



Université Mohamed khider –Biskra

Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme, de Génie Civil et de l'Hydraulique

Département de Génie civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**GACI Ouajdane**

Le: [Click here to enter a date.](#)

## Effet de la poudre des déchets de briques cuites et du sable de dune broyé sur la stabilisation des mortiers de terre

Jury :

---

Encadreur : Dr. IZEMMOUREN Ouarda

Année universitaire : 2024/2025

*Tout d'abord, je remercie et loue Dieu Tout-Puissant. Louange et remerciements à Dieu Tout-Puissant, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies, et qui m'a accordé la santé, la détermination et la patience pour surmonter tous les défis qui ont accompagné le processus de préparation de ce mémorandum. Louange à Lui dans le premier et le dernier, et merci à Lui pour Sa guidance et Sa direction à chaque étape.*

*Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude et ma haute considération à ma respectée encadrante, **Docteure Ouarda Izemmouren**, qui a été, après Dieu, la principale source de réussite de ce travail. Elle a été une guide précieuse, patiente et compréhensive, dont le suivi rigoureux et le soutien constant ont permis à cette recherche d'avancer avec confiance. Aucune parole ne saurait exprimer pleinement ma reconnaissance envers elle. Qu'Allah la récompense pour tout le bien qu'elle m'a apporté.*

*Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères aux honorables membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de discuter ce mémoire, et qui ont consacré de leur temps et de leur énergie pour l'évaluer et l'enrichir par leurs remarques et observations scientifiques pertinentes.*

***Enfin**, j'exprime toute ma reconnaissance à mes camarades d'étude, dont le soutien et l'accompagnement m'ont été d'un grand secours tout au long de ce parcours. Nous avons partagé les efforts et les aspirations, les défis et les réussites, et leur esprit de collaboration et d'encouragement a laissé une empreinte positive dans mon cheminement académique.*

À celui qui a été mon ombre et mon pilier,  
À mon cher père, qui m'a accompagnée pas à pas, soutenu dans chaque épreuve, et dont la présence dans ma vie a été un véritable refuge. Cette réussite est le fruit de ses efforts, de son dévouement et de son soutien inconditionnel.

À ma chère mère, source de tendresse et secret de ma patience,  
Aussi loin que peuvent aller les mots, je ne pourrai jamais lui rendre ce qu'elle m'a offert. Ses prières ont illuminé mon chemin, sa tendresse m'a portée, et son sourire m'a consolée dans chaque moment de faiblesse.

À mes chers frères, Lahcen et Hussein, et mon petit frère Samir, compagnon de mon enfance et de mon innocence.

À mes chères sœurs : Hanan, Hafidha, Samira, Maram et Souheir,  
A mes nièces et neveux,  
Vous avez toujours été le soutien et la lumière dans mes moments de fatigue, des compagnes de cœur fidèles tout au long du chemin.

À ma sœur bien-aimée Souheir, compagne de route et battement de mon cœur.

A tous mes oncles and mes tantes

À mon amie d'enfance et sœur de cœur, Fatima,  
Et à mes fidèles amies Aïcha et Amira,

A tous mes camarades, et surtout Douaa.

## Résumé

Cette étude vise à valoriser les déchets de briques cuites et le sable de dune broyé comme liants alternatifs dans la production d'un mortier à base de terre, en utilisant la chaux comme stabilisant. Dans ce cadre, un pourcentage fixe de chaux (10 %) a été utilisé, tandis que les proportions des matériaux ajoutés ont varié selon trois formulations :

- Formulation 1 : 30 % sable de dune broyé + 30 % poudre de briques cuites
- Formulation 2 : 20 % sable de dune broyé + 40 % poudre de briques cuites
- Formulation 3 : 10 % sable de dune broyé + 50 % poudre de briques cuites

Les échantillons ont été soumis à des essais mécaniques (compression et flexion) ainsi qu'à des tests de durabilité (absorption totale, absorption capillaire, gonflement et abrasion).

Les résultats ont montré une amélioration significative des propriétés mécaniques et de la durabilité par rapport à l'échantillon témoin. La formulation 3 (10 % SDB et 50 % PDBC) a présenté les meilleures performances, avec une augmentation de **30,75 %** de la résistance à la compression (13,05 MPa contre 9,98 MPa pour le témoin) et une augmentation de **112,1 %** de la résistance à la flexion. On a également observé une réduction de **44,7 %** de l'absorption capillaire, **17,4 %** de l'absorption totale, **41,4 %** du gonflement et une amélioration de **78,7 %** de la résistance à l'abrasion.

Ces résultats indiquent que l'utilisation combinée de la poudre de briques cuites et du sable de dune broyé constitue une alternative efficace et durable pour améliorer les performances du mortier de terre.

**Mots-clés :** Mortier de terre, chaux, déchets de briques cuites, sable de dune, propriétés mécaniques, durabilité.

## ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تثمين نفايات الطوب المحروق ورمل الكثبان المطحون كمثبتات بديلة في إنتاج ملاط قائم على التربة باستخدام الجير، وذلك من خلال تقييم تأثيرها على الخصائص الميكانيكية والمتانة. في هذا الإطار، تم اعتماد نسبة ثابتة من الجير (10%)، بينما تم تغيير نسب المواد المضافة في ثلاث خلطات مختلفة:

- الخلطة الأولى: 30% رمل كثبان مطحون + 30% نفايات طوب محروق
- الخلطة الثانية: 20% رمل كثبان مطحون + 40% نفايات طوب محروق
- الخلطة الثالثة: 10% رمل كثبان مطحون + 50% نفايات طوب محروق

خضعت العينات لاختبارات ميكانيكية (الضغط والانحناء) واختبارات المتانة (الامتصاص الكلي، الامتصاص الشعري، الانتفاخ، ومقاومة التآكل)

أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية والمتانة مقارنة بالعينة المرجعية، حيث سجلت الخلطة الثالثة (10% SDB و 50% PDBC) أفضل أداء بزيادة في مقاومة الضغط بنسبة **30.75%** (13.05 MPa مقابل 9.98 MPa للعينة المرجعية)، وزيادة في مقاومة الانحناء بنسبة **112.1%**. كما تم تسجيل انخفاض في الامتصاص الشعري بنسبة **44.7%**، والامتصاص الكلي بنسبة **17.4%**، والانكماش بنسبة **41.4%**، مع تحسن في مقاومة التآكل بنسبة **78.7%**.

