

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**  
**en génie civil**

**Option : Géotechnique**

**Etude de la durabilité des argiles stabilisées**  
**avec les déchets plastiques**

Présenté par :

BENHAOUARI Fatma Zohra

GUENACHA Imane

*Soutenu publiquement le 28/06/2025, devant le jury composé de :*

M. SARBAH Boumediene

Président

M. BEKKI Hadj

Encadrant

M<sup>elle</sup> RENNAK Zohra

Examineur

M<sup>me</sup> DRAOUI Aicha Zohra

Examineur

**Année universitaire : 2024/2025**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à dieu tout-puissant, qui nous a accordé la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur BEKKI.H pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que sa rigueur et sa persévérance tout au long de ce travail.*

*Nous remercions également l'ensemble de nos enseignants, qui ont su nous transmettre les bases solides de la science et ont contribué, chacun à sa manière, à notre formation.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail avec bienveillance et professionnalisme.*

*Nous tenons à saluer et remercier toute l'équipe du laboratoire des travaux publics de l'Ouest pour leur collaboration et leur assistance technique.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont*

*contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.*

## Dédicace

### GUENACHA Imène

Tout d'abord, je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie ce travail :

À mes chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect. Mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tous le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, puisse dieu. Le très haut. Vous accordez santé.

Le bonheur et longue vie.

À la mémoire de ma grand-mère bien-aimée,

Ce travail est dédié. Ton amour et ton soutien m'ont accompagnée tout au long de mon parcours, et je sais que tu es dière de moi aujourd'hui. Merci pout tout.

À Mon époux Khaled,

Chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves

Merci d'avoir été mon ange gardien. Cette réussite est aussi la-vous.

À mes merveilleux frères Mohamed et Ahmed,

Chacun de vos sourires a illuminé mon chemin

À ma sœur Nihal

Pour ses sentiments moraux

À ma chère binôme Fatima et toute sa famille.

Pour son entente et sa sympathie.

## Dédicace

**BENHAOUARI Fatima Zohra**

*Je dédie ce modeste travail:*

*À mon père et ma mère, pour votre amour inconditionnel, votre soutien sans faille, et vos prières constantes. Vous êtes la source de ma force et de ma réussite. Que Dieu vous protège et vous récompense pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*À mes frères et sœurs, pour votre affection, vos encouragements et votre présence précieuse tout au long de ce parcours.*

*À mes collègues de promotion, pour les moments partagés, l'entraide et la bonne ambiance tout au long de cette aventure universitaire.*

*Et spécialement à ma collègue et amie Geunacha Imane, avec qui j'ai partagé cette belle expérience de rédaction du mémoire. Merci pour ta collaboration, ton sérieux et ton amitié sincère.*

## Résumé

Les déchets plastiques représentent une menace majeure pour l'environnement, notamment en raison de leur longue durée de dégradation, pouvant atteindre plusieurs centaines d'années. Leur valorisation dans le domaine de la construction apparaît donc comme une solution à la fois écologique et innovante. Dans ce cadre, l'intégration de fibres plastiques issues de déchets pour renforcer les argiles traitées à la chaux s'est révélée intéressante, tant du point de vue de la portance que de celui de la résistance mécanique. Toutefois, pour envisager une application à l'échelle réelle, il est essentiel de vérifier la durabilité des matériaux renforcés, notamment leur comportement face aux cycles climatiques (alternances d'humidification et de séchage). Le présent travail porte sur une étude de durabilité d'une argile à faible performance géotechnique, stabilisée avec 3 % de chaux et renforcée par des fibres de déchets PVC de différentes tailles (1 à 4 mm) et à divers taux d'ajout (2 à 4 % en masse sèche). Les résultats ont montré que l'argile stabilisée uniquement à la chaux subit des dégradations rapides dès les premiers cycles humidification-séchage, avec un effondrement plus précoce que les mélanges renforcés par les fibres PVC. Il a également été mis en évidence que la durabilité des matériaux dépend à la fois du pourcentage et des dimensions des fibres utilisées, confirmant leur rôle clé dans l'amélioration du comportement à long terme des sols traités.

**Mots clés :** Argile, Stabilisation à la chaux, Déchets plastiques PVC, renforcement du sol, Essais de durabilité, cycles d'humidification et de séchage, développement durable

## Abstract

Plastic waste poses a significant threat to the environment, primarily due to its extremely long degradation period, which can extend over several hundred years. As such, its valorization in the construction sector emerges as a promising solution that is both ecologically responsible and technically innovative. In this context, the use of plastic fibers derived from waste materials to reinforce lime-treated clays has shown potential, particularly in improving both bearing capacity and mechanical strength. However, for the implementation of this technique at a real scale, it is crucial to assess the long-term durability of the reinforced materials, especially their performance under climate-induced stress, such as repeated wetting and drying cycles. This study focuses on the durability assessment of a low-performance clay, stabilized with 3% lime and reinforced with PVC waste fibers of varying lengths (1 to 4 mm) and dosages (2 to 4% by dry mass). The findings indicate that clay treated solely with lime is more prone to rapid degradation during early wetting-drying cycles and collapses more quickly compared to mixtures that include PVC fiber reinforcement. Moreover, the study highlights that the durability of the stabilized clay is highly dependent on both the fiber content and their dimensions, underlining the critical role of plastic fibers in enhancing the long-term stability and resilience of treated soils.

**Keywords:** Clay, Lime stabilization, PVC plastic waste, Soil reinforcement, Durability tests, Wetting-drying cycles, Sustainable construction materials.

## ملخص

تشكل النفايات البلاستيكية تهديدًا كبيرًا للبيئة، لأسباب ليس أقلها أنها تتدهور على مدى فترة زمنية طويلة - تصل إلى عدة مئات من السنين. وبالتالي فإن استعادة النفايات البلاستيكية لاستخدامها في صناعة البناء والتشييد هو حل صديق للبيئة ومبتكر في آن واحد. وفي هذا السياق، ثبت أن استخدام الألياف البلاستيكية من النفايات البلاستيكية لتقوية الطين المعالج بالجير مثير للاهتمام، سواء من وجهة نظر القدرة على التحميل أو القوة الميكانيكية. ومع ذلك، لتصور تطبيقها على نطاق واسع، من الضروري التحقق من متانة المواد المقواة، وخاصة سلوكها في مواجهة الدورات المناخية (التبلييل والتجفيف بالتناوب). تركز هذه الدراسة الحالية على متانة الطين ذي الأداء الجيوتقني المنخفض، والمثبتة بنسبة 3% من الجير والمدعمة بألياف نفايات PVC بأحجام مختلفة (من 1 إلى 4 مم) وبمعدلات إضافة مختلفة (من 2 إلى 4% من الكتلة الجافة). أظهرت النتائج أن الطين المثبت بالجير فقط يخضع للتدهور السريع منذ دورات الترطيب والتجفيف الأولى، مع انهيار مبكر مقارنةً بالمزيج المدعم بألياف PVC. كما اتضح أيضًا أن متانة المواد تعتمد على كل من النسبة المئوية للألياف المستخدمة وأبعادها، مما يؤكد دورها الرئيسي في تحسين السلوك طويل الأجل للتربة المعالجة.

### **الكلمات الرئيسية:**

الطين، تثبيت الجير، نفايات البلاستيك من البولي فينيل كلوريد، تعزيز التربة، اختبارات المتانة، دورات البلل والتجفيف، التنمية المستدامة.

## Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Introduction générale.....	01

### **Chapitre I**

#### **Stabilisation des Argiles**

I.1. Introduction .....	04
I.2.Définitions des sols argileux .....	04
I.3.Structures des argiles .....	04
I.3.1.Structure cristallographique .....	04
I.3.2.Structure microscopique .....	05
I.3.3. Structure macroscopique (texture) .....	05
I.4. Stabilisation des argiles .....	06
I.4.1.Objectives de la stabilisation.....	07
I.5.Comportement des argiles stabilisées .....	07
I.5.1.Comportement chimique .....	07
I.5.2.Comportement mécanique .....	07
I.5.3.Comportement volumique .....	08
I.5.4.Durabilité et comportement à long terme .....	08
I.6.Stabilité des ouvrages construit sur des sols argileux .....	08
I.6.1.Problèmes fréquents .....	08
I.6.2.Facteurs influençant la stabilité.....	09
I.6.3.Solutions pour améliorer la stabilité.....	09

I.7. Technique de stabilisation des sols argileux .....	09
I.7.1. Stabilisation mécanique.....	09
I.7.2. Stabilisation physico-chimique.....	10
I.7.3. Stabilisation par géo synthétiques.....	10
I.8. Méthodes d'amélioration des sols inadaptés à la construction.....	12
I.9. Déchets plastiques .....	13
I.10. Matériaux aptes au traitement .....	14
I.11. La stabilisation des sols .....	15
I.11.1. Role dans la construction.....	15
I.11.2. Techniques et matériaux de stabilisation .....	15
I.11.3. Stabilisation chimique.....	16
II.12. Évaluation et classification des sols :.....	16
I.12.1. Sols argileux .....	16
I.12.2. Sols sableux.....	16
I.12.3. Modification in situ des sols .....	17
I.13. Conclusion.....	17

## **Chapitre II**

### **Durabilité des argiles stabilisées**

II.1. Introduction .....	18
II.2. Techniques de Stabilisation .....	18
II.3. Définition de la durabilité .....	18
II.4. Objectif de la durabilité .....	19
II.5. Facteurs influençant la durabilité .....	19
II.5.1. Type de stabilisant .....	19
II.5.2. Dosage en liant .....	19

II.5.3.Cure /durcissement .....	19
II.5.4.Conditions environnementales .....	19
II.6.Indicateurs de durabilité .....	19
II.7. Améliorations Possibles .....	19
II.8. Durabilité des argiles avant et après traitement à la chaux et aux fibres plastiques....	19
II.8.1.Durabilité des argiles avant traitement .....	20
II.8.2.Traitement des argiles avec la chaux .....	20
II.8.3.Traitement des argiles avec fibres plastiques .....	20
II.8.4. Effets spécifiques .....	21
II.8.5.Traitement combiné.....	21
II.9.Stabilisateurs .....	21
II.9.1.Principaux stabilisateurs .....	21
II.9.2.Stabilisation à la chaux :.....	22
II.10.Mécanismes de stabilisation .....	2
II.10.1.Dessiccation .....	23
II.10.2.Échange cationique.....	23
II.11.Résultats et exemple d'application .....	24
II.11.1.Exemple pratique.....	24
II.11.2.Exemple pratique dans un pays arabe : Le cas du Maroc.....	24
II.11.3.Défis et perspectives futures.....	25
II.12. Conclusion .....	26

## **Chapitre III**

### **Présentation des essais**

III.1. Introduction.....	27
III.2. Matériaux utilisés.....	27

III.2.1 Matériau argile.....	27
III.2.2 La chaux.....	27
III.2.3 Les déchets de P.V.C.....	28
III.4. Etude expérimentale.....	29
III.5. Analyse chimique .....	29
III.5.1. Essais d'évaluation de taux de carbonates (NA-2789 , NF P94-048) .....	29
III.5.2. Essai bleu de méthylène (NF P94-068) :.....	31
III.5.3. Détermination de la teneur en sulfates (NA-16002-5042) .....	33
III.5.4. Essai pH-mètre.....	34
III.5.4.1. Objectif.....	34
III.5.4.2. Matériel utilisé.....	34
III.6. Analyse granulométrique.....	36
III.7. Limites D'Atterberg (NA 16213,NF P 94-051).....	38
III.8. Essai mécanique.....	40
III.8.1. Essai Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093) .....	40
III.8.2. Principe de l'essai.....	40
III.9. Essai durabilité.....	41
III.9.1. Mode opératoire.....	43
III.10. Conclusion.....	50

## **Chapitre IV**

### **Analyse et interprétation des résultats**

IV.1. Introduction.....	51
IV.2. Classification de sol .....	51
IV.3. Limites d'Atterberg.....	52
IV.4. Essais Proctor Normal.....	54

IV.5. Essais de durabilité .....	55
IV.5.1. 1ère série «Argile + 3% PVC».....	58
IV.5.1. 1ère série «Argile + 3% PVC».....	58
IV.5.2. 2ème série «Argile +3% chaux + 2% PVC».....	61
IV.5.3. 3ème série «Argile +3% chaux + 3% PVC».....	63
IV.5.4. 4ème série «Argile +3% chaux + 4% PVC».....	64
IV.6. Conclusion.....	66
Conclusions Générales.....	67
Références	

## **Liste des Figures**

### **Chapitre I**

#### **Stabilisation des Argiles**

Figure I.1: Représentation des tétraèdres et des octaèdres.....	06
FigureI.2: Travaux de stabilisation des sols dans la région de Redon.....	11
FigureI.3: Stabilisation de sols - Gutzwiller - Matériels forestiers et BTP en Alsace.....	11
Figure I.4: La chaux dans la stabilisation des sols.....	12
FigureI.5 :Collecte, tri et recyclage de déchets plastiques dans les Vosges.....	14
Figure I.6. : Le cycle du recyclage du PVC – Paprec.....	14

### **Chapitre II**

#### **Durabilité des argiles stabilisées**

Figure II.1 :Maison sur sol argileux.....	23
Figure II.2: Zone d'extraction des argiles destinées à la stabilisation.....	26
Figure II.3: Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite sans fondations suffisantes sur un sol argileux.....	26

### **Chapitre III**

#### **Présentation des essais**

Figure III.1: Echantillon du sol argileux.....	27
Figure III.2 : Echantillon de la chaux vive de SAIDA.....	28
Figure III.3: les fibres plastiques : (a) fibres PVC avant tamisage ; (b) fibres PVC après tamisage.....	28
Figure III.4. Etude expérimentale.....	29
Figure III.5. Analyse chimique .....	29
Figure III.5.1. Essais d'évaluation de taux de carbonates (NA-2789 , NF P94-048) .....	29
Figure III.4: Essai de détermination de taux de carbonates : (a) préparation des échantillons ; (b) ajout de la solution d'HCL à l'échantillon ; (c) mesure de taux de carbonates.....	30

Figures III.5 : Etapes de l'essai de bleu de méthylène : (a) Appareil d'essai ; (b) malaxage de l'échantillon avec la solution bleu de méthylène ; (c) et (d) : Prélèvement d'échantillons pour vérification.....	32
FigureIII.6: Résultats de l'essai VBS se forme d'histogrammes.....	33
Figure III.7 : Mesure de pH du sol par pH-mètre.....	35
Figure III.8 : évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée.....	36
Figure III.9: Série de tamis pour l'essai granulométrie par tamisage.....	37
Figure III.10 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	38
Figure III.11: Etapes de détermination de la limite de liquidité :	
(a) Malaxage du sol à la teneur en eau sélectionnée ; (b) Remplissage de la boîte de Casagrande ; (c) Application de coups.....	39
Figure III.12: Détermination de la limite de plasticité : (a) Préparation des bâtons ; (b) test. ....	39
Figure III.13: Etapes de l'essai Proctor ; (a): Dame Proctor ; (b): Moule Proctor ; (c)et(d): mélange échantillon + P.V.C+ CHAUX.....	41
Figure III.14: les moyens utilisés pour l'essai durabilité : (a) enceinte climatique ; (b) pied à coulisse ; (c) brosse métallique ; (d) balance ; (f) étuve.....	42
Figure III.15 : Réalisation des éprouvettes pour les essais de durabilité.....	44
Figure III.16 : Préparation deux éprouvettes (E1 et E2).....	44
Figure III.17 : Mise à l'enceinte climatiques des éprouvettes pendant 7 jours.....	45
Figure III.18 : Eprouvettes sorties de l'enceinte climatique après 07 jours.....	45
FigureIII.19 : Mise des éprouvettes E1 et E2 dans un bain-marie pendant 5 heures.....	46
Figure III.20: Prise de de poids.....	46
Figure III.21 : Mesure des dimensions des éprouvettes E1 après bain-marie.....	47
Figure III.22 : Deuxième éprouvette E2 après bain de marie.....	47
FigureIII.23 : Etapes de l'essai de séchage.....	48
Figure III.24 : après avoir passé 42 heures.....	48

Figure III.25 : prendre des mesures des éprouvette « le poids » : (a) E1 argile+3%chaux ; (b) E2 argile+3% chaux.....	49
FigureIII.26 : Applique 02 coups sur la surface latérale et les 02 faces de l'échantillon E2. .....	49

## **Chapitre IV**

### **Analyse et interprétation des résultats**

Figure IV.1 : Courbe granulométrique de l'argile (tamisage par voie humide et sédimentométrie).....	51
Figure IV.2 : Courbe résulte de (DRX).....	52
Figure IV.3 : Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges argile –chaux .....	53
Figure IV.4 : Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges «argile-PVC» .....	54
Figure IV.5 : Histogrammes représentant les limites d'Atterberg de différents mélanges «Argile-Chaux-PVC».....	55
Figure IV.6 : Résultats de l'essai Proctor sur les différents mélanges «argile-chaux» (Guezzoul et Cherrak, 2024).....	56
Figure IV. 7 : Résultats de l'essai Proctor sur les différents mélanges «argile-PVC» (Guezzoul et Cherrak, 2024).....	56
Figure IV.8 : Résultat de l'essai Proctor réaliser sur les différents mélanges contenant la chaux et PVC (Guezzoul et Cherrak, 2024).....	57
Figure IV.9 : Résultats de l'essai Proctor pour les différents mélanges contenant la chaux et 2% PVC.....	57
Figure IV.10 : Résultat de l'essai Proctor pour les différents mélanges contenant la chaux et 4% PVC.....	58
Figure IV.11 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% PVC.....	60
Figure IV.12 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% PVC. .....	61
Figure IV.13 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% PVC.....	61

Figure IV.14 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.....	62
Figure IV.15 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.....	62
Figure IV.16 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.....	63
Figure IV.17 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.....	63
Figure IV.18 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.....	64
Figure IV.19 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.....	64
Figure IV.20: Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.....	65
Figure IV.21 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.....	65
Figure IV.22 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.....	66

### **Liste des tableaux**

Tableau IV.1 : résultats d'essai d'identification de l'argile naturelle.....	52
Tableau IV.2 : Images des éprouvettes prises lors de 3 premiers cycles.....	58
Tableau IV.3 : Images des éprouvettes prises lors des cycles 4 à 6.....	59

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le traitement des sols argileux est une pratique ancienne et largement répandue à travers le monde, notamment dans les projets de génie civil, en particulier les travaux routiers (remblais, couches de forme, assises d'autoroutes, de routes, de voies ferrées, etc.). Ce traitement permet de réduire les dégradations causées par le gonflement et les faibles performances mécaniques des sols argileux sensibles à l'eau. Par ailleurs, le traitement des sols permet d'élargir les possibilités de réutilisation des matériaux in situ, ce qui répond aux exigences du développement durable en réduisant les transports de matériaux, leurs prélèvements, ainsi que l'énergie associée.

