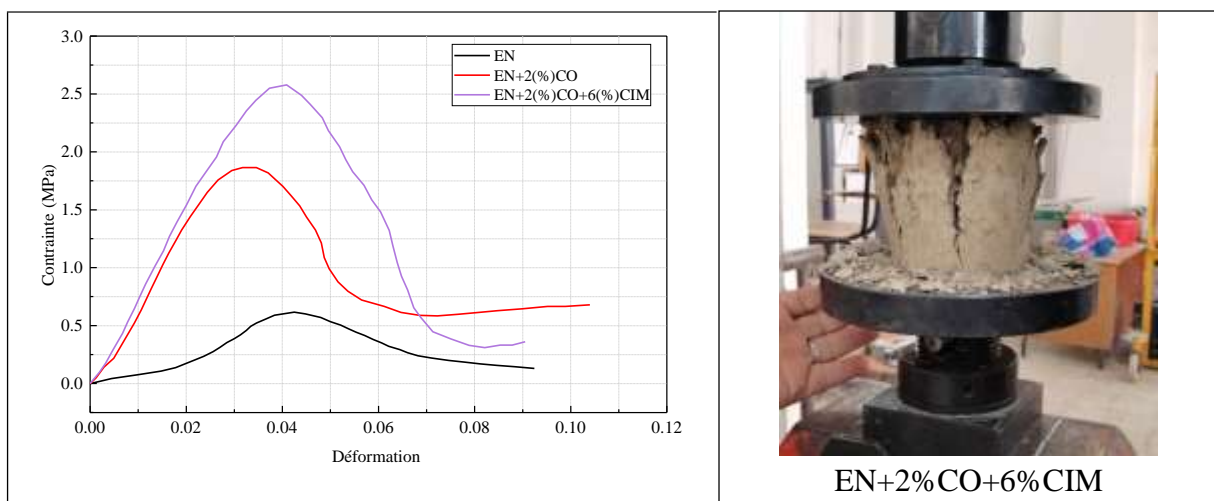


Figure V.6. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 6% de ciment

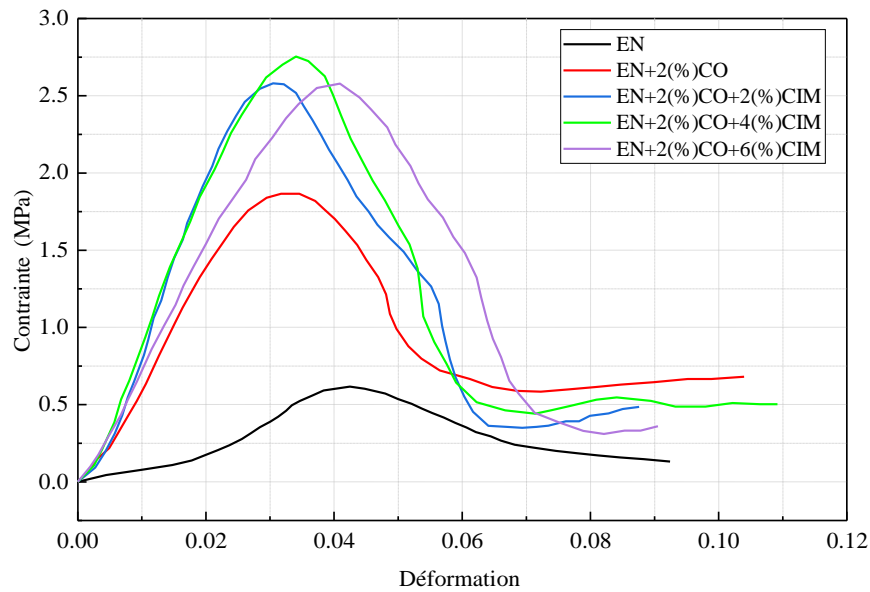


Figure V.7. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.

D'après cette figure, les essais avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et des pourcentages croissants de ciment (CI) montrent une amélioration de la résistance à la compression suivie d'une légère diminution. L'état naturel du sol a une résistance de 0.616 MPa. Avec 2% CO et 2% de ciment (CI), la résistance atteint 2.580 MPa, puis augmente à une valeur de 2.753 MPa avec 4% d'ajout de ciment (CI), montrant une amélioration substantielle. Cependant, à 6% d'ajout de ciment (CI), la résistance diminue légèrement à 2.577 MPa, suggérant qu'au-delà de 4% de ciment, l'ajout supplémentaire peut ne pas être aussi bénéfique pour la résistance à la compression.

V.3.6. Essais de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 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 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.