تشير هذه النتائج إلى أن استعمال مسحوق الطوب المحروق مع رمل الكثبان المطحون يشكل خياراً فعالاً لتحسين أداء ملاط التربة، ويُعد بديلاً واعداً ومستداماً في مجال البناء الإيكولوجي.

**الكلمات المفتاحية:** ملاط التربة، الجير، نفايات الطوب المحروق، رمل الكثبان، الخصائص الميكانيكية، الديمومة.

# Abstract

This study aims to valorize waste fired brick powder and crushed dune sand as alternative stabilizing materials in the production of soil-based mortar, using lime as the primary binder. In this context, a fixed lime content of 10% was used, while the proportions of the added materials varied across three different mixtures:

- Mixture 1: 30% crushed dune sand + 30% fired brick waste powder
- Mixture 2: 20% crushed dune sand + 40% fired brick waste powder
- Mixture 3: 10% crushed dune sand + 50% fired brick waste powder

The samples were subjected to mechanical tests (compressive and flexural strength) as well as durability tests (total absorption, capillary absorption, swelling, and abrasion resistance).

The results showed a significant improvement in mechanical and durability properties compared to the control sample. Mixture3 (10% CDS and 50% FBP) demonstrated the best performance, with a **30.75%** increase in compressive strength (13.05 MPa vs. 9.98 MPa for the control) and a **112.1%** increase in flexural strength. Additionally, capillary absorption decreased by **44.7%**, total absorption by **17.4%**, swelling by **41.4%**, and abrasion resistance improved by **78.7%**.

These findings indicate that the combination of fired brick waste powder and crushed dune sand is a promising and sustainable solution for enhancing the performance of stabilized earthen mortars.

**Keywords:** Earthen mortar, lime, fired brick waste, dune sand, mechanical properties, durability.

## Contents

Remerciements **Error! Bookmark not defined.**

Dédicace **Error! Bookmark not defined.**

Résumé III

ملخص IV

Abstract V

LISTE DES FIGURES IX

LISTE DES TABLEAUX XI

INTRODUCTION GENERALE I

*CHAPITRE 01 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE* 4

1.1 Introduction 4

1.2 Historique de construction en terre 5

1.2.1 La terre, un matériau de construction 6

1.3 Techniques d'utilisation dans la construction terre 6

1.3.1 Terre damée 7

1.3.2 Le torchis 7

1.3.3 Blocs de terre comprimée (BTC) 8

1.3.4 Cob 8

1.3.5 Adobe 9

1.4 Avantages et Inconvénients de la construction en terre 9

1.4.1 Avantages de la construction en terre 9

1.4.2 Inconvénients de la construction en terre 11

1.5 La terre comme matériau de construction 11

1.5.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux 12

1.5.1.1 Argile 12

1.5.1.3 Classification des argiles 14

1.6 Stabilisation de terre 15

1.6.1 La stabilisation mécanique 16

1.6.2 La stabilisation physique 17

1.6.3 Stabilisants chimiques 18

- Réaction pouzzolanique 20

- Carbonatation 20

1.7 L'influence de l'ajout de chaux sur les propriétés mécaniques du matériau stabilisé 21

1.8 Définition du mortier de terre 24

1.8.1 Principales caractéristiques du mortier de terre 25

1.9 Fabrication des briques cuites	26
1.10 Les déchets de briques rouges	27
1.10.1 Définition de déchet de briques cuites	28
1.10.2 La méthode que nous avons adoptée pour le recyclage des déchets de briques	28
1.11.Sable de dune	29
1.12 Conclusion	31

## *CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES*

2.1. Introduction	30
2.2Matériaux utilisés	30
2.2.1 Sol	30
2.2.1.1 Origine de sol	30
2.2.1.2 caractéristiques physiques du sol	30
2.2.2 Sable concassé	35
2.2.2.1 Caractéristique physique du sable	35
2.2.3 La chaux	36
2.3 Conduite de l'essai	38
2.3.1 Matériel spécifique	38
2.3.2 Composition des mélanges	38
2.3.3 Préparation des mélanges	39
2.3.4 Mode de cure des mortiers	39
2.4 Réalisation des essais	40
2.4.1 Propriétés physique et mécanique	40
2.4.1.1 Mesure de la masse volumique (NF P 94-054)	40
2.4.1.2 Essai de compression simple (NF XP-13 901)	40
2.4.1.3 Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5)	41
2.5 Essai de la durabilité	42
2.5.1 Absorption capillaire (NF XP-P 13 901)	42
2.5.2 Absorption totale d'eau	43
2.5.3 Gonflement	43
2.5.4 Résistance à l'abrasion	44
2.6 Conclusion	45

## *CHAPITRE 03: RESULTATS ET DISCUSSION*

3.1 Introduction	46
3.2 la impact de mixte (brique broyée- sable ) sur la densité de mortier de terre	47
3.3 Influence de mixte (brique broyée- sable) sur la résistance à la compression	48



3.4	Influence de mixte (brique broyée- sable) sur la résistance à la flexion	51
3.5	L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la durabilité de mortier de terre	52
3.5.1	Absorption capillaire	52
3.5.2	Absorption totale	54
3.6	L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la Gonflement	56
3.7	L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la Résistance à l'abrasion	57
3.8	Conclusion	58
	Conclusion générale	59
	Référence bibliographique	61

# LISTE DES FIGURES

---

## CHAPITRE 01 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1. 1 L'architecture en terre dans le monde.5

Figure 1. 2 Constructions en terre dans le monde : (a) Ville de Shibam, Yémen ; (b) Grande Muraille de Chine, Chine6

Figure 1. 3 a) Méthode de fabrication d'un mur en pisé pour une maison Hmong au Vietnam ; b) L'entrée de l'édifice du Projet Eden en Cornouailles, en Angleterre, au Royaume-Uni7

Figure 1. 4 Le torchis7

Figure 1. 5 (a) Une école primaire en blocs de terre comprimée dans le village de Tanouan Ibi (b) Maison de brique de terre compressée.8

Figure 1. 6 Maison en torchis8

Figure 1. 7 Fabrication de briques d'adobe à petite échelle industrielle à Palencia, Espagne. b) Stockage massif de briques d'adobe, Villa Janna, Marrakech, Maroc. c) Maison contemporaine en adobe non enduite, Lienzo de Barro, Équateur. d) École maternelle contemporaine fabrication de briques d'adobe à petite échelle industrielle à Palencia, Espagne.9