De nombreuses méthodes ont été développées afin d'améliorer les propriétés physiques des sols en y incorporant divers agents stabilisants, comme les additifs. L'efficacité de ces agents repose sur la création de liaisons de cimentation entre les particules du sol. Les deux agents les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux. Toutefois, les conditions climatiques peuvent influencer le comportement des sols stabilisés, ainsi que les méthodes d'exécution.

La chaux, en tant qu'additif, permet d'apporter plusieurs améliorations notables aux propriétés du sol, notamment en termes de résistance. La stabilisation du sol par la chaux se réalise à travers différents mécanismes : l'échange cationique, la floculation, l'agglomération et la réaction pouzzolanique. Les réactions d'échange cationique ainsi que la floculation et l'agglomération se déclenchent rapidement, entraînant une modification immédiate des propriétés du sol. En revanche, la réaction pouzzolanique est plus lente, nécessitant plusieurs jours à température ambiante pour que ses effets deviennent perceptibles.

Ces réactions reposent sur l'interaction entre la silice et/ou l'alumine du sol avec la chaux, générant différents types d'agents de cimentation qui renforcent la résistance du sol. Ces transformations chimiques modifient la structure du sol en favorisant la formation d'agrégats plus volumineux, ce qui représente un atout majeur pour la stabilisation des sols dans le domaine routier. Certaines substances naturelles, comme les cendres volcaniques, réagissent mieux avec la chaux que les sols classiques (Hossain, 2007). Lorsqu'on ajoute de tels matériaux au sol, l'efficacité de la chaux dans la stabilisation peut être considérablement améliorée.

Récemment, des sous-produits industriels sont aussi incorporés aux sols argileux avec la chaux afin d'en améliorer les propriétés, comme l'ajout d'adjuvants de cimentation (ex. :

endres volantes, fumée de silice, déchets de chaux), pour leurs avantages environnementaux et économiques.

Des recherches montrent que la résistance au cisaillement et à la compression des sols argileux peut être améliorée grâce à l'ajout d'additifs de cimentation. Par ailleurs, la stabilisation des sols est fortement renforcée lorsqu'on combine la chaux avec ces additifs. D'autres études ont également observé que la maniabilité et la résistance des sols sont nettement accrues grâce à un traitement combiné.

La résistance et la durabilité sont les deux principales propriétés utilisées pour évaluer les performances mécaniques des mélanges sol-ajouts. La durabilité, définie comme la capacité d'un matériau à conserver sa stabilité et son intégrité sous des conditions climatiques extrêmes sur une longue période, est une caractéristique essentielle. Les sols stabilisés doivent donc résister aux charges physiques dans divers environnements climatiques. Ils doivent conserver leur stabilité malgré des changements environnementaux cycliques, qui peuvent entraîner une perte de poids et affaiblir leur structure. Il est donc important de déterminer si un traitement combiné à base de chaux et de pouzzolane naturelle permet de compenser les faiblesses de chaque composant et d'améliorer la performance globale du sol.

Plusieurs recherches ont été menées afin de mieux comprendre la durabilité des sols argileux stabilisés à l'aide de la chaux et/ou des cendres volantes. Toutefois, les études portant sur les effets des facteurs environnementaux, notamment les cycles de saturation-séchage, sur les caractéristiques mécaniques (comme la résistance à la compression) des sols argileux traités à la chaux restent très limitées, aussi bien à court qu'à long terme.

Le but de cette étude est d'examiner la viabilité de la stabilisation de cette argile en utilisant un traitement chimique à la chaux avec des renforts en fibres plastiques (déchets de PVC). Les différents mélanges composés d'argile, de chaux et de fibres plastiques à différentes tailles et proportions feront l'objet d'essais de portance (Proctor et CBR) et d'essais mécaniques afin de déterminer la composition du mélange donnant les meilleures propriétés géotechniques.

### **Problématique :**

Les déchets plastiques peuvent-ils être utilisés comme stabilisants pour améliorer la durabilité des sols argileux ?

C'est à cette question que nous chercherons à répondre à travers cette étude. Nous nous appuierons pour cela sur des recherches antérieures et sur une analyse approfondie des performances mécaniques et durables des argiles traitées à l'aide de différents types de déchets plastiques, dans une optique de valorisation des déchets et de développement durable.

**Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres :**

**Le Chapitre 01** est consacré à l'étude de la stabilisation des sols argileux.

**Le Chapitre 02** est durabilité des argiles stabilisées.

Dans **le chapitre 03**, on présentera les différents essais réalisés dans le cadre de cette étude. Il s'agit des essais d'identification, de portance et mécaniques.

**Le chapitre 04** Sera consacré à la présentation et l'analyse des résultats trouvés.

Nous conclurons notre mémoire par des conclusions générales tirées de cette étude et proposerons des perspectives pour des recherches futures.

# **CHAPITRE I**

## **STABILISATION DES**

## **ARGILES**

## **I.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les matériaux à base d'argile, souvent désignés sous le terme « argiles ». Nous commencerons par exposer les principales caractéristiques de ces matériaux, leurs propriétés, leur comportement ainsi que leurs domaines d'application. Ensuite, nous aborderons les différentes méthodes utilisées pour stabiliser ces matériaux.

## **I.2. Définitions des sols argileux :**

Les sols argileux peuvent être définis de manière simple comme des sols fins. Plastiques et cohésifs, sensible à l'humidité et composés majoritairement de particules d'argile de très petite taille, Cependant, dans un cadre plus technique. En géotechnique, les sols argileux correspondent à un type de roche, un ensemble de particules minérales fines, une classe de sols selon leur granulométrie, ou même un matériau utilisé en construction.

## **I.3. Structures des argiles :**

La structure des argiles peut être comprise à plusieurs niveaux : cristallographique, microscopique et macroscopique. Voici un résumé clair avec des références.

### **I.3.1 Structure cristallographique :**

Les argiles sont principalement constituées de phyllosilicates, qui sont des minéraux en feuillets. Chaque feuillet est formé par l'empilement de couches tétraédriques ( $\text{SiO}_4$ ) et octaédriques ( $\text{Al}(\text{OH})_6$  ou  $\text{Mg}(\text{OH})_6$ ).

### **Les trois grands types de structures :**

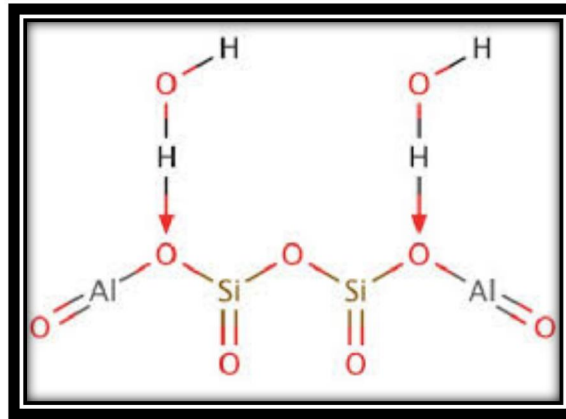
1: Une couche tétraédrique +

une couche

octaédrique.

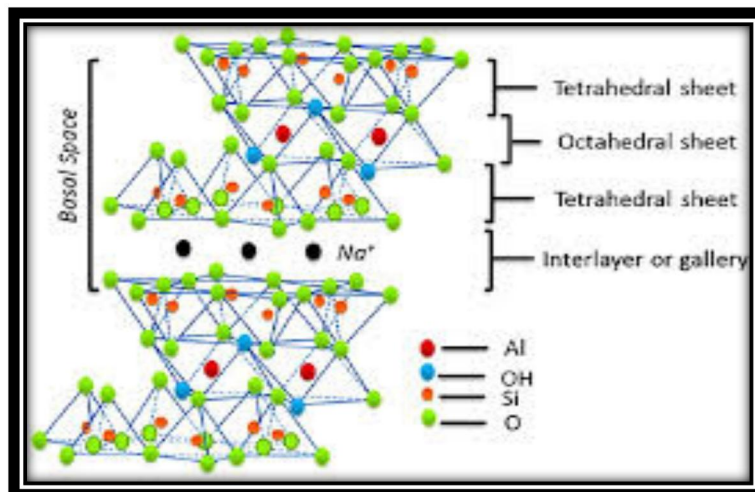


→ Ex : Kaolinite [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ]



2:(smectite, illite, montmorillonite) : Deux couches tétraédriques entourant une couche octaédrique.

→ Ex : Montmorillonite  $[(Na, Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O]$



2 (chlorite) : Comme 2 :1 mais avec une couche octaédrique supplémentaire entre les feuillets.

### **I.3.2. Structure microscopique :**

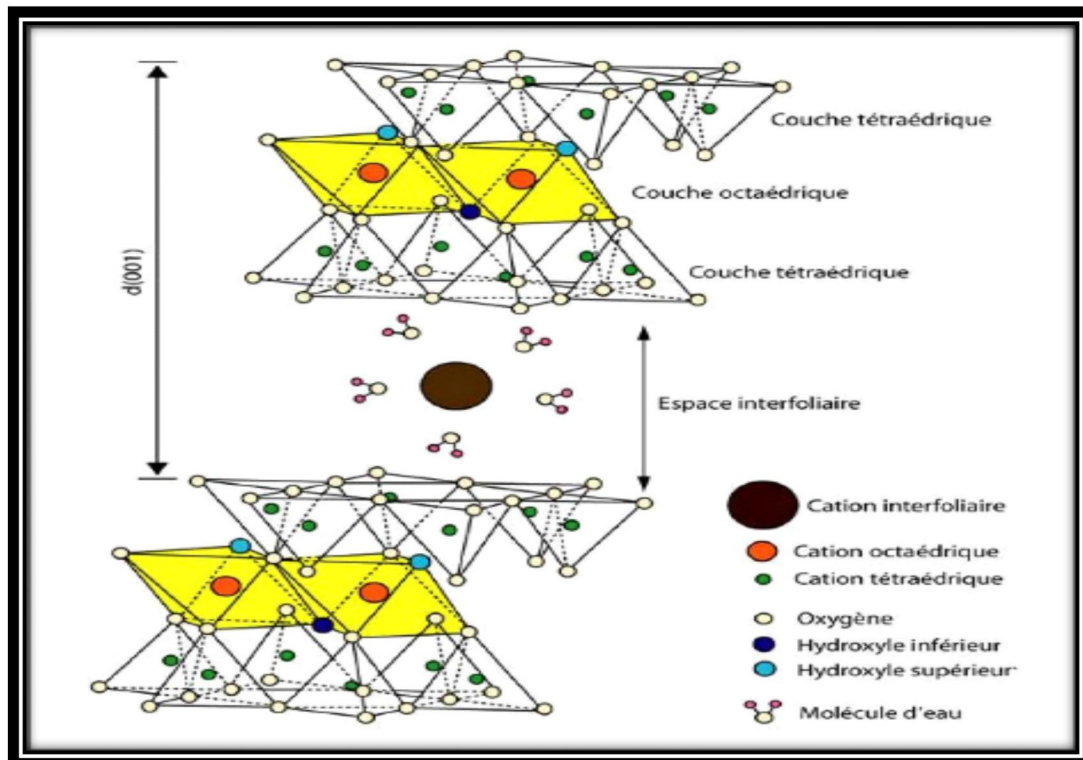
Empilement de particules : Les particules d'argile ont une forme lamellaire (en feuillets).

Organisation : Peut-être dispersée, floculée, ou compacte, selon la concentration en ions et le pH du milieu.

### **I.3.3 Structure macroscopique (texture) :**

Texture orientée : En sols compressés ou sédimentés, les feuillets ont tendance à s'aligner horizontalement.

Effets hydriques : Les argiles peuvent gonfler ou se rétracter en fonction de la teneur en eau, particulièrement les smectites.



**Figure I.1:** Représentation des tétraèdres et des octaèdres

Les argiles présentent un comportement complexe dû à leur structure fine et leur forte sensibilité à l'eau. Constituées de minéraux en feuillets, elles ont la capacité d'absorber l'eau, ce qui peut entraîner un gonflement, et de se rétracter en séchant. Ce comportement hydrique influence directement leur plasticité, leur cohésion et leur résistance mécanique. Très peu perméables, les argiles se consolident lentement sous une charge, ce qui peut provoquer des tassements différés dans les ouvrages. Leur résistance au cisaillement dépend fortement de leur teneur en eau, rendant leur stabilité parfois difficile à garantir, notamment en conditions saturées. Certains types d'argiles, comme la smectite, sont particulièrement instables et peuvent poser de sérieux problèmes en génie civil. Ainsi, une bonne connaissance du comportement des argiles est essentielle pour prévenir les risques de mouvements de terrain et assurer la durabilité des infrastructures.

#### **I.4. Stabilisation des argiles :**

La stabilisation des argiles est une technique visant à améliorer les propriétés mécanique et physico-chimique de ces sols, souvent considérés comme problématiques en génie civil. Elle consiste à ajouter des liants (comme la chaux, le ciment ou des produits

industriels) afin de réduire leur plasticité, augmenter leur portance, et limiter leur gonflement en présence d'eau. Cette méthode permet ainsi d'assurer une meilleure stabilité et durabilité des ouvrages construits sur ces sols.

### **1. Objectives de la stabilisation :**

L'objectif principal de la stabilisation est d'améliorer la performance mécanique et la durabilité des sols argileux cela inclut :

- L'augmentation de la capacité portante du sol.
- La réduction de la plasticité et de l'indice de gonflement.
- L'amélioration de la résistance à l'eau et au gel.
- La limitation des déformations à long terme.

### **1.5. Comportement des argiles stabilisées :**

La stabilisation des argiles modifie profondément leur comportement. Ces changements sont d'une importance capitale dans les projets de génie civil ils permettent d'utiliser des sols auparavant considérés comme-inadéquats pour la construction.

#### **1. Comportement chimique :**

L'ajout de liants (chaux. Ciment. Cendres volante.etc) entraîne des réactions chimiques notamment la floculation et l'agglomération des particules argileuses. Ces réactions réduisent la plasticité et améliorent la texture du sol facilitant ainsi le compactage et la mise en place (bell ,1996).

#### **2. Comportement mécanique :**

Le traitement des argiles par la stabilisation augmente la résistance mécanique du sol. La résistance à la compression simple (peut tripler ou quadrupler en fonction du type et de la quantité de liant utilisé, ainsi que du temps de cure (Sherwood ,1993). De plus, la cohésion du sol augmente, tandis que son comportement devient moins dépendant de la teneur en eau.

### **3. Comportement volumique :**

Les argiles naturelles sont sujettes à des gonflements et des retraits en fonction des variations hydriques. La stabilisation réduit significativement ces phénomènes en argile (Gourc&Albergel,2003).Cela se traduit par une meilleure stabilité dimensionnelle et une réduction des fissures dans les ouvrages.

### **4. Durabilité et comportement à long terme :**

Avec le temps les réactions pouzzolaniques entre les composants du sol et les liants produisent des gels cimentaires (C-S-H,C-A-H) qui améliorent la cohésion du sol et sa résistance à l'eau. Cela rend les sols stabilisés durables, même en conditions climatiques difficiles (Cousin et al,2003).

## **I.6. Stabilité des ouvrages construit sur des sols argileux :**

La construction sur des sols argileux pose de nombreux défis en raison du comportement particulier de ces sols. Leur forte plasticité leur capacité de rétention d'eau, et leur tendance au gonflement et au retrait rendent la stabilité des ouvrages vulnérable, surtout en cas de variations hydriques saisonnières.[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).

### **I.6.1. Problèmes fréquents :**

Les argiles, en particulier les argiles expansives comme la montmorillonite, peuvent subir des variations volumétriques importantes :

- **Retrait en période sèche:** apparition de fissures dans les fondations et les structures.
- **Gonflement en période humide :** soulèvement différentiel des fondations, instabilité des dallages.

### **Les phénomènes entraînent :**

- Des fissurations dans les murs et les planchers.
- Des affaissements ou soulèvements non uniformes.
- Une dégradation progressive de la structure.

### **I.6.2. Facteurs influençant la stabilité**

La stabilité dépend de plusieurs paramètres :

- **Profondeur des fondations** : des fondations peu profondes sont plus exposées aux mouvements du sol.
- **Teneur en eau du sol** : elle influence directement le volume de l'argile.
- **Conditions climatiques** : alternance de sécheresse et de pluie amplifie les cycles de retrait/gonflement.

### **I.6.3. Solutions pour améliorer la stabilité**

Pour garantir la stabilité des ouvrages construits sur des sols argileux, plusieurs mesures peuvent être adoptées :

- **Stabilisation du sol** par chaux, ciment ou géotextiles pour réduire la plasticité et le gonflement.
- **Utilisation de fondations profondes**(pieux, micropieux) pour atteindre des couches plus stables.
- **Gestion des eaux** autour du bâtiment pour éviter l'humidification excessive du sol.
- **Barrières anti-humidité** ou **dalles flottantes** pour limiter l'effet des variations volumétriques.

## **I.7. Technique de stabilisation des sols argileux :**

La stabilisation des sols argileux est une étape essentielle pour améliorer leurs performances mécaniques et leur durabilité, en particulier avant la construction d'ouvrages de génie civil. Il existe plusieurs techniques, classées généralement en méthodes mécaniques, physico-chimiques, et géo synthétiques. Bell, F. G. (1996)

### **I.7.1. Stabilisation mécanique**

Cette technique consiste à modifier la structure du sol par compactage ou mélange avec des granulats plus stables (sable, gravier).

- **Compactage dynamique ou statique** : augmente la densité du sol, diminue sa porosité.
- **Remblaiement ou substitution partielle** : remplacement d'une partie du sol argileux par un matériau plus résistant.

**Avantages** : rapide, peu coûteux.

**Inconvénients**: efficacité limitée dans les sols très plastiques.

### **I.7.2. Stabilisation physico-chimique:**

Elle repose sur l'ajout de liants qui réagissent avec les particules du sol. Les plus utilisés sont :

- **La chaux vive (CaO) ou éteinte (Ca(OH)<sub>2</sub>)**

→ Favorise la floculation et déclenche des réactions pouzzolaniques.