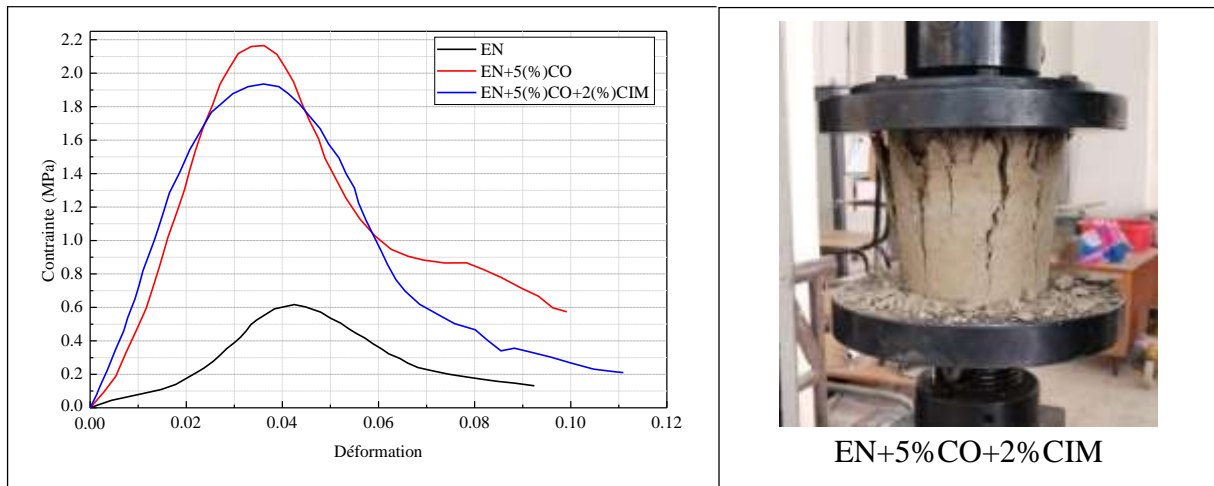


Figure V.8. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 2% de ciment

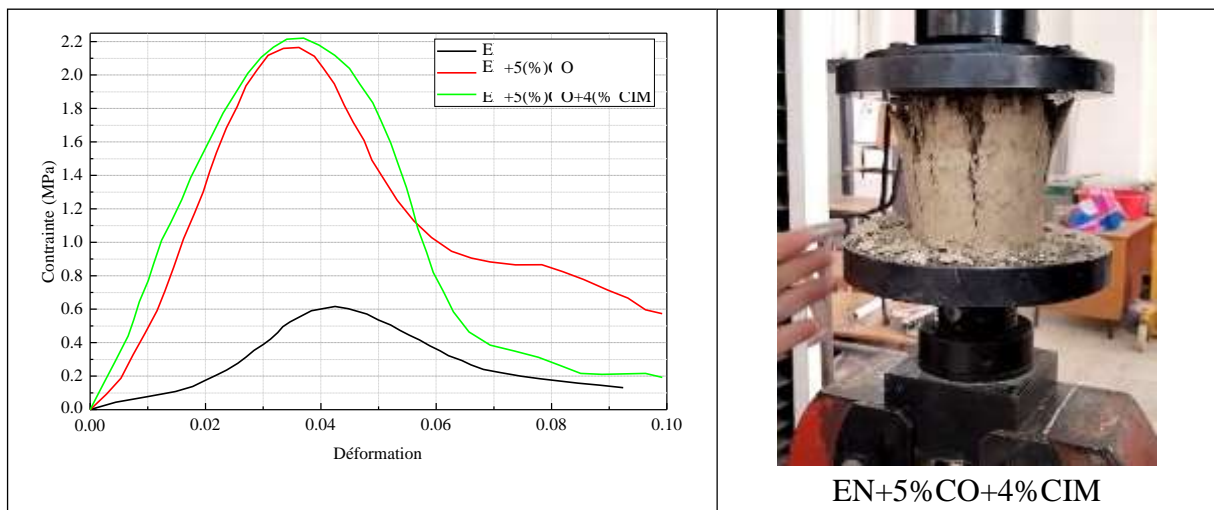


Figure V.9. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 4% de ciment

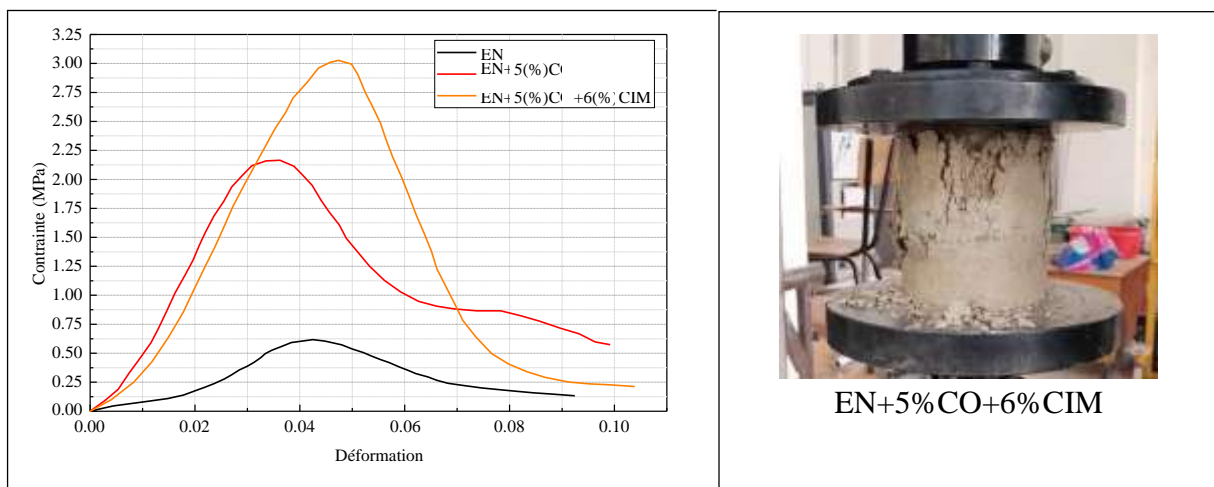


Figure V.10. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 6% de ciment

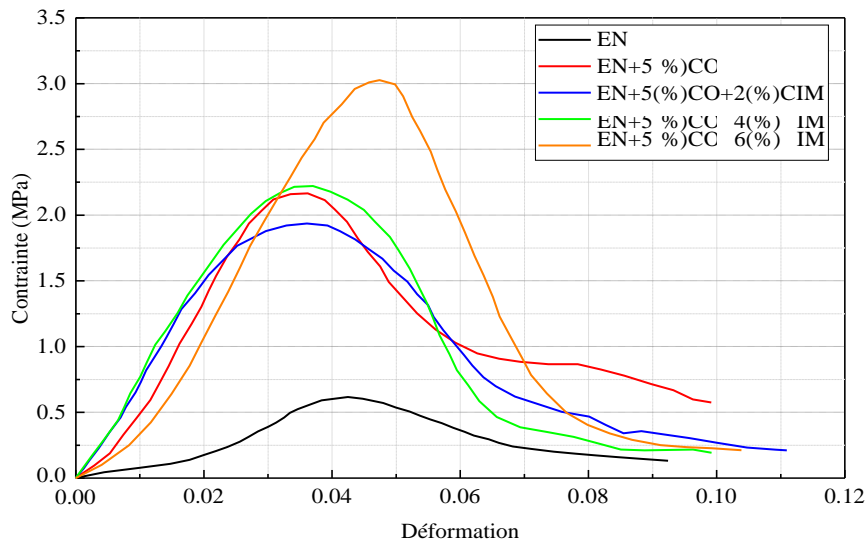


Figure V.11. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de ciment.

La figure V.11 montre que, les essais avec l'ajout de 5% de coquilles d'œufs et des pourcentages croissants de ciment montrent une tendance similaire. L'état naturel a une résistance de 0.616 MPa. Avec ajout de 5% de coquilles d'œufs (CO) et 2% de ciment (CI), la résistance est de 1.935 MPa, puis augmente à 2.220 MPa avec 4% d'ajout de ciment (CI). À 6% de ciment, la résistance atteint présente un pic de 3.026 MPa, ce qui est le plus élevé parmi tous les résultats obtenus lors des essais réalisés. Cela indique que l'ajout de 6% de ciment en combinaison avec 5% de coquilles d'œufs (CO) optimise la résistance à la compression du sol.

V.3.7. Essais de compression simple avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux

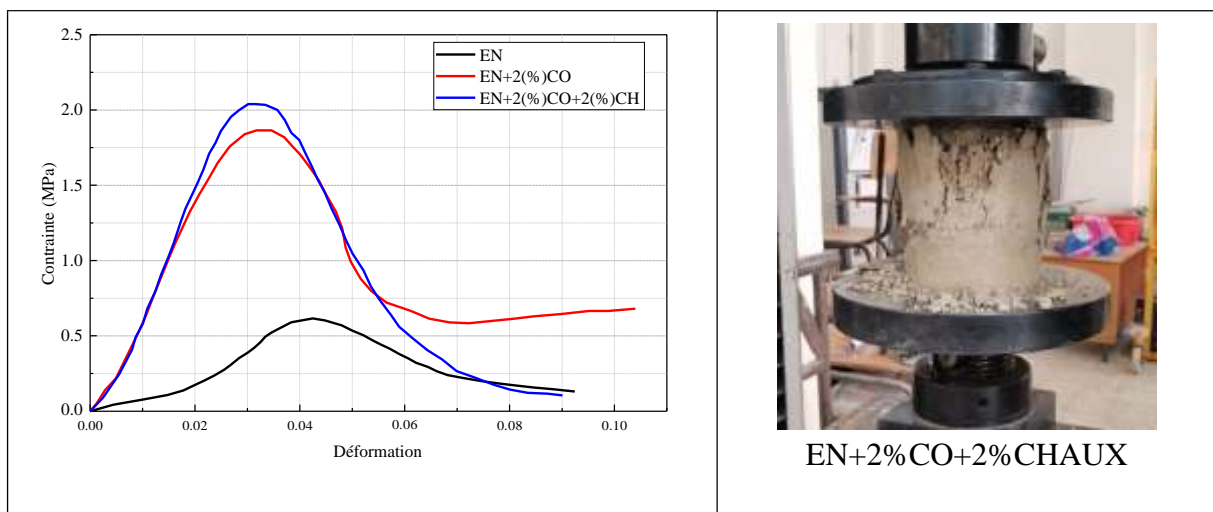


Figure V.12. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquille d'œuf et 2% de chaux

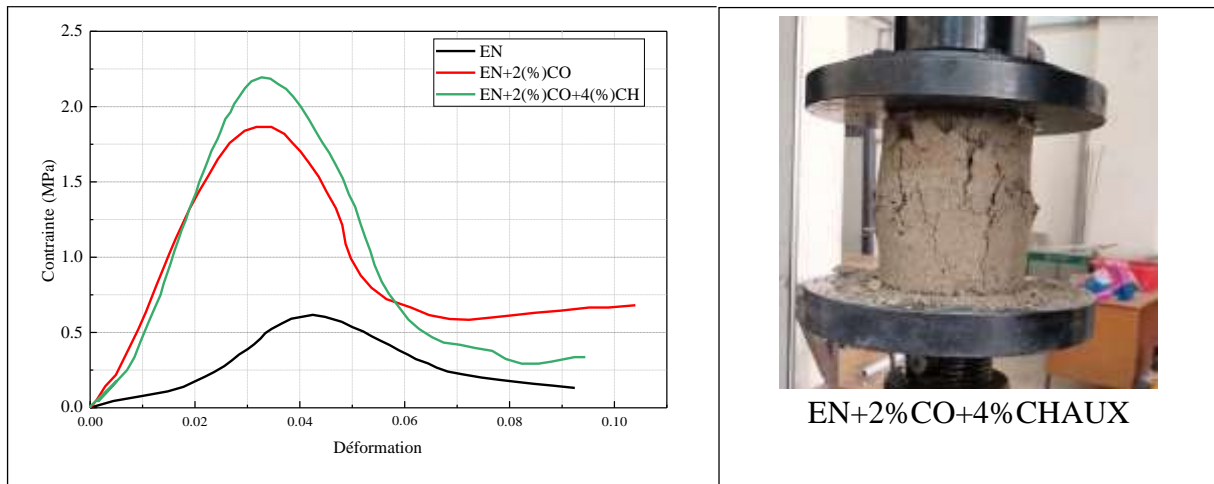


Figure V.13. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquille d’œuf et 4% de chaux

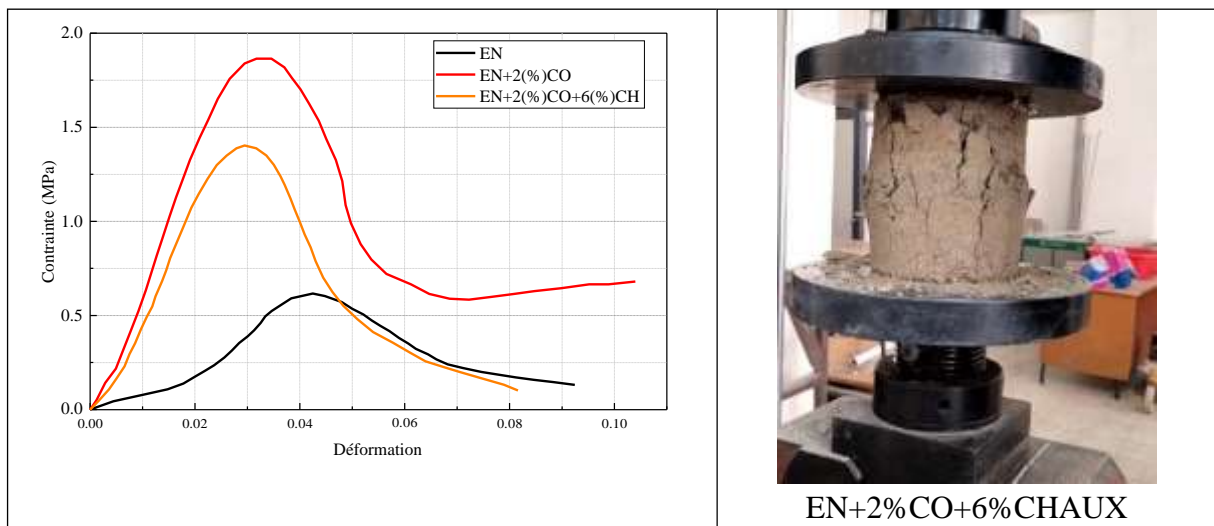


Figure V.14. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d’œufs et 6% de chaux

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 2% de coquilles d’œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.