Figure 1. 8 Echantillons d'argile13

Figure 1. 9 forme géométrique des tétraèdres et octaèdres13

Figure 1. 10 Couches tétraédrique (cuisinier, 2002)14

Figure 1. 11 Couches Octaédriques (cuisinier, 2002)14

Figure 1. 12 Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques , (Guettala et al., 2002)17

Figure 1. 13 Influence de la teneur en sable sur la résistance à la compression ( Guettala et al., 2002)18

Figure 1. 14 Réaction pouzzolanique20

**Figure 1. 15** Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et du temps de cure2222

Figure 1. 16 Évolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux.2223

Figure 1. 17 SEM micrographs of adobe bricks: (a) 0% lime, (b) 4% lime, (c) 6% lime, (d and (e) 10% lime and (f) 12% lime24

Figure 1. 18 Reconstitution archéologique d'un mur. Briques de terre crue et mortier de terre fibré.25

Figure 1. 19 Procédé de fabrication de briques cuites27

Figure 1. 20 Déchet de briques cuites27

Figure 1. 21 Brique broyée29

Figure 1. 22 Sable de dune30

## CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure 2. 1	Le sol	30
Figure 2. 2	Mesure La masse volumique apparente , absolue	31
Figure 2. 3	Granulométrie du sol	32
Figure 2. 4	Détermination de WL et WP	33
Figure 2. 5	Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande	34
Figure 2. 6	Bleu méthylène	34
Figure 2. 7	Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068)	35
Figure 2. 8	Analyse granulométrique du sable concassé	36
<b>Figure 2. 9</b>	<b>la chaux vive</b>	<b>36</b>
Figure 2. 10	Briques broyées	37
<b>Figure 2. 11</b>	<b>Moule prismatique</b>	<b>38</b>
Figure 2. 12	Préparation de la pâte de terre dans les moule.	39
Figure 2. 13	Conservation des blocs au laboratoire sur l'étuve	40
Figure 2. 14	Essai de compression	41
Figure 2. 15	Essai de flexion	42
Figure 2. 16	Essai d'Absorption par capillaire	43
Figure 2. 17	Essai de gonflement	44
Figure 2. 18	Essai d'abrasion	45

### ***CHAPITRE 03: RESULTATS ET DISCUSSION***

Figure 3. 1	Influence du dosage mixte sur la densité des mortiers de terre	48
Figure 3. 2	Influence du dosage de mixte la résistance à la compression des mortiers de terre	51
Figure 3. 3	Influence du dosage mixte sur la résistance à la flexion des mortiers de terre	52
Figure 3. 4	Influence du dosage Mixte sur l'absorption capillaire des mortiers de terre	54
Figure 3. 5	Influence du dosage Mixte sur l'absorption totale des mortiers de terre	55
Figure 3. 6	Influence du dosage Mixte sur Gonflement des mortiers de terre	57
Figure 3. 7	Influence du dosage mixte sur la Résistance à l'abrasion de terre.	58

# **LISTE DES TABLEAUX**

---

## ***CHAPITRE 01 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE***

Tableau 1. 1 Classification des principaux types de minéraux argileux15

Tableau 1. 2 Des études ultérieures30

## ***CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES***

Tableau 2. 1:les masses volumiques du sol31

Tableau 2. 2 : limites d'Atterberg du sol33

Tableau 2. 3 :Valeur de bleu méthylène35

Tableau 2. 4 : La masse volumique du Sable concassé35

Tableau 2. 5 : Analyse chimique de la chaux vive (Izemouren ,2015)37

Tableau 2. 6 : Caractéristiques physique de la chaux vive37

Tableau 2. 7 : La masse volumique Sable de dune et Brique broyé38

Tableau 2. 8 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.38

# INTRODUCTION GENERALE

Avec le développement des matériaux de construction modernes tels que le béton et l'acier, l'utilisation de la construction en terre a considérablement diminué. Néanmoins, les estimations indiquent que plus de deux milliards de personnes vivent actuellement dans des habitations construites en terre à travers le monde.

Actuellement, face aux inquiétudes croissantes concernant la dégradation de l'environnement et la forte consommation d'énergie liée aux matériaux industriels, la construction en terre suscite à nouveau un intérêt croissant en tant que matériau de construction durable. [1]

Contrairement au béton et à l'acier, la terre naturelle est un matériau de construction pouvant être utilisé directement sans consommation énergétique élevée, ce qui lui confère un caractère de durabilité environnementale. La terre en tant que matériau de construction présente de nombreux avantages d'un point de vue environnemental et social, ainsi qu'une importance culturelle liée au patrimoine architectural traditionnel.

Cependant, malgré ces qualités, les constructions en terre présentent souvent des limitations techniques majeures, notamment une faible résistance mécanique, une fissuration due au phénomène de retrait, ainsi qu'une faible résistance aux agressions hydriques, ce qui limite leur durabilité et leur performance structurelle.

Pour remédier à ces problématiques, des techniques avancées de stabilisation de la terre sont employées, incluant des traitements physiques, chimiques et mécaniques visant à améliorer ses propriétés structurelles et fonctionnelles. Ces interventions ont permis le développement de divers matériaux à base de terre, tels que l'adobe, le pisé, le torchis renforcé par des fibres végétales, les blocs de terre comprimée, le mortier de terre, ainsi que d'autres produits traités répondant aux exigences modernes de la construction. Le mortier de terre est un matériau de construction traditionnel largement utilisé dans les techniques de construction en terre crue. Il se compose d'un mélange homogène de terre, de sable et d'eau, auquel peuvent être ajoutées des fibres végétales afin d'améliorer les propriétés structurelles. Comparé au mortier de ciment couramment utilisé, le mortier de terre présente un avantage environnemental significatif, car il ne nécessite pas de traitements thermiques à haute température tels que la cuisson ou la cuisson à four, ce qui réduit considérablement les

Émissions de gaz à effet de serre et contribue à diminuer l’empreinte carbone des processus de construction.