- **Le ciment Portland**

→ Produit des composés hydratés (C-S-H) qui augmentent la résistance.

- **Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, ou le gypse**

→ Utilisés comme liants secondaires, souvent dans une logique durable (Basma & Tuncer, 1991).

**Avantages** : améliore la résistance à long terme, réduit le gonflement.

**Inconvénients** : dépend du dosage, du pH et de l'humidité du sol.

### **I.7.3. Stabilisation par géo synthétiques**

- **Géotextiles et géogrilles** : utilisés pour renforcer les couches de sol et limiter les déformations.

- **Drainage par géocomposites** : améliore la stabilité hydrique du sol.

**Avantages** : très efficace dans les zones sensibles à l'humidité.

**Inconvénients** : coût plus élevé, besoin d'une mise en œuvre soignée.



FigureI.2: Travaux de stabilisation des sols dans la région de Redon



FigureI.3: exemple de stabilisation de sol



Figure I.4: La chaux dans la stabilisation des sols.

### **I.8. Méthodes d'amélioration des sols inadaptés à la construction :**

Pour remédier à l'inaptitude de certains sols. Les constructeurs peuvent recourir à l'une des approches suivantes :

- ✓ Améliorer les propriétés du sol en place par compactage, suivi de l'ajout de caractéristiques modifiées, en vue de les rendre adaptées au calcul et à la conception de l'ouvrage.
- ✓ Utiliser des matériaux plus appropriés provenant d'un site voisin pour remplacer les matériaux sur place.
- ✓ Optimiser les propriétés des matériaux existants sur site en y incorporant d'autres type de matériaux.

Le choix de méthode la plus adaptée dépend souvent de critères économiques. Par exemple, il est généralement plus économique de stabiliser le sol sur place à l'aide d'additifs bien que coûteux, plutôt que de procéder à l'excavation des matériaux inadéquats et à leur remplacement par un remblai de meilleure qualité importé.

**I.9. Déchets plastiques :**

Les déchets plastiques proviennent des résidus de processus de production, de transformation et de consommation. Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques.

**a) Déchets plastiques industriels :**

Ces déchets comportent tous les déchets générés lors de production de résines (trouvées principalement dans les sites pétrochimiques). Dans la plupart des cas, on trouve des polymères grand public (PE, PP, PS et PVC). Quand aux déchets de traitement, ils proviennent de toutes les opérations de transformation du plastique qui permettent la production de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage...).

**b) Les déchets plastiques de post -consommation :**

Il s'agit de tous les déchets issus de la consommation industrielle ou de l'usage privé. Les déchets plastiques utilisés dans cette étude entrent dans cette catégorie.

- Déchets commerciaux ou de distribution, y compris les emballages industriels. Les sacs de grande capacité sont utilisés dans l'industrie chimique, l'agro-alimentaire, bâtiments et travaux publics, pour emballer et transporter divers autres produits.
- Déchets électriques et électroniques de tous les secteurs de produits d'équipements électriques et électroniques tels que : ordinateurs, téléphones, appareils, électroménagers, divers



Figure I.5 :Collecte, tri et recyclage de déchets plastiques dans les Vosges.



Figure I.6. : Le cycle du recyclage du PVC – Paprec.

### **I.10. Matériaux aptes au traitement :**

Le traitement de sol est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. La technique s'inscrit ainsi dans la démarche

environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et Dépôt, donc diminution du cout !

En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts ; et participe à l'optimisation de mouvement des terres.

### **I.11. La stabilisation des sols :**

Également appelée stabilisation des terrains, constitue une étape cruciale dans les domaines de la construction et du génie civil. Elle regroupe un ensemble de techniques et de matériaux visant à améliorer les propriétés naturelles du sol pour répondre aux exigences des projets d'ingénierie. Parmi ces méthodes, la stabilisation aux polymères joue un rôle important. Ce procédé permet d'augmenter la capacité portante du sol, sa résistance à la traction et ses performances générales, le rendant ainsi apte à supporter des ouvrages de construction. Il est particulièrement indispensable lorsque les caractéristiques du sol en place ne permettent pas de soutenir une structure en toute sécurité.

#### **1. Role dans la construction:**

La stabilisation des sols contribue directement à la sécurité, à la durabilité et à la pérennité des ouvrages. Elle améliore la résistance du sol à l'eau, diminue les risques de tassement et augmente sa stabilité mécanique. Le recours à des méthodes et matériaux de stabilisation appropriés permet ainsi de prévenir les problèmes liés aux fondations, notamment les affaissements. C'est pourquoi cette technique est couramment utilisée dans la construction de routes, de bâtiments et d'autres infrastructures nécessitant des bases solides.

#### **2. Techniques et matériaux de stabilisation :**

On distingue principalement deux grandes catégories de stabilisation des sols : **la stabilisation mécanique** et **la stabilisation chimique**, incluant les solutions à base de polymères.

##### **Stabilisation mécanique:**

Cette méthode consiste à modifier la granulométrie du sol en le mélangeant avec d'autres matériaux aux caractéristiques granulaires différentes. L'objectif est d'obtenir un sol plus homogène, plus compact et plus apte à supporter les charges des structures.

**3. Stabilisation chimique :**

Elle repose sur l'ajout de composants chimiques actifs dans le sol afin d'en modifier les propriétés physiques et mécaniques. La stabilisation par polymères, en particulier, utilise des polymères synthétiques pour lier les particules du sol, renforçant sa résistance à la traction et à l'eau. L'efficacité de cette technique dépend de plusieurs facteurs:

- Type et quantité des produits chimiques utilisés
- Méthodes de mélange et d'incorporation
- Conditions environnementales
- Séquence des opérations, efforts de compactage et équipements utilisés (rouleaux, compacteurs)

Une mise en œuvre rigoureuse de ces paramètres permet d'obtenir des résultats optimaux en matière de stabilité et de performance du sol.

**II.12. Évaluation et classification des sols :**

La sélection de la technique de stabilisation dépend étroitement du type de sol. Les professionnels du terrassement et du nivellement rencontrent généralement des sols variés (graviers, sables, limons, argiles ou mélanges). Ces sols sont classés selon la taille de leurs particules et les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité), conformément aux normes **AASHTO** et **ASTM (D2487 et D3282)**.

**II.12.1. Sols argileux :**

Ils présentent une forte plasticité, un faible taux d'infiltration et un potentiel de gonflement élevé. Malgré une bonne résistance à la compression non confinée, leur faible CBR, valeur R et module de résilience en font des matériaux peu adaptés aux fondations sans traitement préalable

**II.12.2. Sols sableux :**

À l'opposé, les sables sont très perméables, ont un faible gonflement et une faible plasticité. Leur capacité portante est généralement meilleure grâce à des valeurs CBR, R et un module d'élasticité plus élevés, bien qu'ils aient une faible résistance à la compression non confinée.

**II.13. Modification in situ des sols :**

Lorsque les sols en place ne répondent pas aux exigences, il est possible de les traiter directement sur site plutôt que d'importer d'autres matériaux :

**Sols argileux :**

Des traitements chimiques permettent de réduire la plasticité et le gonflement tout en augmentant la stabilité du sol.

**Sols sableux :**

Les interventions visent principalement à améliorer la résistance à la compression non confinée pour accroître leur portance.

**II.13. Conclusion :**

La stabilisation des sols est un processus essentiel dans la construction, car elle constitue la base de structures sûres et durables. L'utilisation de méthodes mécaniques ou chimiques, ou de nouvelles solutions comme le béton de fusion à froid, permet de traiter le sol de manière efficace. Cela permet de s'assurer que le sol peut répondre aux besoins de n'importe quel projet. En comprenant et en appliquant les bonnes techniques de stabilisation des sols, les professionnels de la construction peuvent obtenir des résultats supérieurs et contribuer à des pratiques de construction durables.

## CHAPITRE II

DURABILITÉ DES ARGILES

STABILISÉES

## **II.1. Introduction :**

La stabilisation des matériaux est un procédé couramment utilisé dans le domaine du génie civil pour améliorer les propriétés physiques, mécaniques et parfois chimiques des sols ou autres matériaux naturels. Elle vise principalement à renforcer la portance, réduire la compressibilité, limiter la perméabilité et accroître la durabilité des matériaux en vue de leur utilisation dans des ouvrages de construction tels que les routes, les fondations ou les remblais. Cette technique peut être réalisée de manière mécanique, par compactage ou mélange avec d'autres granulats, ou de manière chimique, en ajoutant des liants comme la chaux, le ciment ou d'autres additifs industriels. De plus en plus, des approches durables intègrent l'utilisation de déchets recyclés, tels que les plastiques ou les cendres volantes, afin de réduire l'impact environnemental des travaux. La stabilisation permet ainsi d'optimiser l'utilisation des ressources locales tout en garantissant la performance et la sécurité des infrastructures. Les sols argileux sont généralement peu performants en l'état naturel. Leur stabilisation permet d'améliorer leurs propriétés mécaniques et d'en faire un matériau de construction plus fiable. Cependant, pour assurer leur performance à long terme, il est essentiel d'évaluer leur durabilité

## **II.2. Techniques de Stabilisation :**

**Les techniques comprennent :**

- **Stabilisation à la chaux :** modifie la structure de l'argile (floculation et pozzolanicité).
- **Stabilisation au ciment :** formation de produits hydratés (CSH, CAH) améliorant la cohésion.
- **Autres liants :** cendres volantes, laitier de haut fourneau, géopolymères, fibres naturelles ou synthétiques.

## **II.3. Définition de la durabilité :**

La durabilité des argiles stabilisées désigne la capacité du sol traité résister aux agressions physiques, chimique et climatiques dans le temps sans perte significative de performance.

## **II.4. Objectif de la durabilité :**

La durabilité fait référence à la capacité de matériau stabilisé à maintenir ses propriétés dans le temps, malgré les effets de :

- **L'humidité /cycle de mouillage –séchage**
- **Les variations de température/cycle gel-dégel**
- **Les agression chimiques (sulfates, sels, PH élevé)**
- **Les charges mécaniques répétées.**

## **II.5. Facteurs influençant la durabilité :**

**II.5.1. Type de stabilisant :** par exemple, la chaux améliore la durabilité chimique, le ciment la résistance mécanique.

**II.5.2. Dosage en liant :** un dosage insuffisant compromet la durabilité, un excès peut provoquer des fissurations.

**II.5.3. Cure /durcissement :** une bonne cure (humidité et température) est essentielle pour le développement des réactions de stabilisation.

**II.5.4. Conditions environnementales :** exposition à l'eau, au gel, au trafic, etc

## **II.6. Indicateurs de durabilité :**

On peut évaluer la durabilité par des essais comme :

1. **Perte de masse après cycles de mouillage –séchage.**
2. **Perte de résistance mécanique après cycles de gel-dégel.**
3. **Essai de résistance à la traction /durabilité chimique.**

## **II.7. Améliorations Possibles :**

- a) **Utilisation de liants**
- b) **Renforts par fibres (ex : fibres de coco, polypropylène)**
- c) **Ajouts de nanomatériaux (nano-silice, nano-alumine)**
- d) **Optimisation de la période de cure**

## **II.8. Durabilité des argiles avant et après traitement à la chaux et aux fibres plastiques**

### **II.8.1. Durabilité des argiles avant traitement :**

Avant tout traitement, les argiles naturelles présentent plusieurs faiblesses qui limitent leur utilisation en génie civil. Elles affichent une faible résistance mécanique en raison de leur comportement plastique et de leur faible résistance au cisaillement. Leur grande sensibilité à l'eau les rend particulièrement vulnérables, avec une forte tendance au gonflement et au retrait en fonction des variations d'humidité. De plus, elles se dégradent rapidement sous l'effet des cycles de mouillage-séchage ou de gel-dégel. Sur le plan chimique, leur structure est instable et sensible aux environnements acides ou salins. En conséquence, sans traitement de stabilisation approprié, les argiles naturelles sont peu durables pour les applications en génie civil.

### **II.8.2. Traitement des argiles avec la chaux :**

Effets de la chaux :

- Réactions immédiates :
- Flocculation et agrégation des particules d'argile (réduction de la plasticité).
- Réactions pouzzolaniques progressives :
- Formation de produits cimentaires comme C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) et C-A-H (Calcium Aluminate Hydrate).
- Amélioration progressive de la résistance mécanique et de la durabilité.
- Améliorations constatées :
- Hausse de la résistance à la compression.
- Réduction du gonflement.
- Amélioration de la résistance aux cycles gel/dégel et mouillage/séchage.
- Stabilité chimique plus grande face aux agressions chimiques.

### **II.8.3. Traitement des argiles avec fibres plastiques :**

- Les fibres (polypropylène, polyester, etc.) sont inertes chimiquement, légères et très résistantes à la traction.
- Elles créent un effet de renforcement tridimensionnel :
- Limitation de la propagation des fissures.
- Amélioration de la ductilité du sol.
- Absorption des déformations différentielles.

#### **II.8.4. Effets spécifiques :**

- Amélioration de la ténacité (résistance aux fissurations sous charges cycliques).
- Meilleure tenue à la fatigue.
- Maintien de la cohésion même sous fortes variations hydriques

#### **II.8.5. Traitement combiné:** Chaux + Fibres Plastiques

##### ➤ **Avantages synergiques :**

La chaux améliore la résistance chimique et diminue la plasticité.

Les fibres améliorent la résistance mécanique à la traction et limitent la fissuration

Ensemble, ils :

- Augmentent considérablement la durabilité sous cycles climatiques extrêmes (mouillage/séchage, gel/dégel).
- Stabilisent la microstructure du sol même en cas de microfissures.
- Prolongent la durée de vie des ouvrages en sols traités.

#### **II.9. Stabilisateurs :**

Deux types de stabilisants ont été utilisés dans les mélanges de sol stabilisé : le ciment Portland ordinaire (OPC) et la chaux hydratée. Pour chacun, deux dosages ont été retenus, à savoir 4 % et 8 % du poids total du mélange. Ces proportions ont été choisies afin d'évaluer l'impact du doublement de la teneur en stabilisant sur les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. D'après les travaux antérieurs (Neha Vivek , 2024 ; Ciancio 2014), les quantités de stabilisants efficaces se situent généralement entre 4 % et 8 %, ces seuils permettant d'atteindre un bon compromis entre performance mécanique et stabilité à long terme. Une synthèse des recherches de ces auteurs confirme que le respect de ces plages de dosage est essentiel pour optimiser le comportement des sols stabilisés.

##### **II.9.1. Principaux stabilisateurs :**

À ce jour, les deux principaux stabilisateurs utilisés pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols sont la chaux

##### **II.9.2. Stabilisation à la chaux :**

La chaux est le plus ancien agent connu de stabilisation des sols. Elle a été utilisée comme stabilisateur de chaussée par les romains et d'autres civilisation ancienne. La stabilisation à la chaux a été utilisée dans le monde entier pendant de nombreuses années pour la construction des pistes d'aéroport, des routes et des parkings. Les sols argileux, en

particulier, peuvent être stabilisés par l'ajout de chaux pour améliorer leurs propriétés mécaniques, produisant ainsi un matériau de construction amélioré. Tous les types de chaux peuvent être utilisés, mais la préférence est donnée à la chaux aérienne plutôt qu'à la chaux hydraulique. La chaux est particulièrement recommandée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20% et les sols ayant un indice de plasticité  $>17$  et une limite de liquidité  $>40$ . La chaux est obtenue par la calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20 % de la couche terrestre). Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types chaux.



Figure II.1 :Maison sur sol argileux.

## II.10. Mécanismes de stabilisation :

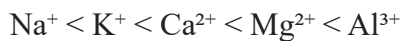
### II.10.1. Dessiccation :

Lorsque de la chaux vive ( $\text{CaO}$ ) est ajoutée à un sol humide, une réaction exothermique se produit. il s'agit de l'hydratation de la chaux vive qui conduit à la formation d'hydroxyde de calcium.

Le caractère exothermique et la consommation d'eau nécessaire à la réaction d'hydratation entraînent une diminution de la teneur en eau du sol. Dans la pratique, selon plusieurs travaux, l'incorporation de 1% de chaux vive dans un sol entraîne une diminution d'environ 1% de sa teneur en eau.

### **II.10.2. Échange cationique:**

L'ajout de chaux dans un sol argileux entraîne une augmentation des ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), qui remplacent les cations métalliques présents à la surface des particules d'argile. De manière générale, les cations à valence élevée remplacent ceux à valence plus faible. Lorsque deux cations de même valence sont en concurrence, celui dont le rayon ionique hydraté est plus élevé tend à supplanter l'autre. Ce principe est illustré par la série suivante, où les cations situés à droite remplacent ceux situés à gauche :



Cette hiérarchie s'applique à concentrations égales, bien que l'ordre puisse varier selon la concentration des cations en solution. En effet, à forte concentration, un ion peut remplacer un autre de concentration plus faible. Par exemple, les ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) peuvent remplacer les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) si leur concentration est plus élevée.

### **II.11. Résultats et exemple d'application :**

Plusieurs études ont montré que la stabilisation des sols argileux à l'aide de liants tels que la chaux ou le ciment améliore significativement leur résistance mécanique et leur durabilité face aux agressions climatiques et chimiques. Par exemple, l'ajout de chaux entraîne une réduction notable de la plasticité et une augmentation de la résistance à la compression non confinée, ce qui prolonge la durée de vie des structures construites sur ces sols.

Dans une étude menée par Sherwood (1993), il a été observé que les sols argileux stabilisés à la chaux conservent leurs propriétés mécaniques même après plusieurs cycles de gel-dégel, grâce à la formation de produits cimentaires stables tels que les silicates et aluminates de calcium hydratés.

#### **II.11.1. Exemple pratique:**

Lors de la construction d'une route en sol argileux dans le sud de la France, un traitement à la chaux a été appliqué. Après 5 années d'exploitation, les inspections ont révélé

une bonne tenue de la plateforme routière sans signes majeurs de déformation ou de fissuration, confirmant ainsi la durabilité du traitement appliqué.

### **II.11.2. Exemple pratique dans un pays arabe : Le cas du Maroc**

Au Maroc, la stabilisation des sols argileux est couramment utilisée dans les projets routiers, notamment dans les régions où les matériaux de bonne qualité sont rares. Une étude réalisée par El Malki et al. (2017) a évalué l'efficacité de la stabilisation des sols argileux de la région de Khouribga à l'aide de la chaux vive. Les résultats ont montré une amélioration significative de la portance (CBR) et de la résistance à la compression, même après exposition à l'humidité.