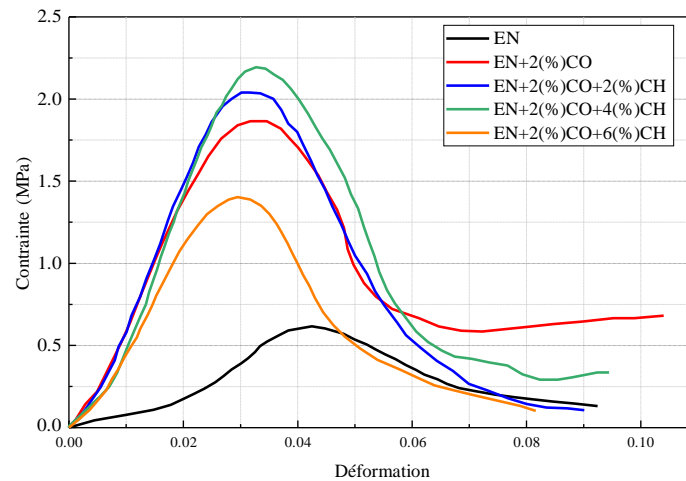


Figure V.15. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.

D'après la figure V.15, les essais avec ajout de 2% de coquilles d'œufs et différents pourcentages de chaux (CH) montrent des variations dans la résistance à la compression. L'état naturel a une résistance de 0.616 MPa. Avec 2% de coquilles d'œufs (CO) et 2% de chaux (CH), la résistance atteint une valeur de 2.039 MPa, augmentée jusqu'à une valeur de 2.194 MPa avec 4% d'ajout de chaux (CH). Cependant, avec 6% d'ajout (CH), la résistance diminue fortement pour atteindre une valeur de 1.403 MPa, suggérant qu'un excès de chaux peut affaiblir la structure du sol au-delà d'un certain point.

V.5.8. Essais de compression simple avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux

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 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.

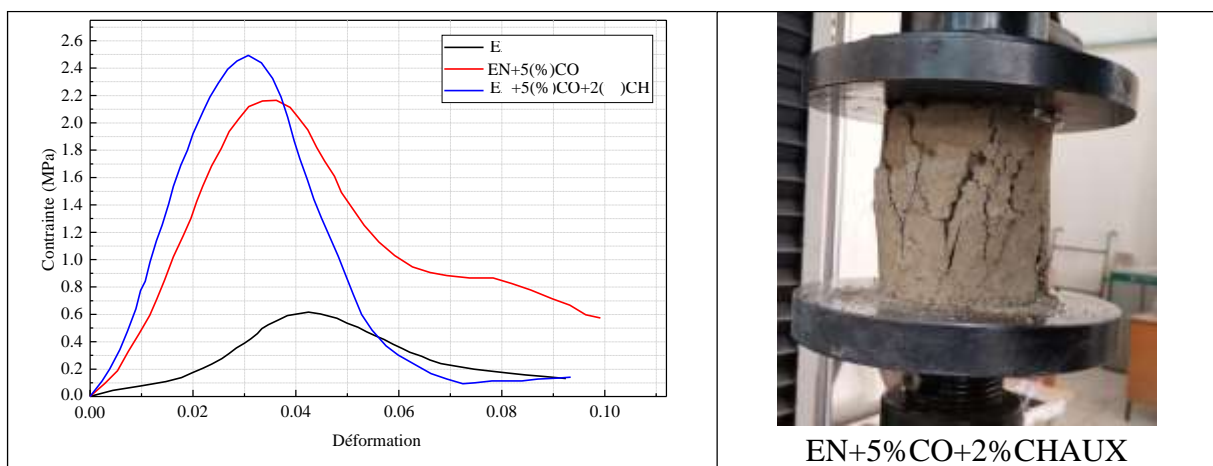


Figure V.16. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquille d'œuf et 2% de chaux