Le recyclage des déchets de briques cuites constitue une solution durable offrant des ressources renouvelables pour soutenir la construction et protéger l’environnement, d’autant plus que ces déchets sont abondants et souvent négligés sur les chantiers. L’utilisation croissante de matériaux naturels tels que les briques de terre comprimée, le torchis et l’adobe, ainsi que des mortiers terreux à faible impact environnemental, se développe dans la construction de maisons en terre et de bâtiments écologiques. La préparation du mortier de terre nécessite un mélange précis de terre, de sable et d’eau. Cependant, ce mortier présente une faible résistance à l’eau et aux intempéries telles que l’humidité, les précipitations et le vent, ce qui entraîne un besoin fréquent d’entretien. Ainsi, la recherche se concentre sur le développement de mortiers terreux plus robustes et durables, notamment par l’ajout de matériaux de remplissage et l’amélioration des propriétés structurelles afin d’accroître leur résistance aux agressions environnementales. Dans ce travail, l’effet de la poudre des déchets de briques cuites et du sable de dune broyé sur la résistance mécanique et la durabilité du mortier de terre stabilisé à la chaux a été étudié.

L’objectif principal de ce travail est l’étude suivante :

Le **premier chapitre** présente une revue bibliographique, en commençant par la définition des différents types d’argile et les méthodes de stabilisation qui leur sont associées. Il expose ensuite les études antérieures ayant examiné l’effet des ajouts minéraux sur la résistance mécanique et la durabilité des matériaux à base de terre.

Le **deuxième chapitre** est consacré à l’identification et à la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude, notamment la terre, le sable concassé, la chaux, le sable de dune broyé et les déchets de briques cuites comme ajout. Il présente également les différentes formulations de mélange, les méthodes de stockage, ainsi que les protocoles expérimentaux adoptés.

Le **troisième chapitre** regroupe l’ensemble des résultats obtenus et les discussions qui en découlent, en se concentrant sur l’analyse de l’effet des déchets de briques cuites et du sable de dune broyé sur les résistances mécaniques et la durabilité du mortier de terre stabilisé à la

chaux. Les essais utilisés incluent l'absorption totale, l'absorption capillaire, le gonflement, l'abrasion et l'érosion par goutte à goutte.

Enfin, une **conclusion générale** résume les principaux résultats obtenus au cours de cette étude, accompagnée des recommandations proposées.

**CHAPITRE 01**  
**RECHERCHE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**



## ***CHAPITRE 01 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE***

### **1.1 Introduction**

La terre, matériau géologique abondant et ubiquitaire, est employée dans le domaine de la construction depuis des millénaires, faisant de l'architecture en terre crue l'une des formes d'habitat les plus répandues à l'échelle mondiale. [2]

Avec la montée des préoccupations liées à la dégradation de l'environnement et à la consommation énergétique associée aux matériaux industriels, la construction en terre regagne de l'intérêt en tant que matériau de construction durable. Cependant, les défauts intrinsèques de la terre, tels que sa faible résistance et sa sensibilité à l'eau, entravent son adoption dans le secteur de la construction moderne. De plus, l'absence de normes de conception spécifiques aux briques en terre crue limite sa diffusion et son utilisation à grande échelle. [3]

Bien que la terre soit un matériau de construction local, peu coûteux et largement disponible, son utilisation dans le domaine du bâtiment présente plusieurs défis techniques, notamment sa faible résistance à l'eau et ses propriétés mécaniques limitées par rapport aux matériaux industriels modernes. Pour surmonter ces limitations, des techniques de stabilisation ont été développées, reposant sur l'ajout de liants hydrauliques tels que la chaux ou le ciment, ce qui a permis d'améliorer les performances structurelles des briques de terre et de renforcer leur durabilité en milieu humide.

Dans le même contexte, les études récentes ont mis en évidence le potentiel prometteur de la construction en terre par l'incorporation de déchets industriels comme matériaux additifs, notamment les résidus de briques et les granulats recyclés. Cette approche a contribué à améliorer les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre, tout en réduisant la consommation de ressources naturelles et l'impact environnemental.

## 1.2 Historique de construction en terre

L'utilisation des matériaux terreux dans la construction remonte à environ dix mille ans, l'argile constituant le principal composant. De nos jours, près des deux tiers de la population mondiale vivent dans des habitations construites entièrement ou partiellement à partir de matériaux argileux bruts non cuits. Ces constructions en terre sont présentes sur tous les continents. [4]



**Figure 1.** 1L'architecture en terre dans le monde [4]

L'Algérie abrite de nombreuses constructions traditionnelles en terre, connues sous le nom de « ksour », qui constituent une part essentielle et indissociable du patrimoine culturel et architectural du pays. En 1943, l'architecte Michel Loix a conçu un hôpital régional dans la ville d'Adrar, considéré comme l'un des exemples les plus remarquables d'édifices publics ayant intégré les techniques de construction en terre [5]. La terre est depuis longtemps reconnue comme un matériau de construction naturel, fiable et durable, largement utilisé à travers l'histoire de l'humanité. Lorsqu'elle est associée aux techniques de construction modernes, elle constitue une solution efficace pour la réalisation de bâtiments contemporains et respectueux de l'environnement. Actuellement, environ la moitié de la population mondiale vit dans des habitations en terre. Bien que ce type de construction soit principalement répandu dans les régions moins développées, il est également présent dans les pays industrialisés tels que l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni, qui compte à lui seul plus de 500 000 constructions en terre. Au cours des dernières années, les techniques de construction en terre ont connu une expansion significative dans des régions comme l'Iran, les États-Unis, l'Europe et le Moyen-Orient. Cette progression est principalement motivée par l'intérêt croissant pour des pratiques de construction durables et écologiques [6]

### 1.2.1 La terre, un matériau de construction

Bien qu'il n'existe pas de consensus précis sur la date d'apparition de la construction en terre, les découvertes archéologiques indiquent que cette technique remonte à plus de 10 000 ans, coïncidant avec l'émergence des premières sociétés agricoles (12 000–7 000 av. J.-C.). Des blocs de terre ont été retrouvés au Turkménistan, datant de 8 000 à 6 000 av. J.-C., ainsi qu'en Mésopotamie durant la période d'El-Obeid (5 000–4 000 av. J.-C.), et dans le bassin du Tigre où des briques d'adobe ont été datées aux alentours de 7 500 av. J.-C. De nombreux exemples témoignent de la durabilité de la construction en terre, notamment certaines sections de la Grande Muraille de Chine édifiées en terre compactée il y a environ 3 000 ans, l'usage documenté chez les Phéniciens dans le bassin méditerranéen, ou encore le temple Hōryū-ji au Japon, dont les murs en terre remontent à plus de 1 300 ans. On peut également citer la ville de Chan Chan au Pérou, le village de Taos au Nouveau-Mexique, ainsi que la ville de Shibam au Yémen, célèbre pour ses immeubles en terre de plusieurs étages construits il y a environ un siècle. Ces exemples confirment la pérennité et l'efficacité de cette technique architecturale à travers les siècles . [7]