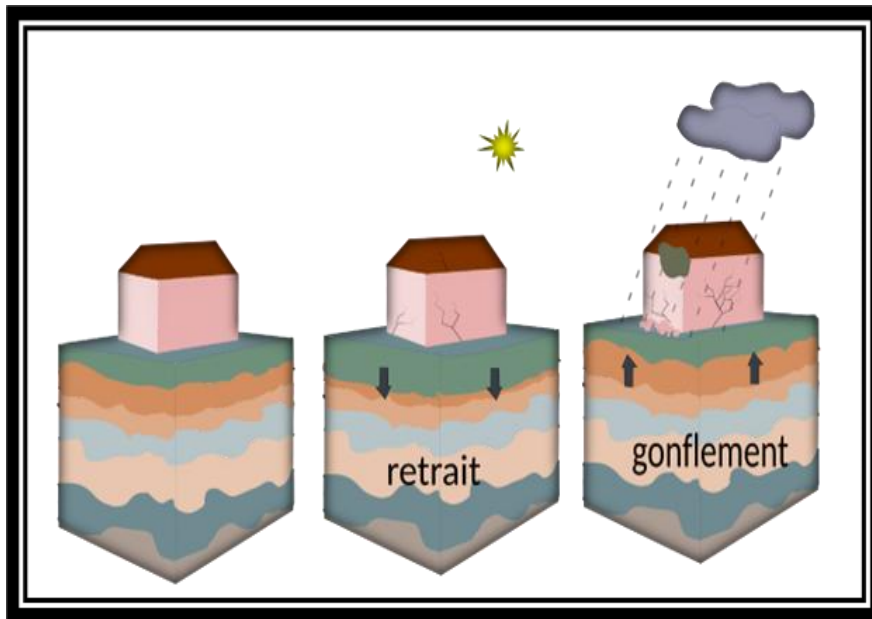
Après trois ans d'observation sur une section de route expérimentale traitée, la structure a montré une bonne stabilité et aucune dégradation majeure, confirmant ainsi l'efficacité de la technique dans un contexte climatique semi-aride.

### **II.11.3. Défis et perspectives futures**

Malgré les avancées significatives dans le domaine de la stabilisation des sols argileux, plusieurs défis subsistent. L'un des principaux obstacles est la variabilité naturelle des sols, qui rend difficile la standardisation des traitements. De plus, l'exposition prolongée aux conditions climatiques extrêmes (gel/dégel, cycles de mouillage-séchage) peut altérer les performances à long terme des matériaux stabilisés.

Les interactions chimiques entre les liants et certains minéraux argileux, comme la smectite, peuvent également entraîner des gonflements imprévus, compromettant la durabilité des structures. D'un point de vue environnemental, l'utilisation intensive de liants traditionnels comme le ciment pose des problèmes d'empreinte carbone.

À l'avenir, la recherche se concentre sur le développement de liants alternatifs plus écologiques (géopolymères, liants à base de cendres volcaniques ou de résidus industriels) et sur l'optimisation des mélanges pour chaque type de sol. L'intégration de techniques de surveillance à long terme (capteurs embarqués, imagerie radar) pourrait également permettre une meilleure évaluation en temps réel de la durabilité des sols stabilisés.



**Figure II.2:** Schéma simplifié de deux sources de désordre sur une maison construite sans fondations suffisantes sur un sol argileux.

## II.12. Conclusion :

La durabilité des argiles stabilisées est un enjeu crucial pour la pérennité des infrastructures. Elle dépend à la fois du choix du liant, des conditions de mise en œuvre, et de l'environnement d'exposition. Des recherches récentes montrent que des approches innovantes permettent d'améliorer significativement la résistance à long terme de ces matériaux.

# **CHAPITRE III**

## **PRÉSENTATION DES ESSAIS**

**III.1. Introduction:**

Le contenu de ce chapitre est une étude expérimentale qu'on a effectuée au laboratoire des travaux publics de l'ouest - unité de Tiaret (L.T.P.O) et le laboratoire du département génie civil, selon les modes opératoire résumé ci-après.

**III.2. Matériaux utilisés:**

Dans cette étude ont a utilisé la chaux comme agent de traitement du matériau argileux et les déchets plastiques de type PVC comme renforts.

**III.2.1 Matériau argile:**

Les échantillons de sols argileux (figure III.1) dans cette étude ont été prélevés de la zone de la briqueterie de (DJILALI BOUNAAMA-TISSEMSILT).

Cette étude comporte les essais d'identification de l'argile ainsi que les essais de portance.



**Figure III.1:** Echantillon du sol argileux

**III.2.2 La chaux:**

La chaux utilisée (Figure III.2) est une chaux vive provenant directement de l'usine de SAIDA. Elle est conditionnée en sacs. Les caractéristiques physico-chimiques de cette chaux ont été fournies par l'usine de production. Tableau III.1.



Figure III.2 : Echantillon de la chaux vive de SAIDA.

### III.2.3 Les déchets de P.V.C:

Les déchets de polychlorure de vinyle (PVC) utilisés dans cette étude proviennent de copeaux de menuiserie d'aluminium (figure III.3).



a



b

Figure III.3: les fibres plastiques : (a) fibres PVC avant tamisage ; (b) fibres PVC après tamisage.

### III.4. Etude expérimentale:

L'étude expérimentale comporte 3 catégories d'essais :

#### a) Essais d'identifications:

- ✓ Analyse chimique (teneur en carbonates  $CaCO_3$  , bleu de méthylène VBS, sulfates  
Mesure de PH du sol par PH mètre.
- ✓ La granulométrie (par tamisage, et par sédimentométrie).
- ✓ Les limites d'Atterberg.

#### b) Essai mécanique :

- ✓ Proctor normal.

#### c) Essai durabilité:

### III.5. Analyse chimique :

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons analysés.

Cette étape est essentielle pour l'identification des matériaux locaux utilisés dans la construction.

#### III.5.1. Essais d'évaluation de taux de carbonates (NA-2789 , NF P94-048) :

L'essai d'évaluation de carbonates de calcium  $CaCO_3$  a pour but de déterminer la quantité de carbonates présents dans un échantillon de sol. A cette fin, on utilise un appareil appelé «calcimètre », et on procède selon les étapes suivantes (figure III.4):

- Peser 0.5 g de l'échantillon de sol, puis l'introduire dans un flacon en verre.
- Ajouter 10ml d'acide chlorhydrique (HCL à 10 %) dans le flacon.
- Fermer le flacon à l'aide du tube du calcimètre et agiter l'ensemble.
- Mesurer le volume de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) dégagé suite à la réaction avec l'acide.
- Le pourcentage de  $CaCO_3$  est calculé en utilisant la formule :

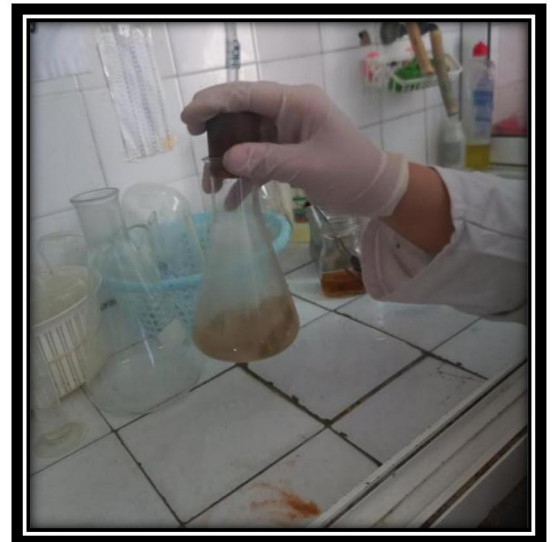
$$CaCO_3 \% = 100 * m_2 / m_1 * 100 / (100 - H)$$

Où:

- $m_1$ : Masse initiale de l'échantillon.
- $m_2$ : Volume de  $CO_2$  dégagé.
- $H$ : Humidité de l'échantillon (en %).



a



b



c

**Figure III.4:** Essai de détermination de taux de carbonates : (a) préparation des échantillons ; (b) ajout de la solution d'HCL à l'échantillon ; (c) mesure de taux de carbonates.

### **III.5.2. Essai bleu de méthylène (NF P94-068) :**

L'essai au bleu de méthylène a pour objectif de déterminer la teneur en argile actives dans un sol, ce qui permet d'évaluer sa capacité d'adsorption.

Le principe repose sur la capacité des particules argileuse à fixer le bleu de méthylène. L'essai se déroule selon les étapes suivantes (figure III.5):

- Prélever une masse précise de sol, généralement tamisé à 2mm.
- Mélanger l'échantillon avec de l'eau distillée dans un bécher.
- Ajouter progressivement une solution de bleu de méthylène tout en agitant constamment.
- Déposer régulièrement une goutte du mélange sur un papier filtre pour observer la tache.
- Arrêter l'ajout de bleu de méthylène dès qu'un halo bleu persistant apparait autour de la tache centrale (point d'équivalence).

#### **Calcul de la VBS :**

La valeur au bleu de sol (**VBS**) est calculée en fonction de la quantité de bleu de méthylène adsorbée par le sol.

La formule de calcul de la **VBS** est généralement donnée par :

$$\mathbf{VBS = (V/m_0) \times C}$$

**Où V** Est le volume de bleu de méthylène ajouté,

**m<sub>0</sub>** Est la masse de l'échantillon de sol.

**C** Est une constante



a



b



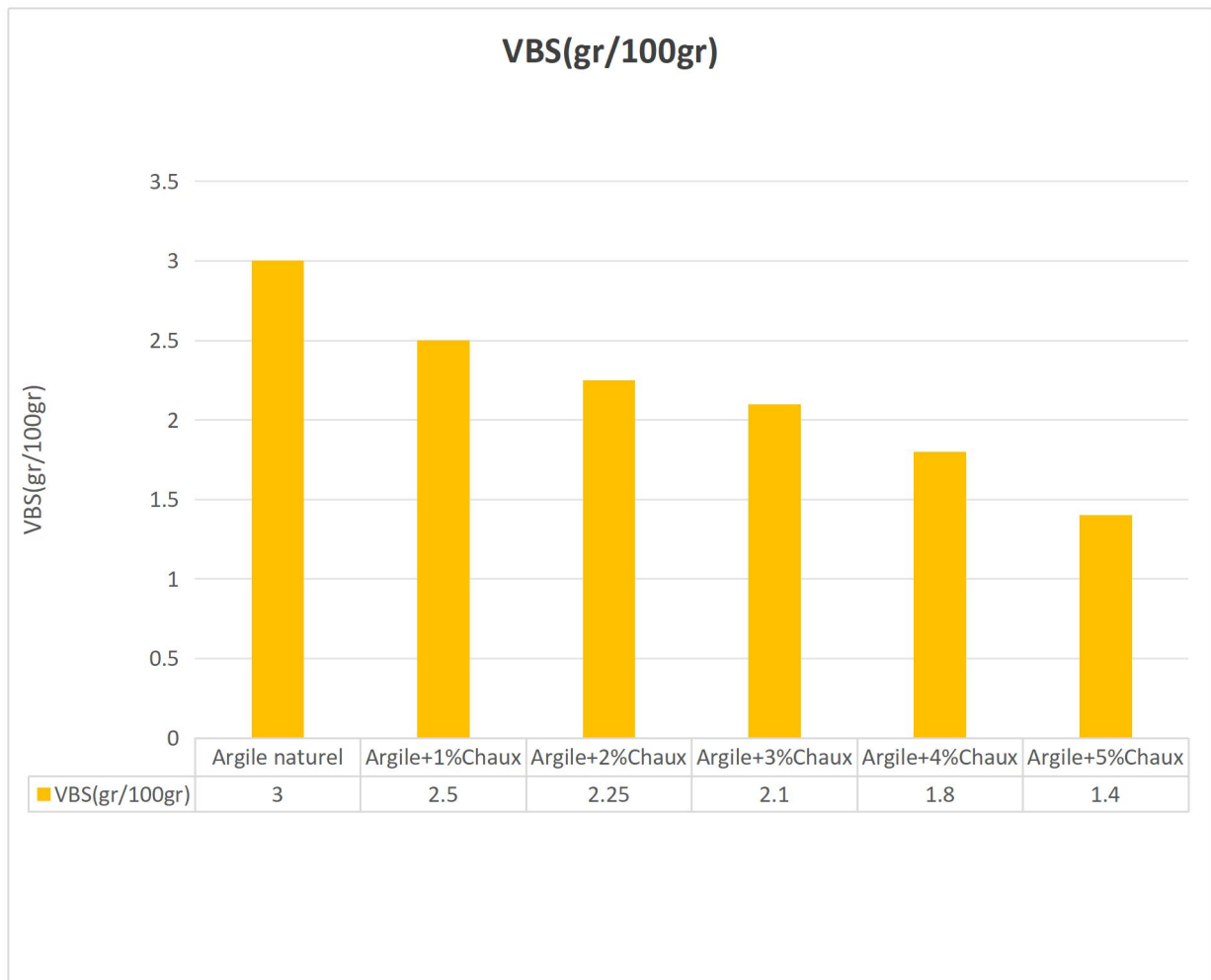
c



d

**Figures III.5 :** Etapes de l'essai de bleu de méthylène : (a) Appareil d'essai ; (b) malaxage de l'échantillon avec la solution bleu de méthylène ; (c) et (d) : Prélèvement d'échantillons pour vérification.

Sur la figure III.6 on présente les résultats de l'essai VBS, où l'on peut remarquer que les valeurs au bleu diminuent en augmentant le pourcentage de la chaux, ce qui met en évidence l'intérêt du traitement du sol avec la chaux.



**FigureIII.6:** Résultats de l'essai VBS se forme d'histogrammes.

### **III.5.3. Détermination de la teneur en sulfates (NA-16002-5042) :**

La détermination de la teneur en sulfates dans un échantillon de sol constitue une étape cruciale pour évaluer sa composition chimique et anticiper les interactions potentielles avec les matériaux de construction, notamment les liants hydrauliques. En effet, une teneur élevée en sulfates peut compromettre la stabilité et la durabilité des structures implantées sur ou dans ce sol.

L'essai vise à quantifier les sulfates solubles dans le sol en les précipitant sous forme de sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ), un composé insoluble dont la masse peut être mesurée avec précision.

**Procédure expérimentale:**

- **Pesée de l'échantillon :**  
Une masse précise d'échantillon de sol sec est prélevée (généralement entre 5 et 10 g selon les normes).
- **Extraction des sulfates :**  
L'échantillon est mélangé avec de l'eau distillée et une quantité contrôlée d'acide chlorhydrique (HCl) afin de solubiliser les sulfates présents dans le sol.
- **Filtration de la solution :**  
Après agitation et repos, la solution est filtrée pour éliminer les particules solides. Le filtrat clair contient les sulfates dissous.
- **Précipitation des sulfates :**  
Une solution de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) est ajoutée au filtrat. Les ions sulfate réagissent avec les ions baryum pour former un précipité blanc de sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ), insoluble dans l'eau.
- **Filtration et séchage du précipité :**  
Le précipité est filtré, séché soigneusement à température contrôlée, puis pesé avec précision.
- **Calcul de la teneur en sulfates :**  
La masse du sulfate de baryum obtenu est utilisée pour déterminer la teneur en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans l'échantillon initial, en appliquant un facteur de conversion basé sur les masses molaires.

**III.5.4. Essai pH-mètre:****III.5.4.1. Objectif:**

Dans notre, le but de l'essai est de terminer le pourcentage minimal de chaux pour permettre d'atteindre le point de fixation de la chaux avec l'argile selon la méthode d'Eades et Grim. La mesure du pH du sol traité est réalisée conformément à la norme ASTM D6276.

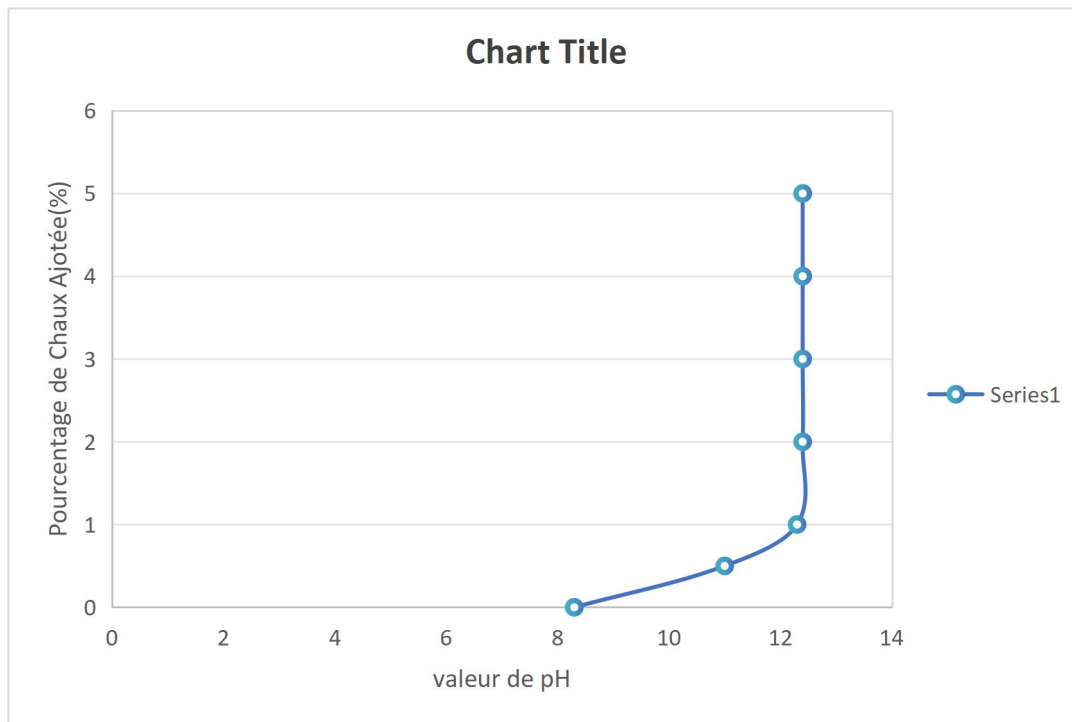
**III.5.4.2. Matériel utilisé:**

- pH mètre numérique
- Bêchers en plastique ou en verre
- Eau distillée
- Papier absorbant



**Figure III.7 :** Mesure de pH du sol par pH-mètre

Dans cet essai, on mesure la variation du pH en fonction du pourcentage de chaux ajouté. Comme pour la détermination des limites d'Atterberg, les mesures de pH du sol ont été réalisées sur la fraction dont la taille est inférieure à  $425\mu\text{m}$ . Les solutions analysées sont constituées de 25g de sol étudié, 100 ml d'eau déminéralisée, et des proportions de chaux respectives de 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%. Une solution contenant 20g de chaux et 100ml d'eau déminéralisée a également été préparée afin de mesurer le pH de la chaux pure. D'après la courbe pH en fonction du pourcentage de chaux ajoutée (figure III.8), le pourcentage minimal de cet agent de traitement est de l'ordre de 1%.