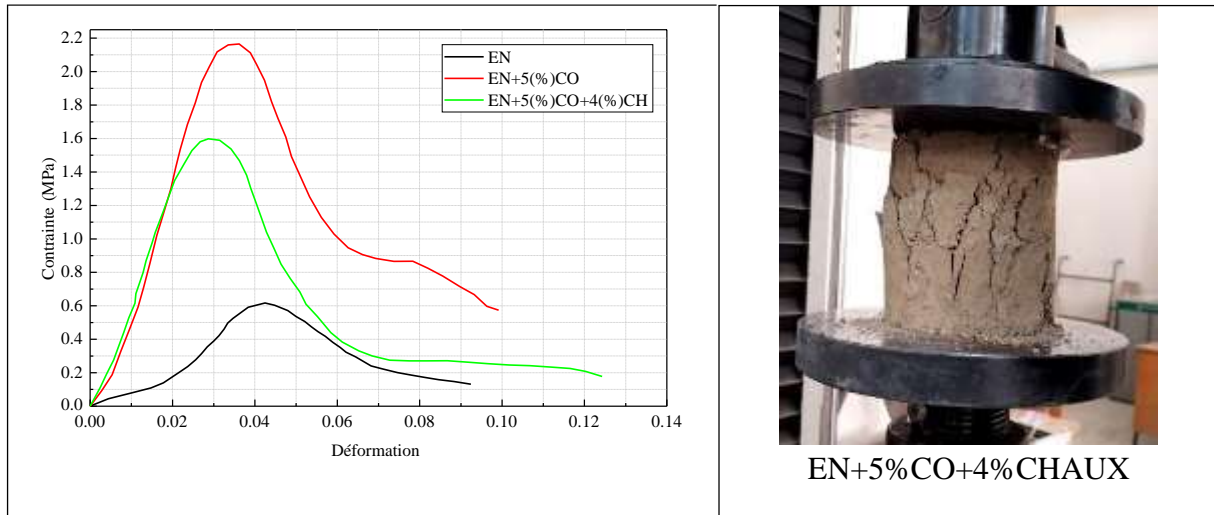


Figure V.17. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 4% de chaux

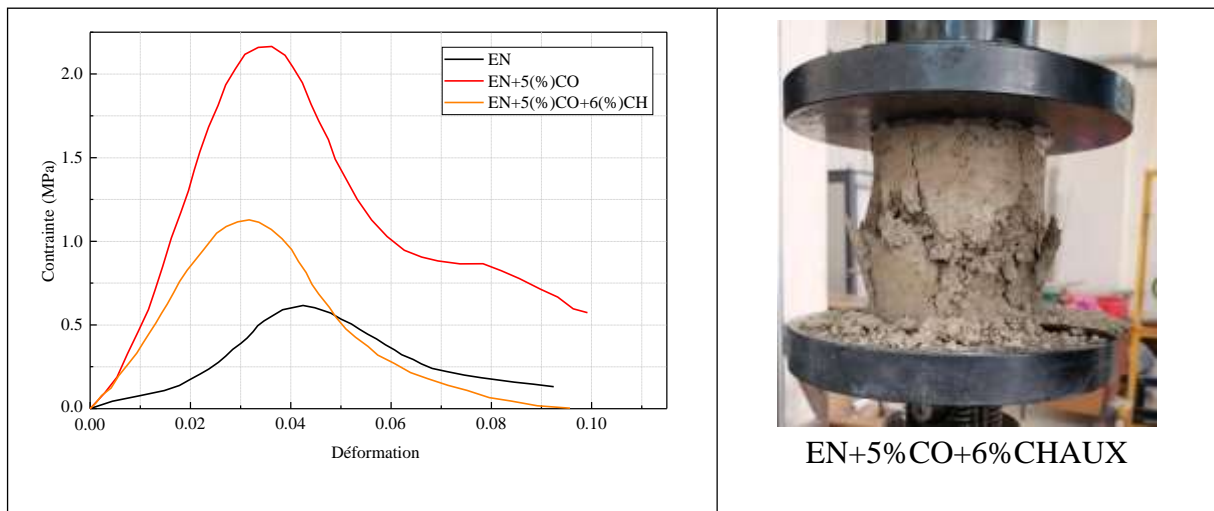


Figure V.18. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 6% de chaux

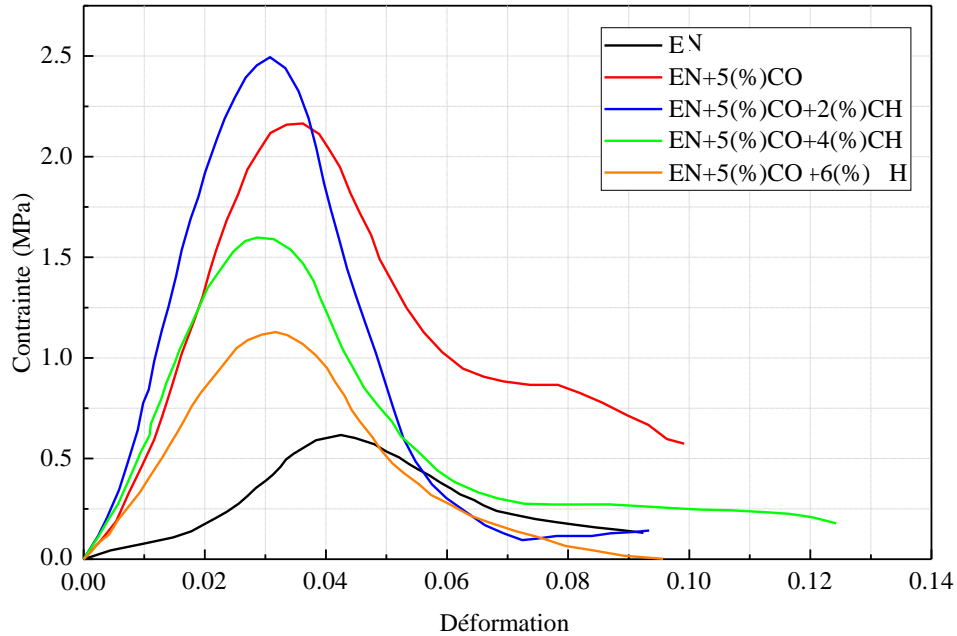


Figure V.19. Courbe de résistance à la compression (R_c) avec ajout de 5% de coquilles d'œufs et 2%, 4% et 6% de chaux.

La figure V.19 montre que, les essais avec 5% de coquilles d'œufs à différents pourcentages de chaux montrent des tendances variées. L'état naturel a une résistance de 0.616 MPa. Avec 5% de coquilles d'œufs (CO) et 2% de chaux (CH), la résistance atteint la valeur de 2.493 MPa, mais diminue pour atteindre une valeur de 1.597 MPa avec 4% d'ajout de chaux (CH) et à 1.128 MPa avec 6% d'ajout (CH). Cela indique qu'un ajout excessif de chaux réduit considérablement la résistance à la compression du sol, surtout à des niveaux élevés de chaux.

V.5. Conclusion

Les résultats des essais de compression simple, montrent que l'ajout de coquilles d'œufs, de ciment et de chaux améliore la résistance à la compression du sol naturel, mais ces améliorations dépendent des proportions spécifiques de chaque matériau ajouté. Les coquilles d'œufs, en combinaison avec des pourcentages optimaux de ciment ou de chaux, renforcent significativement le sol, augmentant sa densité et sa résistance. Cependant, des proportions excessives de ciment ou de chaux peuvent parfois réduire l'efficacité de ces améliorations. En général, la combinaison de ces matériaux offre une solution prometteuse pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux.