**Figure 1. 2**Constructions en terre dans le monde : (a) Ville de Shibam, Yémen ; (b) Grande Muraille de Chine, Chine

### 1.3 Techniques d'utilisation dans la construction terre

La technique de construction en terre crue est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus répandues dans le monde, car la terre fut le tout premier matériau de construction utilisé par l'homme. Selon H. Houben et H. Guillaud [5], il existe douze techniques distinctes pour la mise en œuvre de la construction en terre crue, chacune utilisant un type de terre spécifique avec une formulation adaptée. En réalité, cinq méthodes de construction sont les plus couramment utilisées : l'adobe, le cob, le torchis (wattle and daub), la terre damée et les briques de terre comprimée. [4]

### 1.3.1 Terre damée

La terre damée est une méthode de mise en œuvre de la terre qui a été et continue d'être utilisée à travers le monde (notamment au Maroc, en France, au Danemark, etc.). Elle commence par la mise en place d'un coffrage, qui est ensuite rempli de terre argileuse humide. Cette terre est ensuite compactée couche par couche à l'aide d'un pilon manuel ou mécanique. [4]



**Figure 1. 3a)** Méthode de fabrication d'un mur en pisé pour une maison Hmong au Vietnam ; b) L'entrée de l'édifice du Projet Eden en Cornouailles, en Angleterre, au Royaume-Uni [4]

### 1.3.2 Le torchis

Dans la technique du torchis (*Wattle and Daub*), la terre est comprimée contre un treillis tissé de baguettes de bois entrelacées ; il s'agit d'une méthode de construction traditionnelle utilisée depuis environ 6000 ans. [7]



**Figure 1. 4**Le torchis[8]



### 1.3.3 Blocs de terre comprimée (BTC)

Les blocs de terre comprimée représentent une évolution moderne des briques d'adobe. La terre sèche est comprimée à l'aide d'une presse, ce qui améliore les propriétés mécaniques des blocs et leur résistance à l'eau. Les dimensions varient selon le type de presse et les moules utilisés. [4]



**Figure 1. 5**(a) Une école primaire en blocs de terre comprimée dans le village de TanouanIbi [9] (b)Maison de brique de terre compressée.[10]

### 1.3.4 Cob U74E0

Le cob est une technique ancienne où la terre humide est manipulée à la main ou au pied pour former des murs homogènes. Des fibres végétales sont généralement ajoutées pour renforcer la structure. [4]



**Figure 1. 6**Maison en torchis[11]

### 1.3.5 Adobe

L'adobe désigne l'un des premiers matériaux de construction préfabriqués utilisés par l'homme à travers l'histoire. Il s'agit de briques moulées composées d'un mélange d'argile (jusqu'à 30 % de fraction fine), de sable, d'eau (15 à 30 %) et de fibres naturelles (comme la paille hachée). L'argile joue le rôle de liant, tandis que le sable limite la fissuration. Le mélange est versé dans des moules en bois, puis démoulé et laissé à sécher à l'air libre. Cette méthode a été largement répandue, de la Chine et l'Europe de l'Est jusqu'en Afrique, en Amérique latine et aux États-Unis. [4]



**Figure 1. 7** Fabrication de briques d'adobe à petite échelle industrielle à Palencia, Espagne. b) Stockage massif de briques d'adobe, Villa Janna, Marrakech, Maroc. c) Maison contemporaine en adobe non enduite, Lienzo de Barro, Équateur. d) École maternelle contemporaine fabrication de briques d'adobe à petite échelle industrielle à Palencia, Espagne. [1]

## 1.4 Avantages et Inconvénients de la construction en terre

### 1.4.1 Avantages de la construction en terre

Les avantages des constructions en matériau terre sont nombreux tels que

## Isolation phonique

Les systèmes de construction à base de terre, tels que les murs en terre comprimée, présentent d'excellentes performances en isolation acoustique grâce à leurs propriétés physiques, notamment une densité sèche élevée dépassant généralement  $2000 \text{ kg/m}^3$  et une épaisseur supérieure à 25 cm. Les résultats des études montrent qu'un mur en terre de 30 cm d'épaisseur et de  $2100 \text{ kg/m}^3$  de densité possède un indice d'affaiblissement acoustique (Indice R) de 58,3 dB, bien supérieur au minimum recommandé par les normes britanniques (40 dB). Cela fait de la terre un matériau efficace pour l'isolation phonique des bâtiments, en particulier dans les environnements résidentiels nécessitant un bon confort acoustique. [13]

- **Performance thermo-énergétique**

La terre crue présente d'excellentes performances hygrothermiques, assurant une régulation naturelle de la température et de l'humidité. Elle permet ainsi la réalisation de bâtiments à faible consommation énergétique, favorisant le confort thermique intérieur. [13]

- **Adaptabilité socio-culturelle** : Les techniques de construction en terre s'adaptent aux contextes géographiques, culturels et climatiques locaux, favorisant ainsi une architecture vernaculaire diversifiée et intégrée aux ressources régionales disponibles. [13]
- **Accessibilité économique** : Grâce à la disponibilité locale des matériaux et à la simplicité des techniques de mise en œuvre, la construction en terre constitue une solution à faible coût, particulièrement adaptée aux zones à revenus modestes. [13]
- **Santé et qualité environnementale intérieure** : Les parois en terre crue permettent une régulation naturelle de l'humidité relative, limitant ainsi la prolifération des moisissures et favorisant une bonne qualité de l'air intérieur. L'absence de composés organiques volatils (COV) renforce également le confort sanitaire des occupants. [13]
- **Réduction des déchets de chantier** : Le processus de mise en œuvre de la terre crue génère peu de déchets, et les matériaux peuvent souvent être recyclés ou réintégrés dans le sol, réduisant ainsi l'impact environnemental global. [13]
- **Dynamisation de l'économie locale** : La nature artisanale et manuelle des techniques de construction en terre encourage l'emploi local et le développement de savoir-faire spécifiques, renforçant les capacités professionnelles au sein des communautés. [13]
- **Faible empreinte carbone** : Comparée aux matériaux conventionnels (béton, acier, brique cuite), la production et l'utilisation de la terre crue nécessitent peu d'énergie

grise. Cela permet une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> dans le secteur du bâtiment. [13]

- **Participation communautaire** : La simplicité des techniques de construction favorise l'implication directe des communautés locales, renforçant ainsi l'appropriation sociale des projets et leur pérennité. [13]
- **Esthétique et expression architecturale** : La terre offre une grande diversité de textures, teintes naturelles et finitions, permettant une expression architecturale créative et une intégration harmonieuse dans le paysage.