**Figure III.8 :** évolution du pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée.

### **III.6. Analyse granulométrique:**

La granulométrie constitue une propriété fondamentale des sols, jouant un rôle déterminant sur leur comportement géotechnique. Ci-dessous est présenté un récapitulatif des résultats obtenus à partir des analyses granulométriques effectuées par tamisage et par sédimentométrie.

#### **a) Par tamisage (NF P 94-056):**

##### **Objectif :**

Déterminer la répartition des tailles des particules dans un échantillon de sol en vue de sa classification.

- L'échantillon de sol est d'abord agité dans l'eau afin de désagréger les amas de particules.
- IL est ensuite tamisé à l'aide d'une série de tamis de mailles variées pour le fractionner selon la taille des grains (Figure III.9).
- Le résidu retenu sur chaque tamis est pesé, puis rapporté à la masse sèche totale de l'échantillon.



**Figure III.9:** Série de tamis pour l'essai granulométrie par tamisage.

**b) Par sédimentométrie (NA 5251, NF P 94-057):**

**Objectif**

- déterminer la distribution des particules fines (inférieures à  $80 \mu\text{m}$ ) en mesurant leur vitesse de décantation dans un liquide, selon le principe de la loi de Stokes.
- L'échantillon de sol est préalablement dispersé dans un liquide pour éviter la floculation des particules (Figure III.10).
- On mesure la concentration des particules en suspension à différentes profondeurs et à des intervalles de temps donnés à l'aide d'un densimètre ou d'un pipetage.
- Les données recueillies permettent de calculer la répartition granulométrique en fonction du diamètre des particules.

Cette méthode complète l'analyse par tamisage en ciblant les fractions les plus fines du sol, essentielles pour comprendre le comportement mécanique et hydraulique du matériau.



Figure III.10 : Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

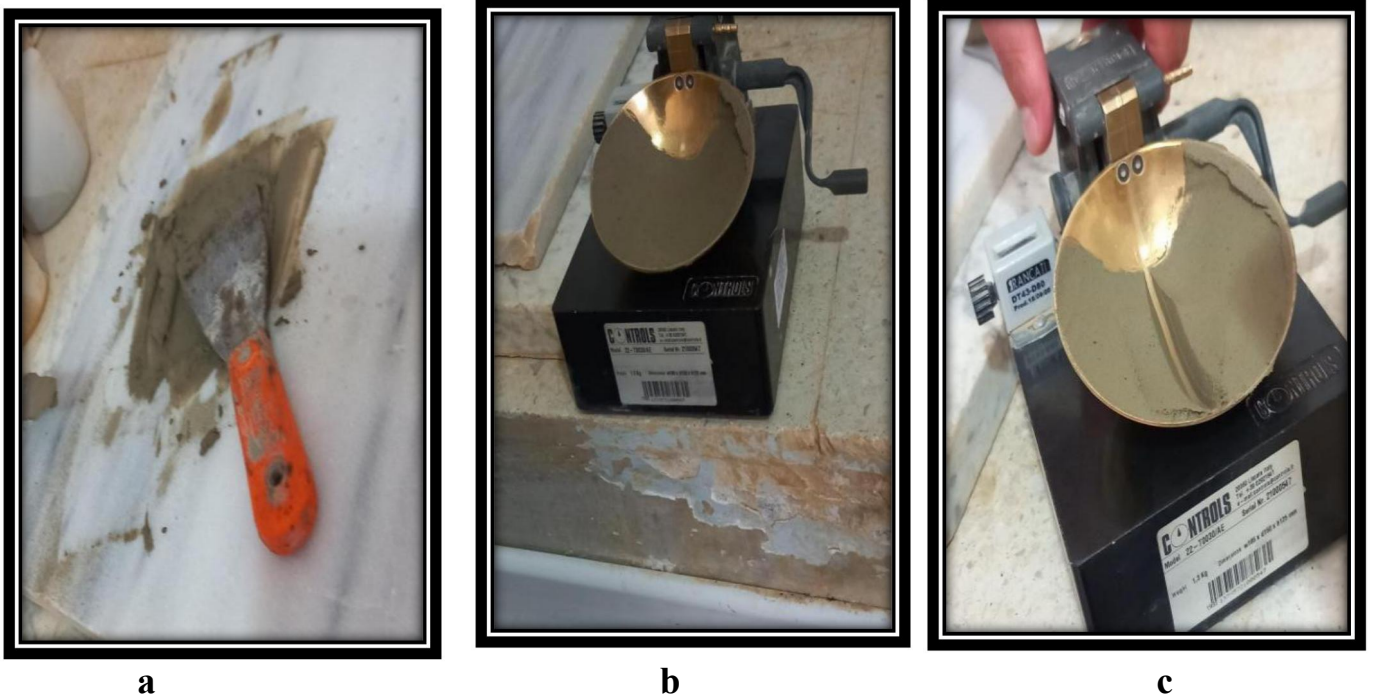
### III.7. Limites D'Atterberg (NA 16213,NF P 94-051):

Les limites d'Atterberg permettent de caractériser l'état de consistance d'un sol fin en fonction de sa teneur en eau. Elles sont essentielles pour la classification des sols et l'évaluation de leur comportement en génie civil.

**Les trois principales limites sont :**

- **La limite de liquidité (WL) :** correspond à la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide. Elle est déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande (figure III.11).
- **La limite de plasticité (WP) :** correspond à la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide. Elle est mesurée en roulant des bâtons de sol jusqu'à rupture (figure III.12).
- **L'indice de plasticité (IP) :** défini par la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité ( $IP = WL - WP$ ), il donne une indication sur la plasticité du sol.

Ces essais fournissent des informations cruciales sur la cohésion du sol, sa sensibilité à l'eau et sa capacité de déformation, ce qui aide à anticiper son comportement en œuvre



**Figure III.11:** Etapes de détermination de la limite de liquidité :  
 (a) Malaxage du sol à la teneur en eau sélectionnée ; (b) Remplissage de la boîte de Casagrande ; (c) Application de coups.



**Figure III.12:** Détermination de la limite de plasticité : (a) Préparation des bâtons ; (b) test.

### **III.8. Essai mécanique:**

#### **III.8.1. Essai Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093) :**

L'essai Proctor normal a pour objectif de déterminer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche d'un sol compacté sous une énergie de compactage standard. Il permet d'identifier la teneur en eau optimale pour laquelle le sol atteint sa densité maximale. Cette donnée est essentielle pour les travaux de terrassement et de fondations.

#### **III.8.2. Principe de l'essai:**

L'essai consiste à compacter un sol en couches successives dans un moule cylindrique à l'aide d'un pilon normalisé tombant d'une hauteur définie, selon les conditions précisées par la norme NF P 94-093.

#### **Procédure :**

- Le sol est humidifié à différentes teneurs en eau.
- Pour chaque teneur, il est compacté en 3 couches dans un moule de volume connu, en frappant chaque couche avec 25 coups de pilon de 2,5 kg tombant d'une hauteur de 30 cm.
- On mesure la masse volumique humide du sol compacté, puis on détermine la densité sèche à partir de la teneur en eau.
- Les résultats sont reportés sur une courbe représentant la densité sèche en fonction de la teneur en eau.



**Figure III.13:** Etapes de l'essai Proctor ; (a): Dame Proctor ; (b): Moule Proctor ; (c)et(d): mélange échantillon + P.V.C+ CHAUX.

### **III.9. Essai durabilité:**

Les sols argileux sont connus pour leur faible durabilité dans les ouvrages de construction. Cependant, leur stabilisation à l'aide de déchets plastiques constitue une solution innovante permettant d'améliorer leur comportement à long terme tout en limitant l'empreinte environnementale.

Le principal matériel utilisé est présenté sur la figure III. 14.



a



b



c



d



e

**Figure III.14:** les moyens utilisés pour l'essai durabilité : (a) enceinte climatique ; (b) pied à coulisse ; (c) brosse métallique ; (d) balance ; (e) étuve.

**III.9.1. Mode opératoire:**

- a.** Préparer deux échantillon (E1 et E2) traités à un seul dosage de chaux + un dosage en fibres de plastique de type PVC dans un moule Proctor Normal, à  $W_{OPN}$ .
- b.** Mettre l'échantillon dans le moule par couches de 5cm et le compacter en utilisant la dame Proctor.
- c.** Scarifier la couche précédente avant de mettre la suivante.
- d.** Durant cette opération prendre une petite quantité du matériau traité pour déterminer la teneur en eau (figure III.15).
- e.** Démouler et mesurer le poids total (moule + échantillon) pour E1 et E2, et déduire (pour les deux échantillons) (figure III.16).
- f.** Déterminer la hauteur moyenne et le diamètre moyen et calculer le volume et peser E1 seulement et laisser E2 comme échantillon témoin.
- g.** Mettre E1 et E2 dans une enceinte climatique à 20°C pendant 7 jours (figure III.17)
- h.** Après 07 jours peser et prendre la hauteur et le volume de l'éprouvette E1 (figure III.18).
- i.** Mettre E1 et E2 dans un bain marie pendant 05h puis peser et prendre la hauteur et le volume de E1 (figure III.19, III.20, III.21 et III.22)
- j.** Mettre E1 et E2 dans l'étuve à 71°C pendant 42h ensuite peser et prendre la hauteur et le volume de E1 (Figure III.23, III.24 et III.25).
- k.** Appliquer 02 coups sur la surface latérale et les 02 faces de l'éprouvette E2 (Figure III.26).
- l.** Répéter l'opération 12 fois, à partir de la phase initiale.
- m.** A la fin mettre E1 et E2 dans l'étuve à 110°C et peser les deux échantillons.
- n.** Les données recueillies permettent de déterminer les changements de volume et de la teneur en eau pour E1 (pour chaque cycle) et la perte en matériau (sol-chaux-PVC) après 12 cycles pour E2.



Figure III.15 : Réalisation des éprouvettes pour les essais de durabilité.



Figure III.16 : Préparation deux éprouvettes (E1 et E2).



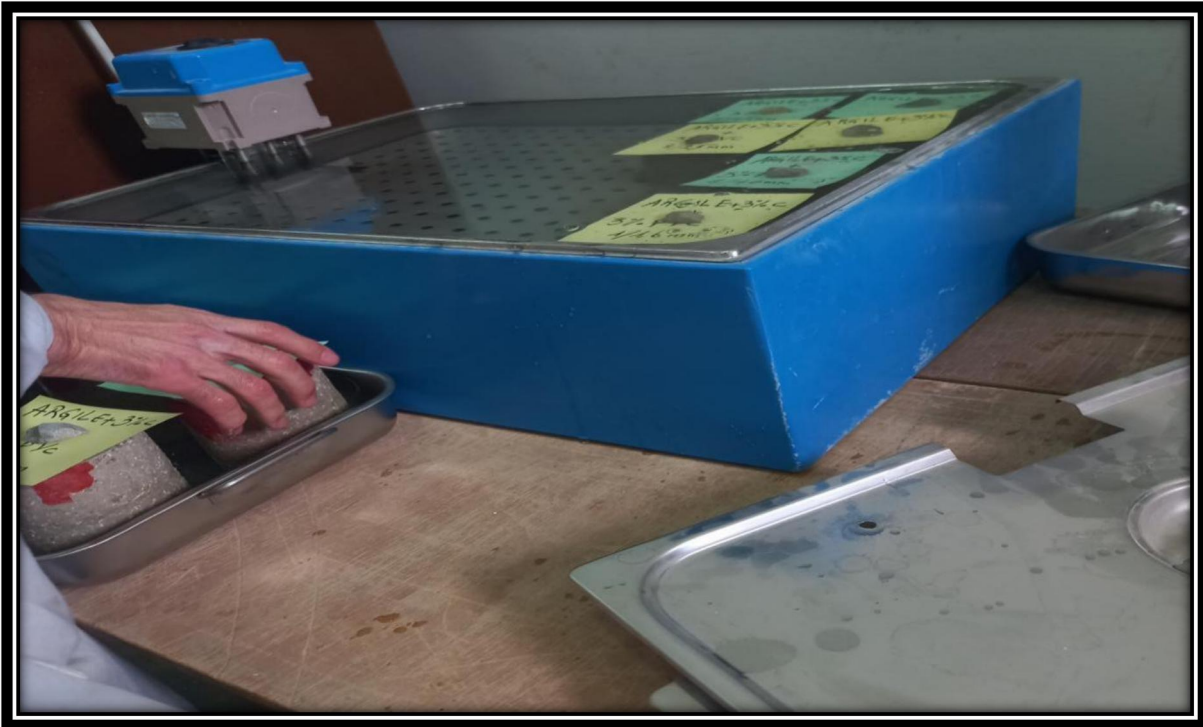


Figure III.19 : Mise des échantillons E1 et E2 dans un bain-marie pendant 5 heures.



Figure III.20: Prise de poids.



.Figure III.21 : Mesure des dimensions des éprouvettes E1 après bain-marie.



Figure III.22 : Deuxième éprouvette E2 après bain de marie.



Figure III.23 : Etapes de l'essai de séchage.



Figure III.24 : après avoir passé 42 heures.

**a****b**

**Figure III.25** : prendre des mesures des éprouvette « le poids » : (a) E1 argile+3%chaux ; (b) E2 argile+3% chaux.



**Figure III.26** : Applique 02 coups sur la surface latérale et les 02 faces de l'échantillon E2.

**III.10. Conclusion:**

Les essais effectués sur l'argile provenant de la briqueterie de **DJILALI BOUNAAMA-TISSEMSILT**) ont permis de mettre en évidence ses caractéristiques mécaniques initiales, relativement faibles, limitant son usage dans les ouvrages géotechniques sans traitement préalable.

Afin d'améliorer ses performances, une stabilisation a été réalisée à l'aide de déchets plastiques et de la chaux vive.

Les résultats des essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

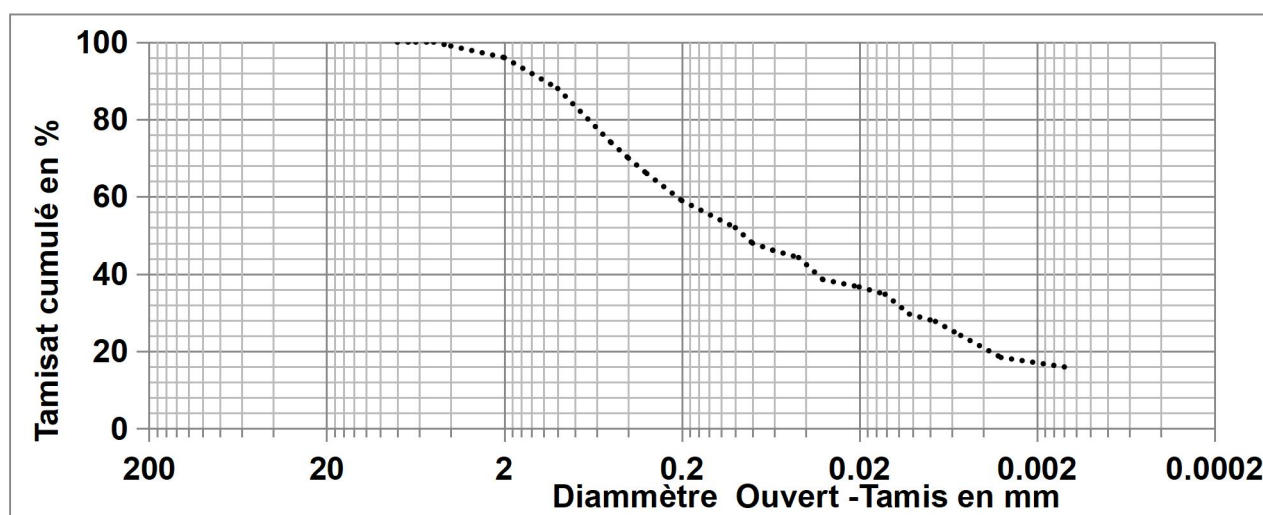
**CHAPITRE IV**  
**ANALYSE ET**  
**INTERPRÉTATION DES**  
**RÉSULTATS**

### IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus lors de l'étude de la durabilité des argiles stabilisées avec des déchets plastiques. Après avoir décrit les différentes étapes expérimentales, il est désormais essentiel d'examiner en détail les performances des mélanges réalisés, afin d'évaluer l'impact de l'ajout de plastique recyclé sur les propriétés mécaniques et durables du matériau.

### IV.2. Classification de sol :

Les résultats des essais d'identification de l'argile sont présentés sur la figure IV.1 (courbe granulométrique) et dans tableau IV.1.