Conclusion générale

Le but de notre étude est, d'étudier l'effet combiné des coquilles d'œufs, du ciment et de la chaux sur les caractéristiques mécaniques d'une argile. Les différents échantillons du sol étudié, sont soumis à des essais d'identification et des essais mécaniques principalement, les essais de compactage avec le Proctor normal et les essais de compression simple, selon différents ajouts.

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

- Les essais Proctor ont démontré que l'incorporation de coquilles d'œufs, de ciment et de chaux à différents dosages influence de manière significative sur les propriétés mécaniques du sol argileux. La densité sèche du sol augmente progressivement avec l'augmentation des pourcentages de coquilles d'œufs, ce qui indique une amélioration du compactage et de la stabilité du sol.
- Les essais de compression simple ont révélé des variations selon les combinaisons d'ajouts. Par exemple, l'ajout de 5% de coquilles d'œufs présente une augmentation de la résistance à la compression avec le ciment, mais une diminution avec l'ajout de la chaux.
- Ces résultats mettent en évidence que les mélanges contenant 5% de coquilles d'œufs avec des proportions élevées de ciment sont les plus efficaces pour améliorer à la fois la densité et la résistance du sol argileux.
- L'ajout de la poudre de coquilles d'œufs aux différents échantillons étudiés influe positivement sur les propriétés mécaniques du sol stabilisé.