#### 1.4.2 Inconvénients de la construction en terre [13]

- **Vulnérabilité à l'humidité** : En l'absence de protection adéquate, les constructions en terre peuvent être sensibles à l'eau, en particulier dans les climats humides ou lors de pluies intenses, ce qui peut entraîner une dégradation progressive des parois.
- **Exigence en entretien** : Pour préserver leurs performances mécaniques et esthétiques, les ouvrages en terre nécessitent un entretien périodique (recharges, enduits, réparations de fissures), ce qui peut être contraignant dans certains contextes.
- **Temps de mise en œuvre prolongé** : Certaines techniques traditionnelles (pisé, adobe) impliquent des temps de séchage et de réalisation longs, ce qui peut ralentir les délais d'exécution des chantiers par rapport aux systèmes industrialisés.
- **Absence de normalisation généralisée** : Le manque de normes techniques unifiées pour la construction en terre peut représenter un frein à sa reconnaissance institutionnelle. Toutefois, les avancées récentes en recherche permettent de combler progressivement ce vide réglementaire

### 1.5 La terre comme matériau de construction

La terre, matériau de construction ancien et largement utilisé, se distingue par sa durabilité, sa régulation hygrothermique et son faible impact environnemental. Sa disponibilité locale et sa réutilisabilité en font un choix écologique, particulièrement adapté aux zones rurales. Aujourd'hui, elle revient au centre des innovations dans le bâtiment grâce à l'intérêt croissant pour les matériaux durables.



### 1.5.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux

Le sol est généralement constitué d'un ensemble varié de minéraux naturels qui forment sa structure fondamentale. Parmi les plus courants figurent : le quartz, les minéraux argileux, les feldspaths, les micas, ainsi que les carbonates, en particulier la calcite et la dolomite. S'y ajoutent également divers oxydes et hydroxydes métalliques, notamment l'hématite, la goethite et la limonite, qui représentent des sources majeures de fer, sans oublier le gypse, présent en tant que composant secondaire. Ces minéraux se manifestent dans le sol sous différentes formes morphologiques, qui varient selon leur nature cristalline, à savoir :

- **Des grains polygonaux**, plus ou moins réguliers, dont la taille varie de quelques micromètres à plusieurs millimètres ;
- **Des lamelles fines**, caractéristiques des minéraux argileux, dont les dimensions ne dépassent généralement pas quelques micromètres ;
- **Des agrégats rocheux**, issus de la désagrégation de la roche mère, dont la morphologie est directement influencée par celle des minéraux qui les composent [14]

#### 1.5.1.1 Argile

D'un point de vue étymologique, le terme « argile » provient du grec **argos**, signifiant « matière blanche ». Sur le plan minéralogique, les argiles désignent une catégorie de minéraux silicatés d'aluminium, partiellement ou totalement hydratés, à structure microcristalline. Ces minéraux se caractérisent par une taille particulière inférieure à 2 micromètres, et possèdent la capacité de former une pâte plastique au contact de l'eau. [15]

En tant que ressource minérale primaire, l'argile se compose d'un assemblage de minéraux argileux associés à des impuretés cristallines, sous forme de fragments lithiques de compositions extrêmement variées, comprenant notamment la silice (quartz, cristobalite), les carbonates (calcite, dolomite), les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des matières organiques. [16]

Les argiles présentent une structure en feuillets (phyllosilicates) ou une morphologie fibreuse (comme la sépiolite et la palygorskite). Grâce à leurs diverses propriétés physico-chimiques telles qu'une surface spécifique élevée, une bonne plasticité, une capacité notable d'adsorption de l'eau et de gonflement, ainsi qu'une perméabilité réduite, elles trouvent des applications dans de nombreux secteurs, notamment dans l'élaboration de matériaux de

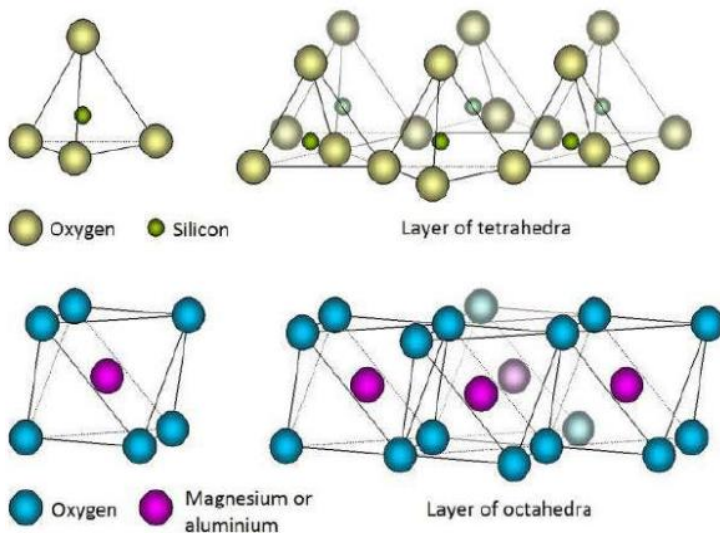
construction, les produits cosmétiques, le traitement des eaux polluées et le confinement des déchets, y compris les déchets radioactifs [17]



**Figure 1. 8** Echantillons d'argile [18]

### 1.5.1.2 Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux se distinguent principalement par une organisation cristalline en feuillets, caractéristique des phyllosilicates. Ces feuillets sont constitués de deux types fondamentaux de couches : la couche tétraédrique et la couche octaédrique, dont les sommets sont occupés par des ions  $O^{2-}$  et  $OH^-$ . Ces anions, en raison de leur charge négative, exercent des forces de répulsion électrostatique, ce qui conduit à la formation d'un réseau structuré capable d'accueillir des cations interstitiels. Ces derniers contribuent à l'équilibre électrostatique global de l'édifice cristallin. La structure des minéraux argileux peut être représentée comme une entité composée d'un feuillet associé à un espace interfoliaire. [19] En général, le feuillet est constitué de deux types de couches principales :