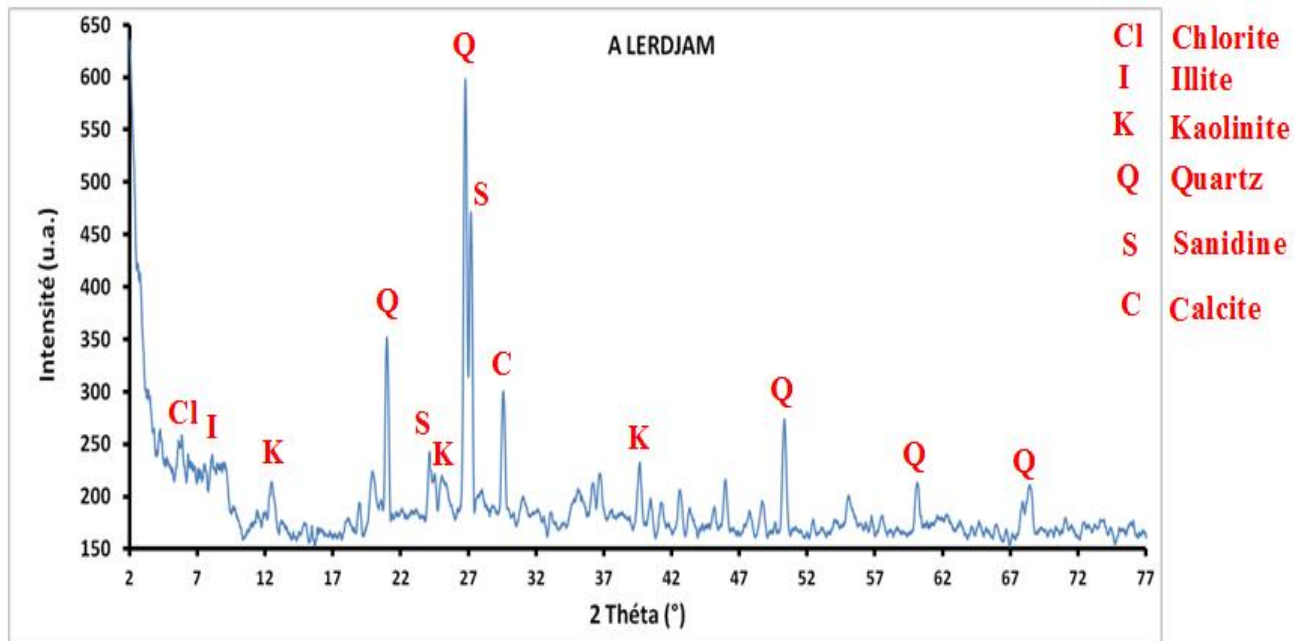


**Figure IV.1 :** Courbe granulométrique de l'argile (tamisage par voie humide et sédimentométrie)..

**Tableau IV.1 :** résultats d'essai d'identification de l'argile naturelle

.Essai	Tamisât à 2µm (%)	Tamisât à 80µM (%)	VBS (g / 100gr )	WL (%)	Wp (%)	IP (%)	Taux de carbonates (%)	Taux de sulfates (mg /kg)	Wn (%)
résultats	8	29	3.00	41.94	25.16	16.78	18	0.5	23.8

D'après le guide technique de terrassement routier (GTR) et la norme NF P 11-300, le sol est classé en B<sub>6</sub>(sable et graves argileux à très argileux).



**Figure IV.2 :** Courbe résulte de (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est utilisée pour estimer les principaux minéraux présents dans l'argile brute.

L'analyse par diffraction des rayons X a été réalisée au Laboratoire Synthèse et Catalyse au niveau de la faculté des Sciences de la Matière. Les diffractogrammes DRX ont été obtenus à température ambiante avec un diffractomètre Rigaku, Mini Flex 600.

À partir des diffractogrammes DRX de l'argile (figure IV.2), les minéraux argileux identifiés étaient la kaolinite, l'illite et la Chlorite, avec quelques traces de sanidine. Les minéraux associés étaient le Quartz et la Calcite

### **IV.3. Limites d'Atterberg:**

La Figure IV.3 présente les valeurs des limites d'Atterberg obtenues pour les différents mélanges argile–chaux. On observe que l'ajout de chaux entraîne une augmentation notable de la limite de liquidité de l'argile. Cette hausse significative peut être attribuée à des réactions chimiques, notamment les processus de floculation et d'agglomération des particules argileuses, qui modifient la structure interne de la matrice.

En ce qui concerne la limite de plasticité, l'effet de la chaux est plus modéré. Une légère augmentation est néanmoins constatée, traduisant une modification des propriétés physico-

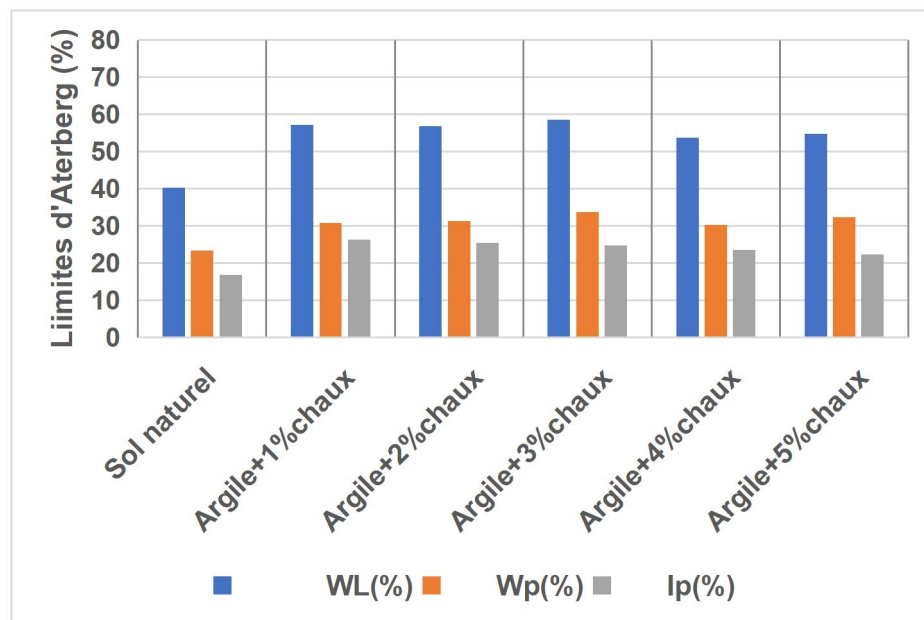
chimiques de l'argile, sans pour autant bouleverser son comportement plastique de manière marquée.

Par conséquent, l'indice de plasticité (IP), qui correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, se trouve augmenté. Cela s'explique par :

d'une part, l'augmentation significative de la limite de liquidité ;

d'autre part, la faible variation de la limite de plasticité.

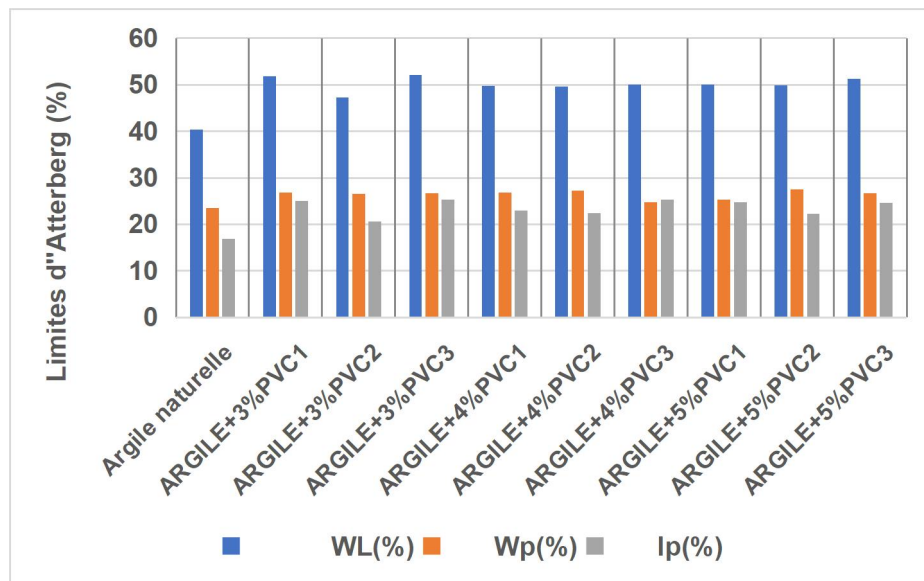
Cette évolution de l'indice de plasticité peut rendre l'argile plus malléable, ce qui améliore son aptitude au façonnage et à certaines applications en génie civil ou en traitement de sols.



**Figure IV.3 :** Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges argile –chaux

La Figure IV.4 présente les valeurs des limites d'Atterberg pour les différents mélanges argile – fibres PVC. On observe que l'ajout de fibres plastiques entraîne de légères variations des limites d'Atterberg. Ces fluctuations sont principalement liées à une modification de la maniabilité des mélanges, en particulier lors de la préparation et de la mise en œuvre des échantillons.

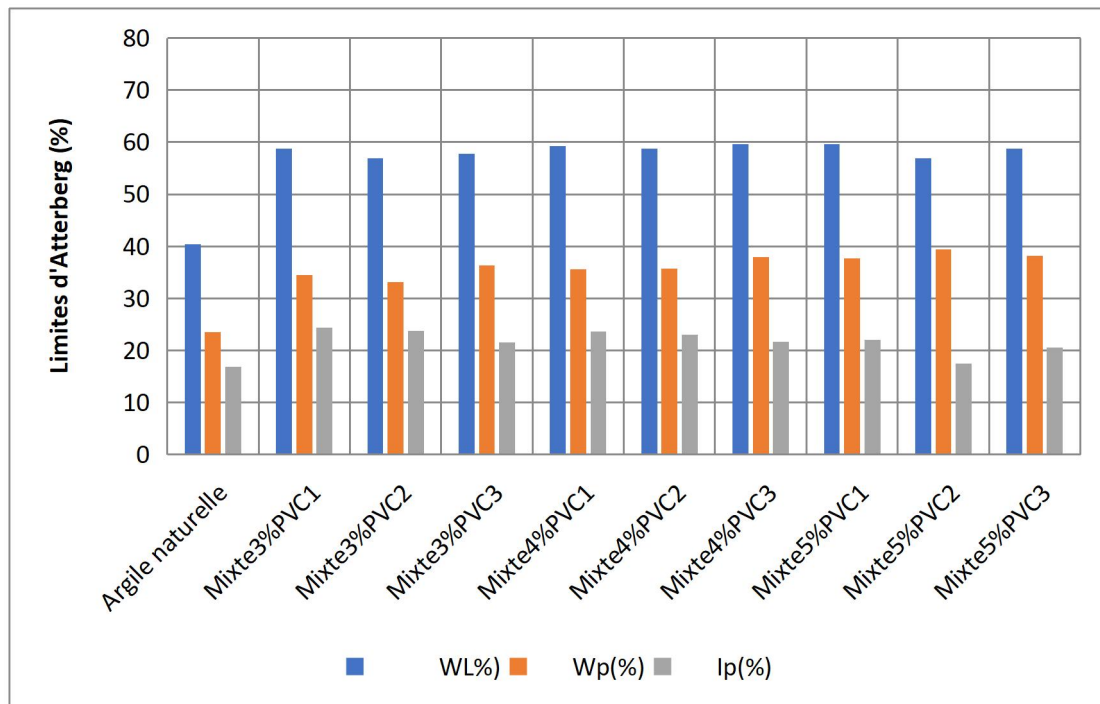
Toutefois, il est important de noter que ces variations ne traduisent pas de modification significative de la structure interne de la matrice argileuse. En effet, les fibres PVC n'interagissent pas chimiquement avec les minéraux argileux ; leur effet reste donc d'ordre physique, influençant la consistance apparente du mélange sans altérer la nature minéralogique du sol.



**Figure IV.4 :** Histogrammes représentant les limites d'Atterberg des mélanges «argile-PVC»

Concernant les mélanges argile–chaux–PVC préparés avec 1 % de chaux (figure IV.5), on observe que la présence de fibres plastiques influe sur le déroulement des réactions entre la chaux et l'argile. En effet, l'introduction de fibres PVC apporte une composante physique supplémentaire, susceptible de perturber la répartition homogène de la chaux ou de modifier localement l'humidité disponible pour les réactions chimiques.

Par ailleurs, ces fibres influencent également l'indice de plasticité en modifiant la cohésion et la plasticité globale du mélange.



**Figure IV.5 :** Histogrammes représentant les limites d'Atterberg de différents mélanges «Argile-Chaux-PVC»

#### IV.4. Essais Proctor Normal

On présente sur les figures IV.6, IV.7 et IV.8 les courbes Proctor des mélanges contenant l'argile, argile plus chaux et la combinaison des 3 matériaux. Il est à noter que ces résultats ont été pris des travaux de PFE Guezzoul et Cherrak (2024), mais nous avons refait quelques essais pour vérifier que les résultats restent inchangés du fait que le matériau de base (argile) reste inchangé également.

Il a été remarqué que l'ajout de chaux et de fibres plastiques PVC influence de manière significative les propriétés de compactage de l'argile. La chaux augmente d'abord la teneur en eau optimale ( $W_{OPN}$ ) jusqu'à 1 %, puis celle-ci diminue légèrement tout en restant supérieure à celle de l'argile naturelle, sauf à 5 %, où elle devient inférieure. Parallèlement, la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ) diminue en raison de l'absorption d'eau par la chaux et des effets du liant qui entraîne une expansion du volume. L'introduction de fibres PVC réduit également la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ) en raison de leur faible densité, et augmente la teneur en eau optimale ( $W_{OPN}$ ) afin d'améliorer la maniabilité du mélange, les dimensions et les proportions des fibres jouant un rôle essentiel. Il est à noter qu'un ajout de 5 % de fibres PVC de type 2 (1,6–2 mm) permet d'obtenir la densité la plus élevée et la teneur en eau optimale ( $W_{OPN}$ ) la plus faible parmi les mélanges renforcés, indiquant une compacité optimale. Dans les mélanges combinant chaux et fibres, la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ) diminue encore davantage tandis que la teneur en eau augmente, du fait de la double demande en eau, pour les réactions de la chaux et pour la mise en œuvre des fibres.

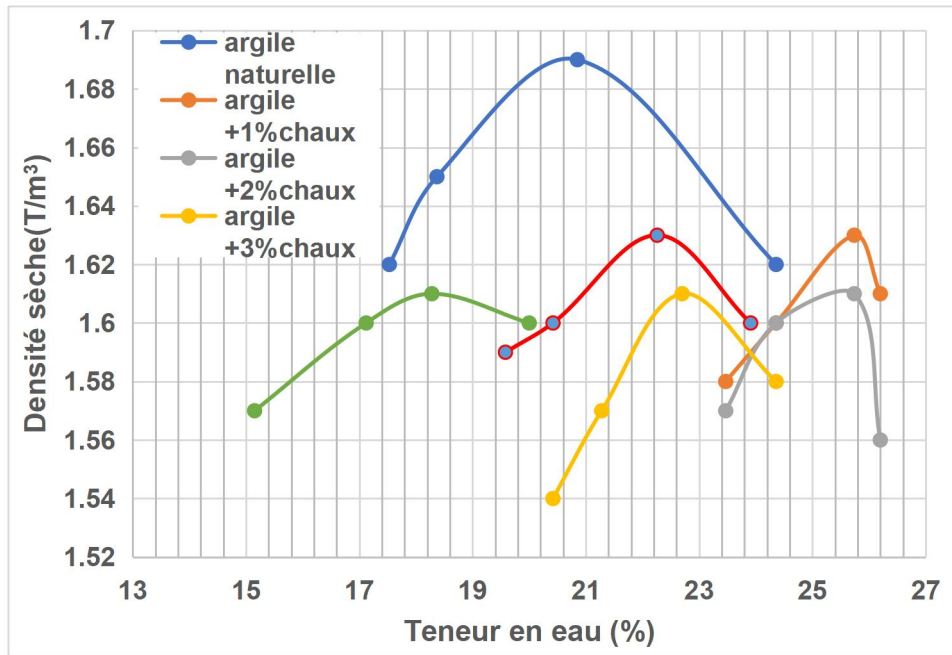


Figure IV.6 : Résultats de l'essai Proctor sur les différents mélanges «argile-chaux» (Guezzoul et Cherrak, 2024).

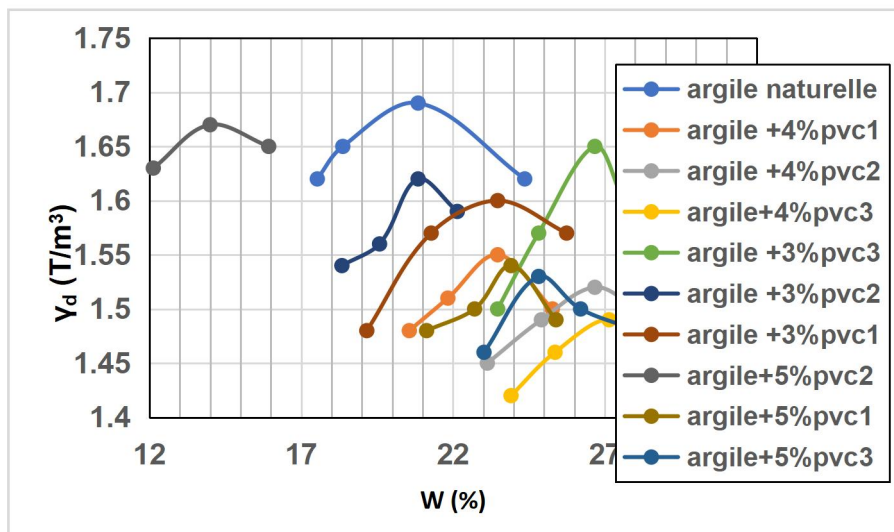


Figure IV.7 : Résultats de l'essai Proctor sur les différents mélanges «argile-PVC» (Guezzoul et Cherrak, 2024)

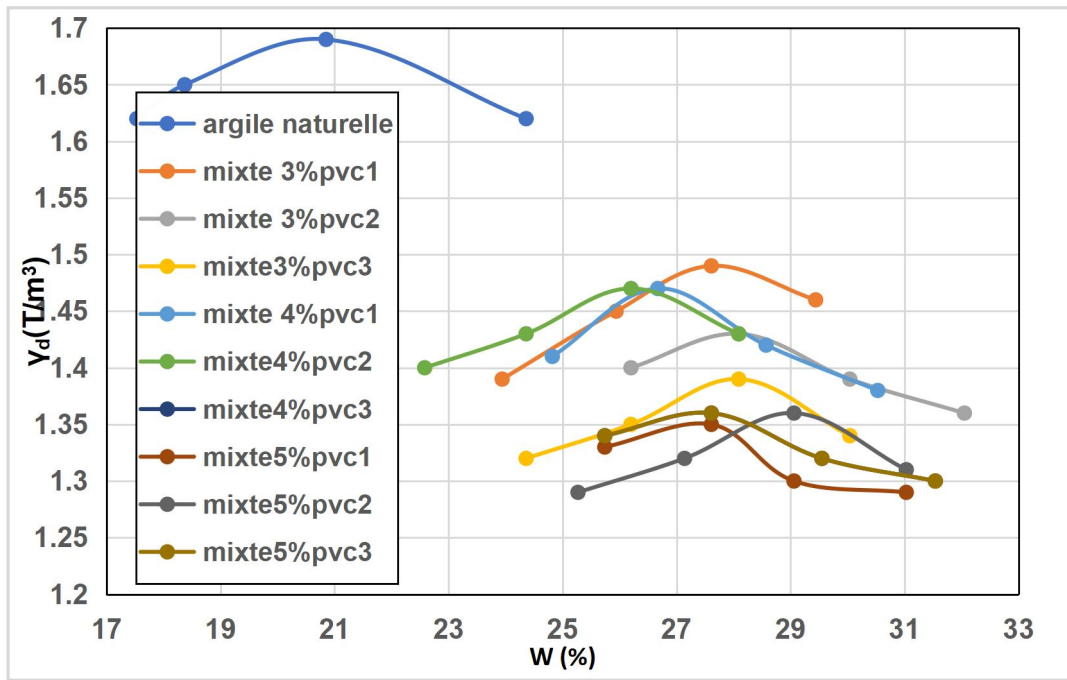


Figure IV.8 : Résultat de l'essai Proctor réalisé sur les différents mélanges contenant la chaux et PVC (Guezzoul et Cherrak, 2024)

Les résultats trouvés auparavant par Guezzoul et Cherrak (2024) ont été vérifiés et complétés en étudiant le cas de dosage de PVC de 2 et 4% et le cas d'ajout de fibres de dimensions 3.15-4 mm. Pour les derniers résultats, on a enregistré les mêmes tendances de courbes Proctor que celles obtenues auparavant (figures IV.9 et IV.1).