Références Bibliographiques

- [1] **Bergaya, F., Lagroix, F., & Désuire, G. (2013).** The Clay Mineral Society sourcebook: Clays and their applications. Elsevier.
- [2] **Bailey, S. W. (2016).** Structural evolution in smectites and implications for fate and transport of contaminants in the environment. *American Mineralogist*, 101(11-12), 2277-2303.
- [3] **Nesbitt, H. (2015).** Weathering of silicate minerals. In *A geochemical primer on weathering* (2nd ed. pp. 45-67). Elsevier.
- [4] **Drits, V., & Tchoubar, C. (2006).** X-ray diffraction of clays. In *Handbook of clay science* (Vol. 2, pp. 1-69). Elsevier.
- [5] **Wilson, M. J. (2013).** Clay mineral structures and their role in the environment. *Elements*, 9(3), 199-206.
- [6] **Wilson, M. J. (2020).** Clay mineral nomenclature: Proposal for a common nomenclature based on crystal structure and chemical composition. *Clays and Clay Minerals*, 68(4), 397-422.
- [7] **Bergaya, F., Lagroix, F., & Désuire, G. (2013).** The Clay Mineral Society sourcebook :Clays and their applications. Elsevier.
- [8] **Sparks, D. L. (2018).** Ion exchange. In *Soil chemistry* (pp. 45-67). Academic Press.
- [9] **Saéz, A., Tite, L., & McBride, M. B. (2004).** Review of mechanisms for metal sorption on clays. *Clays and Clay Minerals*, 52(2), 133-153.
- [10] **Ishikawa, T., & Nakano, M. (2015).** Water dynamics in clays: A review. *Clays and Clay Minerals*, 63(3), 235-255.
- [11] **Israelachvili, J. N. (2011).** Van der Waals forces. In *Intermolecular and surface forces* (pp. 275-300). Academic Press.
- [12] **Vermeer, G. T., & De Boer, R. (1983).** Double layer theory. In *Developments in Soil Science* (Vol. 8, pp. 1-262). Elsevier.
- [13] **Murakami, T. (2017).** Properties of clay minerals. In *Clay science for engineering: An introduction for practitioners and researchers* (pp. 25-50). Springer Singapore.
- [14] **Horn, R., & Vahaprekh, S. (2016).** Constitutive modeling of cohesive soils. In *Multiscale modeling of soil and rock behavior* (pp. 35-68). Springer International Publishing.
- [15] **Moore, D. M., & Reynolds, R. C. (1997).** Swelling and interlayer reactions. In *X-ray diffraction and the identification and characterization of clay minerals* (pp. 175-200). Clay Minerals Society.
- [16] **Barbier, F. (2005).** Propriétés mécaniques des sols. In *Fondations superficielles : Théorie et pratique* (pp. 45-68). Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [17] **Quashie, L. G. M. (2009).** Propriétés des sols argileux. In *Géotechnique des sols tropicaux* (pp. 25-45). Presses de l'Université Laval.
- [18] **Mey, F. (2007).** Géologie sédimentaire - Principes et processus. Dunod.
- [19] **Brice, J.-L., & Jezequel, F. (2004).** Mécanique des sols appliquée au génie civil. Éditions Eyrolles.
- [20] **Nicholson, P. G. (2014).** Soil improvement and ground modification methods. Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780124078994.

- [21] **Mendes, P. (2020).** Ground improvement techniques. In T. G. Sitharam, C. R. Parthasarathy, & S. Kolathayar (Eds.), *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics: IGC 2016 Volume 2* (pp. 35-43). Springer.
- [22] **Chen, W.F. (1991).** *The Civil Engineering Handbook*. CRC Press. ISBN: 9780849309588.
- [23] **Powrie, D. (2012).** *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. McGraw-Hill Professional.
- [24] **Poulsen, H.G., Andersen, J.B., & Springman, V.G. (2011).** *Thermal Methods in Geotechnical Engineering*. CRC Press.
- [25] **De Groot, J.L., & Balkema, H.H. (1991).** *Chemical Methods in Geotechnical Engineering*. CRC Press.
- [26] **Hager, W. H., & Bray, J. N. C. (2011).** *The engineering of large dams* (3rd ed.). CRC Press.
- [27] **Ladanyi, B. (2004).** *Freezing of soils*. John Wiley & Sons.
- [28] **Poulos, P. (2011).** *Ground improvement techniques*. CRC Press.
- [29] **McGregor, C. F., & Estabrook, J. E. (2017).** *Manual on soil and rock mechanics*. CRC Press.
- [30] **Jennings, J. E., Burland, J. B., & Potts, D. M. (1999).** *Ground engineering*. Spon Press.
- [31] **Emeriaud, F. (2017).** *Manuel de mécanique des sols et des roches*. Presses des Ponts.
- [32] **Bergquist, J. L., Langer, R. L., & Edgers, W. R. (2009).** *Lime stabilization in geotechnical engineering*. CRC Press.
- [33] **Rowe, R. K., & Carmichael, J. (2013).** *Use of waste materials in geotechnical applications*. CRC Press.
- [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)

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème

**Etude de l'effet combiné de la poudre de
coquilles d'œufs – ciment – chaux sur le
comportement mécanique d'une argile**

Présenté par :

CHIKH FATAH

Jury de soutenance :

M BOUDLAL O.	Président	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M ^{me} MEZIANI F.	Promotrice	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M ^{me} AIT BACHIR .	Examinatrice	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
M. TERBOUCHE F.	Invité	U. Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU

Année universitaire : 2023-2024