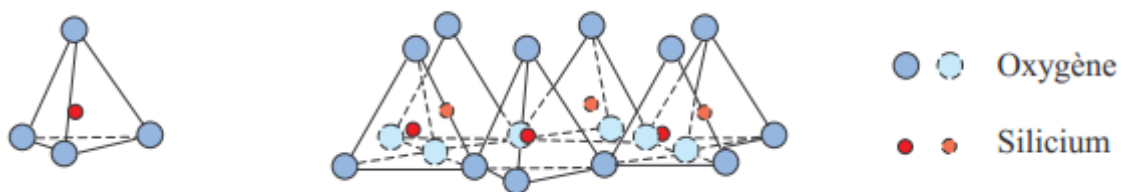


**Figure 1. 9** forme géométrique des tétraèdres et octaèdres [15]

- Le tétraèdre de silice ( $SiO_4$ )

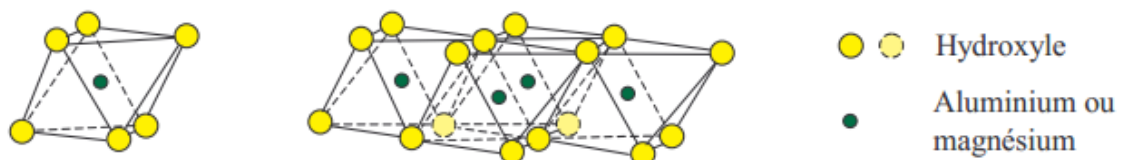
Dans la structure tétraédrique, l'ion silicium ( $\text{Si}^{4+}$ ) est situé au centre, entouré de quatre ions oxygène ( $\text{O}^{2-}$ ), formant ainsi une unité structurale tétraédrique (figure I.4). Ces unités sont reliées entre elles par leurs bases, en partageant un ion oxygène entre deux tétraèdres, ce qui conduit à la formation d'une couche continue appelée couche tétraédrique. On observe dans cette configuration un espace de forme hexagonale au centre des feuillets. La formule générale de cette structure exprime la liaison des unités tétraédriques comme suit :  $n [(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}]$ . [20]

- L'octaèdre d'alumine  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  et éventuellement de magnésium  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$



**Figure 1. 10**Couches tétraédrique [21]

Dans la structure octaédrique, l'ion central peut être un ion aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) ou un ion magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Ces ions sont entourés de six ions hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) (figure 1.2). Les unités octaédriques s'associent entre elles de manière à ce que chaque groupement hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) soit partagé par trois unités octaédriques. La formule générale de ce type de groupement est :  $n[\text{Al}_2(\text{OH})_6]$  ou  $n[\text{Mg}_3(\text{OH})_6]$ . [20]



**Figure 1. 11**Couches Octaédriques [21]

### 1.5.1.3 Classification des argiles

Il existe plusieurs systèmes de classification des argiles, et l'on distingue quatre grandes catégories principales (Tableaux 1.1) .des principaux types de minéraux argileux

**Tableau 1. 1**Classification des principaux types de minéraux argileux [22]

Type	Groupe	Sous-groupe	Formules
1:1	Kaolinite	kaolinites	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
			$Al_2Si_2O_5(OH)_4H_2O$
2:1	Smectites	smectitesdioctaédriques	$(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$
		smectitestrioctaédriques	$Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
2 :1	Micas	micasdioctaédrique	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
		micastrioctaédrique	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
2:1:1	Chlorite	chloritedioctaédrique	$Al_4(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$
		chloritetrioctaédrique	$(Mg, Fe \dots)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$

- **Minéraux de type 1:1 (ou T-O)**

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1 Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite. [22]

- **Minéraux de type 2:1 (ou T-O-T)**

Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet. A ce type correspond les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et des mica [22]

- **Minéraux du type 2 :1 :1 (ou T-O-T-O)**

Le feuillet est constitué par l'alternance de feuillets T-O-T et de couche octaédriques inter foliaire. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å. [22]

- **Minéraux interstratifiés**

Il existe bien entendu des minéraux interstratifiés, formés d'un empilement régulier ou irrégulier de feuillets de deux types différents. Lorsque l'un des feuillets est de type smectites, le comportement peut s'avérer gonflant. C'est le cas de la kaolinite-montmorillonite, la saponite-chlorite, la montmorillonite-mica, l'illite montmorillonite [22]

## 1.6 Stabilisation de terre

Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des sols. Cette stabilisation doit permettre :

- La réduction de la porosité ;
- La diminution des phénomènes de retrait et de gonflement ;
- L'amélioration de la cohésion interne ;
- L'optimisation de la résistance à l'érosion et la création d'une barrière imperméable à la surface ;
- L'augmentation des résistances à la compression, tant à sec qu'en milieu humide, ainsi qu'à la traction et au cisaillement. [23]

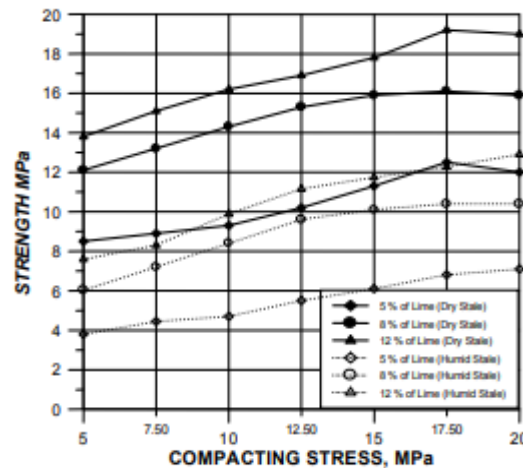
On distingue trois procédés majeurs de stabilisation : mécanique, physique et chimique.

### 1.6.1 La stabilisation mécanique

Le compactage constitue l'une des techniques fondamentales pour l'amélioration des propriétés physiques des sols. Il vise à réduire la porosité en expulsant l'air emprisonné dans la structure granulaire, ce qui permet d'augmenter la densité sèche et d'améliorer le comportement mécanique des blocs de sol stabilisés à la chaux. Les conditions de compactage optimales sont généralement déterminées à l'aide de l'essai Proctor, qui permet d'identifier la teneur en eau optimale nécessaire pour atteindre la densité sèche maximale.