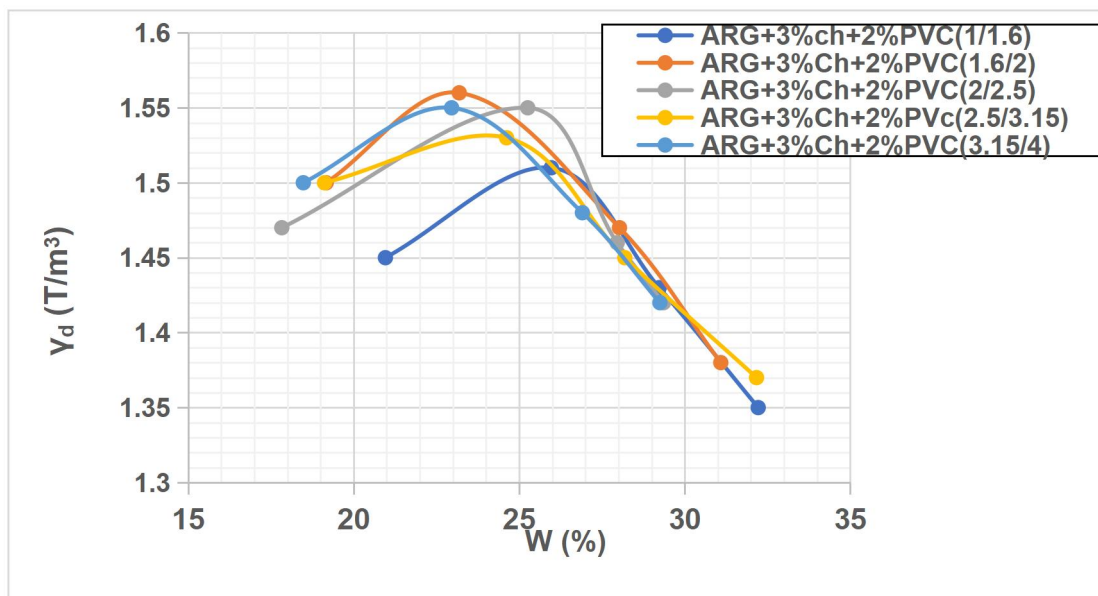


Figure IV.9 : Résultats de l'essai Proctor pour les différents mélanges contenant la chaux et 2% PVC.

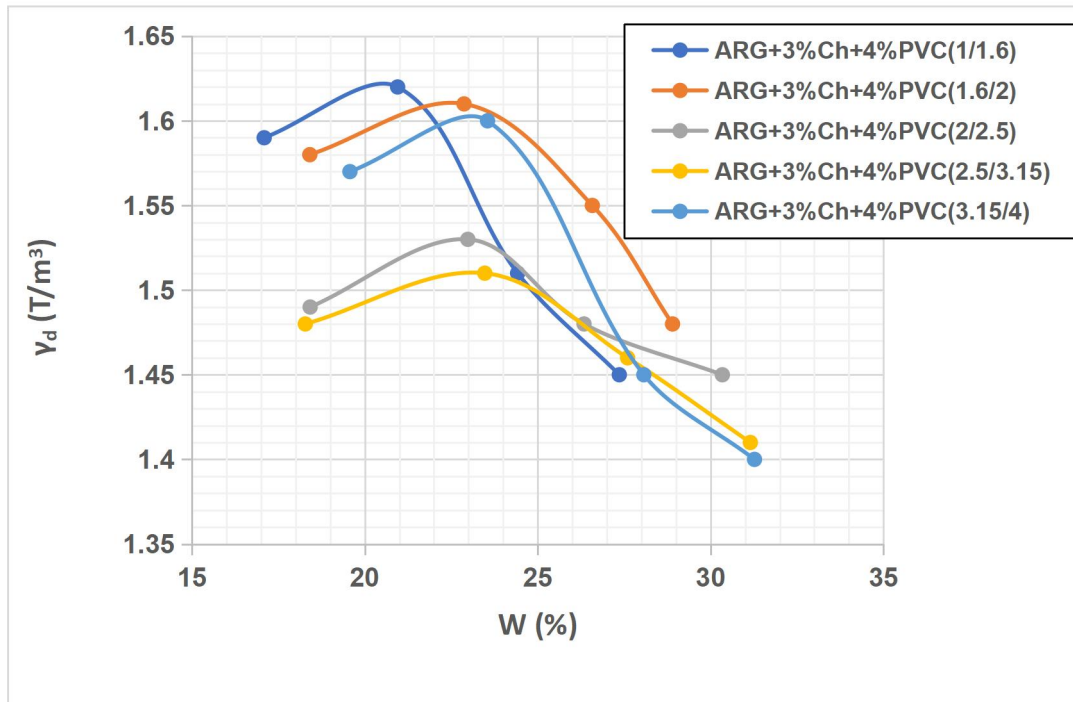





Figure IV.10 : Résultat de l'essai Proctor pour les différents mélanges contenant la chaux et 4% PVC.







IV.5. Essais de durabilité:

IV.5.1. 1<sup>ère</sup> série «Argile + 3% PVC»:

On présente sur le tableau IV.2 les images de quelques éprouvettes prises lors des 3 premiers cycles de séchage et humidification.




Tableau IV.2 : Images des éprouvettes prises lors de 3 premiers cycles






Cycle N°	Epreuves E1		
Cycle 01	 <p>Argile + 3% PVC 1/1.6 mm</p>	 <p>Argile + 3% PVC 3.15/4mm</p>	 <p>Argile Naturelle</p>

<p><b>Cycle 02</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 1/1.6m</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 3.15/4mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 2/2.5 mm</b></p>
<p><b>Cycle 03</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 1/1.6m</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 1.6/2mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 2/2.5mm</b></p>

On présente sur le tableau IV.3 les images de quelques éprouvettes prises lors des cycles 4, 5 et 6.

**Tableau IV.3 : Images des éprouvettes prises lors des cycles 4 à 6**

<p><b>Cycle N°</b></p>	<p><b>Eprouvettes E1</b></p>		
<p><b>Cycle 04</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 1/1.6 mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 1.6/2mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3% PVC 2/2.5mm</b></p>

<p><b>Cycle</b> <b>05</b></p>	 <p><b>Argile + 3%</b> <b>PVC 1/1.6mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3%</b> <b>PVC 1.6/2mm</b></p>	
<p><b>Cycle</b> <b>06</b></p>	 <p><b>Argile + 3%</b> <b>PVC 1/1.6mm</b></p>	 <p><b>Argile + 3%</b> <b>PVC 1.6/2mm</b></p>	

D'après les tableaux IV.2 et IV.3, on remarque que les éprouvettes E1 ayant résisté à 6 cycles de séchages et d'humification sont celles comportant 3% de PVC 1/1.6 mm et 1.6/2 mm.

Il est à noter que les éprouvettes comportant l'argile toute seule ou des fibres plastiques de dimensions supérieures à 2 mm ont subi plus de dégradations au cours des premiers cycles et se sont effondrés (collapse).

On présente sur les figures V.11 et IV.12 la variation de volumes et de la teneur en eau des différentes éprouvettes E1.

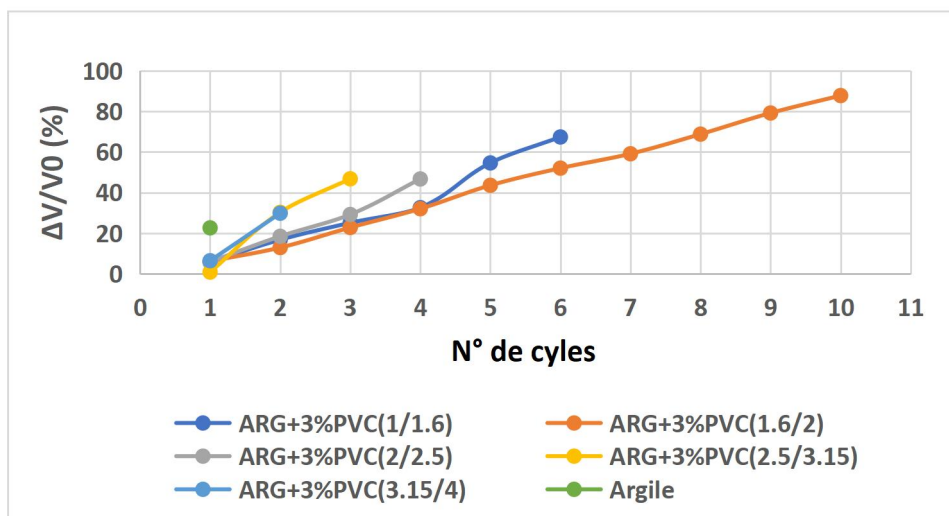


Figure IV.11 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% PVC.

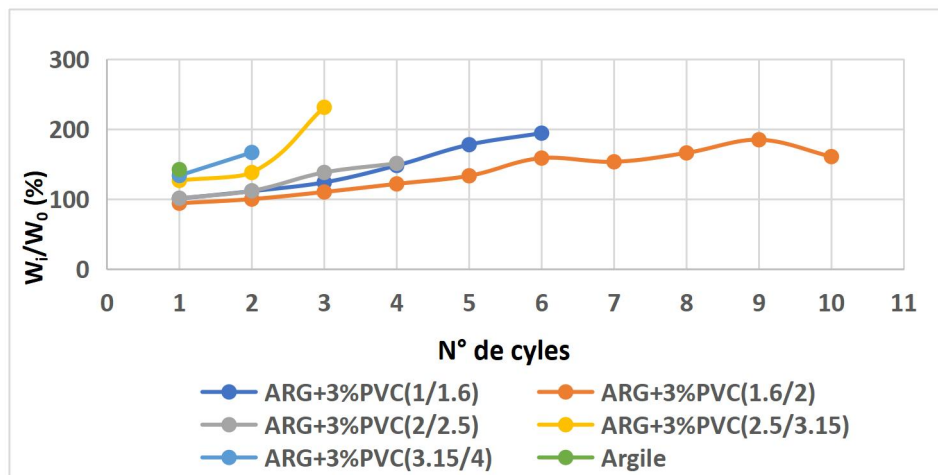


Figure IV.12 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% PVC.

La perte de masse qui représente la dégradation des éprouvettes lors des cycles de séchage et d’humidification, à partir duquel on peut remarquer que les éprouvettes contenant 3% de PVC de diamètres 1/1.6 mm et 1.6/2mm constituent les meilleurs mélanges ayant plus de durabilité (jusqu’à 10 cycles).

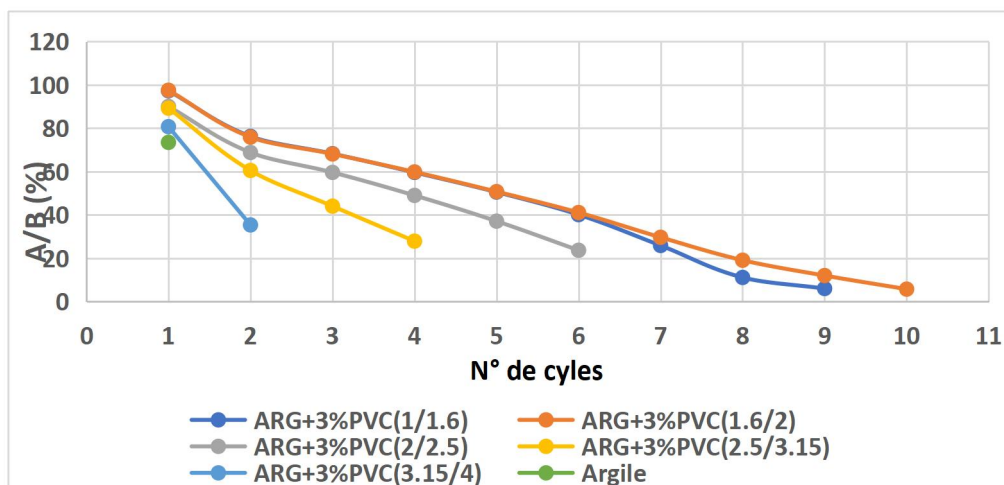


Figure IV.13 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% PVC.

#### IV.5.2. 2<sup>ème</sup> série «Argile +3% chaux + 2% PVC»:

On présente sur les figures V.14, IV.15 et IV.16 la variation de volumes et de la teneur en eau des différentes éprouvettes E1 ainsi que la perte de masse des éprouvettes E2.

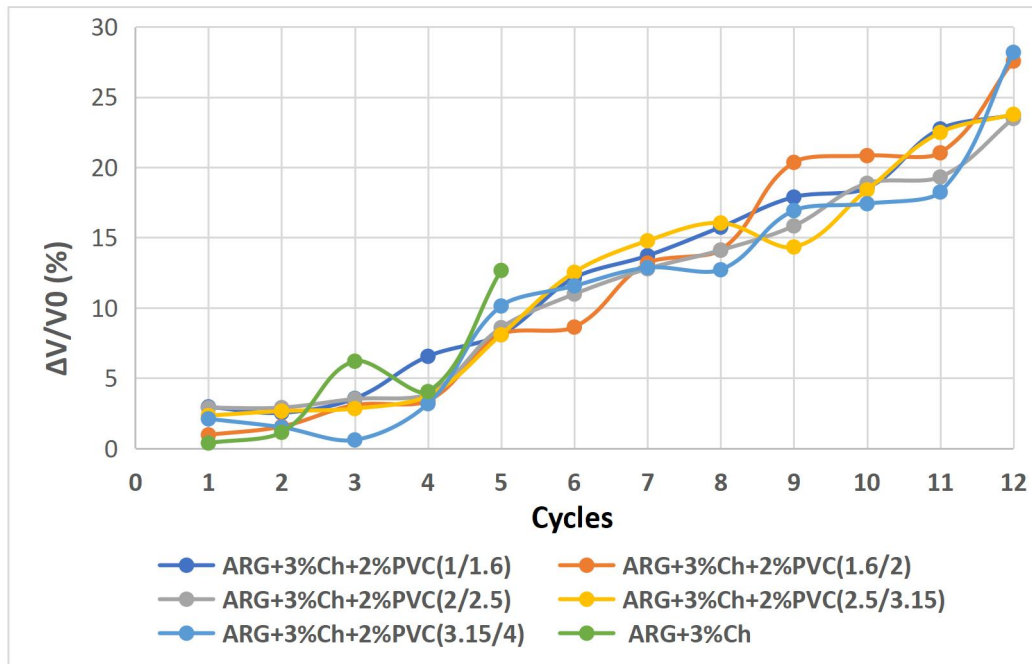


Figure IV.14 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.

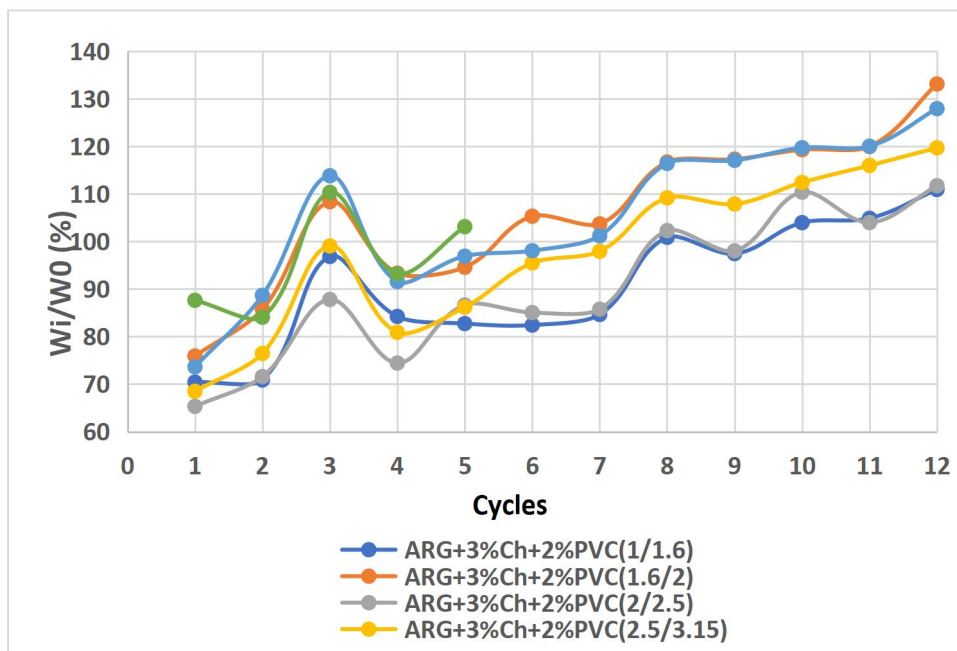


Figure IV.15 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.

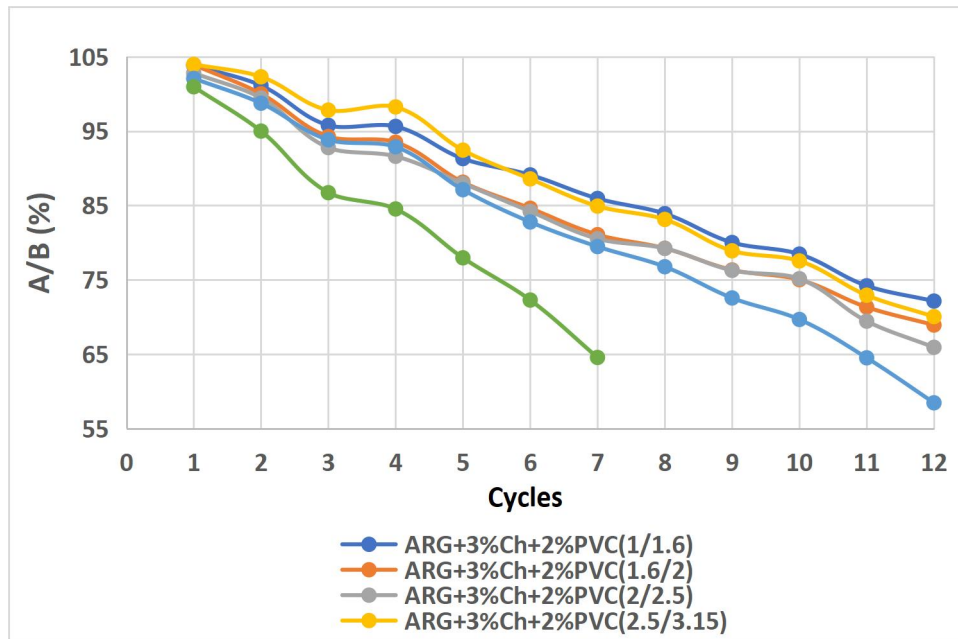


Figure IV.16 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 2% PVC.

IV.5.3. 3<sup>ème</sup> série «Argile +3% chaux + 3% PVC»:

On présente sur les figures V.17, IV.18 et IV.19 la variation de volumes et de la teneur en eau des différentes éprouvettes E1 ainsi que la perte de masse des éprouvettes E2.

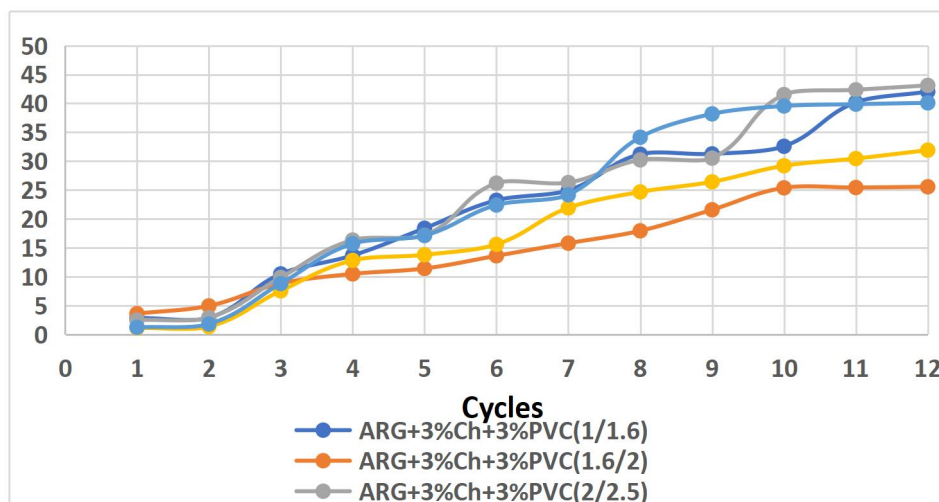


Figure IV.17 : Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.

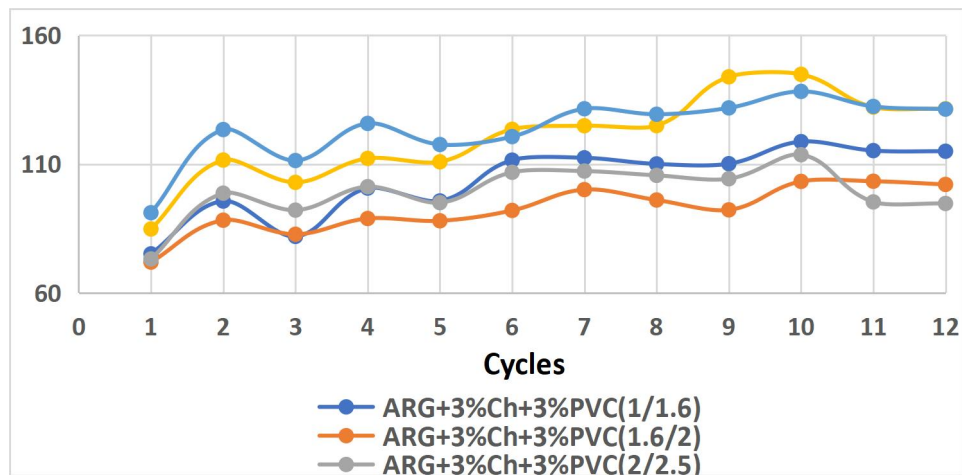


Figure IV.18 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.

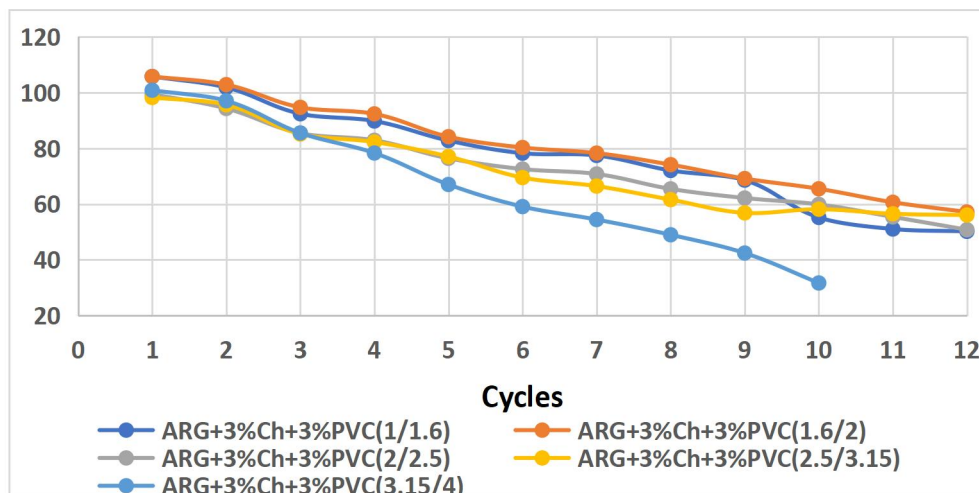


Figure IV.19 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 3% PVC.

**IV.5.4. 4<sup>ème</sup> série «Argile +3% chaux + 4% PVC»:**

On présente sur les figures V.20, IV.21 et IV.22 la variation de volumes et de la teneur en eau des différentes éprouvettes E1 ainsi que la perte de masse des éprouvettes E2.

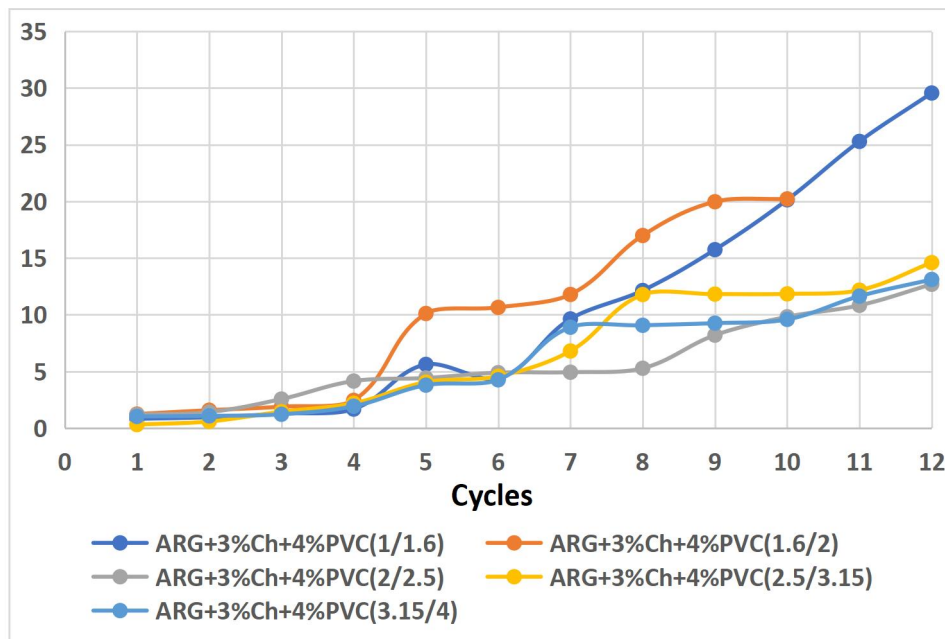


Figure IV.20: Variation de volume des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.

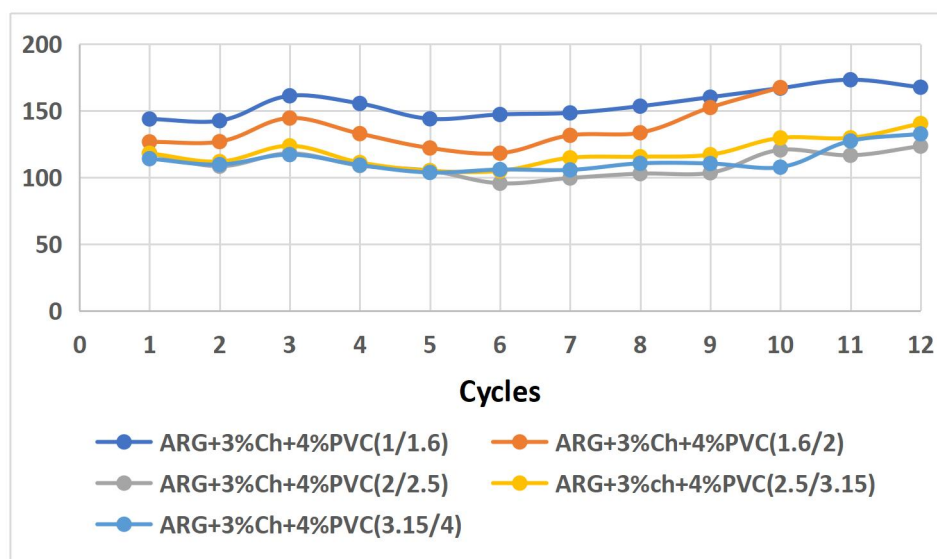


Figure IV.21 : Variation de la teneur en eau des différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.

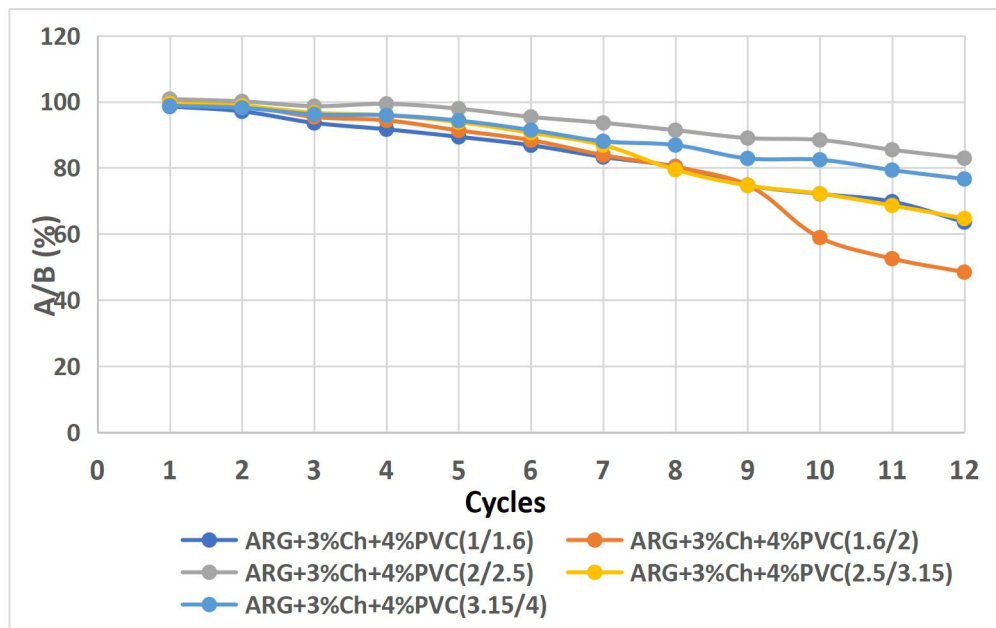


Figure IV.22 : Perte de masse pour les différentes éprouvettes contenant 3% de chaux et 4% PVC.

#### IV.6. Conclusion :

Suite aux résultats présentés, il ressort que les déchets plastiques sont une solution technique efficace et durable pour le renforcement de la structure des argiles. Il a été trouvé que le traitement de l'argile avec une quantité minimale de chaux ne suffit pas pour garantir une durabilité du sol stabilisé. En revanche, l'incorporation de fibres plastiques de type PVC augmente la durabilité du sol renforcé et cela est d'autant plus que le diamètre des fibres est petit (inférieur à 2.5 mm).

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Les déchets plastiques, en particulier ceux issus du PVC, posent un problème environnemental critique du fait de leur résistance à la biodégradation. Ils persistent dans l'environnement pendant plusieurs siècles, s'accumulant dans les écosystèmes et contribuant à la pollution des sols et des eaux. Face à cette situation, la valorisation de ces déchets dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction routière et la stabilisation des sols, constitue une alternative prometteuse. Elle permet non seulement de réduire l'impact environnemental de ces déchets, mais aussi d'améliorer les performances géotechniques des sols problématiques. Dans cette perspective, des études récentes ont montré que l'intégration de fibres plastiques issues de déchets dans les sols argileux traités à la chaux permet d'augmenter la portance, de réduire le retrait et d'améliorer la résistance au cisaillement. Toutefois, une question essentielle demeure : celle de la durabilité. En effet, la capacité du matériau renforcé à résister aux cycles de séchage et d'humidification, qui simulent les variations climatiques naturelles (saisons humides et sèches, gel/dégel, etc.), est cruciale pour garantir la pérennité des ouvrages réalisés avec ce type de sol stabilisé.

Le présent travail vise à répondre à cette problématique en évaluant la durabilité d'une argile à faibles caractéristiques géotechniques, traitée avec 3 % de chaux, et renforcée par des fibres issues de déchets plastiques de type PVC. Ces fibres, de tailles variables (1 à 4 mm), ont été incorporées à différents taux (2 à 4 % en masse sèche). Des essais de durabilité, fondés sur des cycles alternés d'humidification et de séchage, ont été réalisés pour simuler les conditions environnementales réelles auxquelles un matériau stabilisé pourrait être exposé à long terme.

Les résultats expérimentaux montrent que l'argile traitée uniquement à la chaux présente une dégradation rapide dès les premiers cycles, avec des fissurations, pertes de cohésion, et parfois un effondrement du matériau. En revanche, les mélanges renforcés avec des fibres PVC ont démontré une résistance nettement supérieure. Ces fibres agissent comme des éléments de renforcement mécanique, limitant les déplacements internes, retardant la formation de fissures, et contribuant à maintenir l'intégrité du matériau dans le temps. Il a également été démontré que la durabilité dépend fortement du diamètre et du pourcentage des fibres ajoutées. Plus précisément, les fibres de petites dimensions (inférieures à 2,5 mm) permettent une meilleure distribution dans la matrice argileuse, assurant une compacité plus homogène et une efficacité renforcée du traitement. Ainsi, le double effet chaux-fibres PVC se traduit par une synergie bénéfique, combinant les effets chimiques de stabilisation de la chaux avec le renforcement mécanique des fibres.

Cette approche permet non seulement d'améliorer la performance et la durabilité des sols argileux localement disponibles, mais aussi de répondre à un enjeu environnemental majeur : celui de la réduction et de la valorisation des déchets plastiques. Elle s'inscrit pleinement dans une logique de développement durable, offrant une solution technique, économique et écologique aux problématiques contemporaines de la construction et de la gestion des déchets.

### Perspectives

Concernant la continuité de ces travaux de recherche, nous proposons d'examiner les points suivants :

- Etudier l'effet de temps de cure sur l'évolution de la résistance des éprouvettes confectionnés avec de l'argile prétraitée et les fibres plastiques, à 30, 60 et 90 jours.
- Réaliser des essais de compression simple sur des éprouvettes cylindriques ;
- Utiliser le ciment comme agent de traitement à la place de la chaux.

## **Références bibliographiques :**

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)

Cousin, I., Bruand, A., & Le Bissonnais, Y. (2003). Stabilisation des sols : Principes et applications. *Sciences du Sol*, 1(2), 85–98.

COMPARATIVE STUDY ON ENHANCING THE MECHANICAL

PROPERTIES OF CLAYEY SAND WITH WASTE PLASTIC FIBERS AND LIME

El Malki, A., Malki, M., & El Hammoumi, M. (2017). Effet de la chaux sur les propriétés géotechniques d'un sol argileux de la région de Khouribga (Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, Vol. 5(1), pp. 8-14.

G. Gasc-Barbier, A. Lassin (2013). Les argiles et leurs propriétés. Éditions Technip.

Geotechnical Engineering and Engineering Geology

Gourc, J. P., & Albergel, J. (2003). Géotechnique appliquée aux projets de génie civil. Presses de l'École des Mines.

Grim, R.E. (1968). *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill.

<https://www.graymont.com/fr/marches/materiaux-de-construction/la-chaux-dans-la-stabilisation-des-sols>

<https://www.habitatpresto.com/mag/construction/stabilisation-maison-sol-argileux>

Jones, L. D., & Jefferson, I. (2012). *Expansive soils*. ICE Publishing.

KHEBIZI, W, (2011) : « Etude de la durabilité des sols argileux améliorés avec des ajouts minéraux », Université Hassiba Ben-Bouali de Chleff.

Mitchell, J.K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd Ed.). Wiley.

Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. John Wiley & Sons.

Saberian, M., Li, J., & Soleimanbeigi, A. (2020). Recycled waste materials for soil improvement: A review. *Environmental Research*, 188, 109771.

Sherwood, P. T. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime*. Transport Research Laboratory, HMSO, London.

Source: L'Auteur (2019)