Dans cette étude, l'effet de la contrainte de compactage a été évalué dans une plage de pression comprise entre 5 et 20 MPa. Les résultats ont montré que la résistance mécanique augmente progressivement avec la pression, atteignant une valeur maximale à 17,5 MPa, seuil optimal au-delà duquel une baisse des performances mécaniques est observée à 20 MPa. Les données expérimentales ont également révélé une amélioration significative de l'absorption d'eau totale et capillaire, ainsi qu'une réduction de la perte de masse sous l'effet des cycles gel-dégel et humidification-séchage, en particulier avec l'ajout de 30 % de sable et de 8 à 12 % de chaux (Figure 1.12).

Ces résultats soulignent l'importance d'un contrôle rigoureux de la contrainte de compactage en tant que paramètre clé pour garantir des performances mécaniques et hydrauliques optimales des matériaux terreux stabilisés. [24]



**Figure 1. 12**Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques. [24]

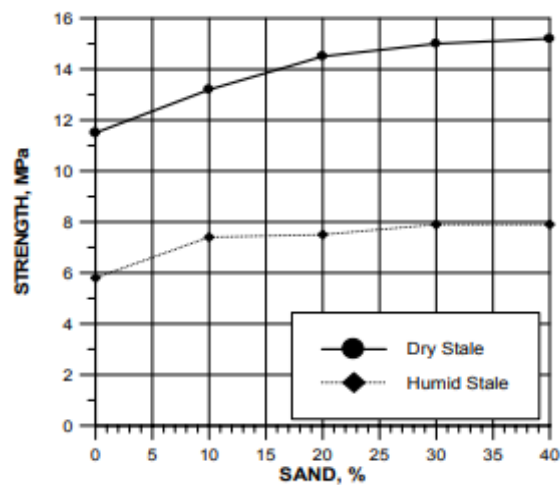
### 1.6.2 La stabilisation physique

La stabilisation physique des sols désigne un ensemble de techniques visant à améliorer la structure et les propriétés géotechniques du sol sans recours à des additifs chimiques. Cette stabilisation peut être réalisée selon deux approches principales : la première consiste à modifier la texture granulométrique du sol par des corrections, telles que l'ajout de sable pour réduire la plasticité ou de matériaux fins pour augmenter la cohésion.

La seconde repose sur l'incorporation de fibres végétales ou synthétiques, comme la paille d'orge, dans les sols argileux afin de renforcer leur structure interne et de limiter les fissurations dues au retrait pendant le séchage.

Les études montrent qu'un taux optimal d'incorporation des fibres (jusqu'à 1,5 %) améliore la résistance à la compression, à la flexion et au cisaillement, tout en conférant au sol une meilleure aptitude à supporter les déformations mécaniques. De plus, les fibres longues réduisent plus efficacement le retrait en formant un réseau interne qui freine l'apparition des fissures. Pour accroître la durabilité de ces sols renforcés, des traitements de surface ont été testés, notamment des enduits à base de ciment et de polymères, parmi lesquels les enduits cimentaires enrichis en polymères se sont révélés les plus efficaces contre la pénétration de l'eau. Ces résultats soulignent que la stabilisation physique, notamment par l'incorporation de fibres végétales, constitue une solution écologique et économique performante pour améliorer

le comportement des sols argileux dans les projets de construction et de développement durable (Figure 1.13). [25]



**Figure 1. 13**Influence de la teneur en sable sur la résistance à la compression [24]

### 1.6.3 Stabilisants chimiques

La stabilisation chimique désigne l'introduction de substances chimiques ou de composés spécifiques dans le sol dans le but de modifier ses propriétés physiques et chimiques. Ce procédé repose essentiellement sur des réactions entre les particules du sol et les agents stabilisants, pouvant conduire à la formation de nouveaux composés. À titre d'exemple, la réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux génère des composés cimentaires secondaires qui contribuent à améliorer la cohésion et la résistance mécanique du sol. Par ailleurs, certains stabilisants agissent en formant une matrice continue qui enrobe ou lie les particules entre elles, renforçant ainsi la structure du sol. Les matériaux les plus couramment utilisés dans ce type de stabilisation comprennent le ciment, la chaux, les liants bitumineux, ainsi que certains types de résines synthétiques.

#### 1.6.3.1 Ciment

La technique de stabilisation des sols au ciment est utilisée depuis le début du XXe siècle dans le domaine du génie civil, en particulier pour la construction des routes et des pistes d'atterrissage. Cette méthode consiste à mélanger du ciment hydraté avec le sol, ce qui conduit à la formation d'une matrice cimentaire composée d'une pâte de ciment hydraté réagissant également avec la fraction sableuse du sol. De plus, le ciment peut interagir avec les minéraux argileux selon trois phases successives : l'initiation de l'hydratation, le

développement des produits d'hydratation et la transformation des gels cimentaires accompagnée de la désagrégation des agglomérats d'argile. La quantité de ciment nécessaire dépend de la texture et de la structure du sol, et varie généralement entre 5 % et 12 %. La stabilisation au ciment modifie les propriétés de plasticité du sol, ce qui améliore sa résistance mécanique et sa durabilité. Toutefois, cette technique reste coûteuse, présente un impact environnemental notable, et les sols ainsi stabilisés sont généralement non réutilisables.[4]

### 1.6.3.2 La chaux

La chaux vive (CaO) est produite par la calcination du calcaire (CaCO<sub>3</sub>) à des températures dépassant 900 °C, au cours de laquelle il se décompose chimiquement en oxyde de calcium (chaux vive) et en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), selon l'équation :



Lorsque la chaux vive réagit avec l'eau, on obtient de la chaux éteinte, également appelée chaux aérienne, soit l'hydroxyde de calcium [Ca(OH)<sub>2</sub>]. Cette réaction est exothermique, libérant environ 15,5 kJ/mol, conformément à l'équation :



Quant à la chaux hydraulique, elle est préparée à partir de calcaires contenant plus de 6 % d'argile, soumis à des températures comprises entre 800 °C et 1500 °C. Ce traitement thermique entraîne une réaction entre le CaO formé et les constituants argileux, aboutissant à la formation de composés tels que les silicates, aluminates et ferroaluminates de calcium, responsables de sa propriété hydraulique, c'est-à-dire sa capacité à faire prise en présence d'eau [23]

La production de la chaux nécessite la présence de gisements de calcaire, mais elle se distingue par une consommation énergétique inférieure à celle du ciment lors de sa fabrication. Le dosage optimal de la chaux varie selon la nature du sol et se situe généralement entre 8 % et 12 %, ce qui est comparable aux proportions utilisées dans la stabilisation au ciment. Les sols argileux, contenant entre 20 % et 40 % d'argile, voire jusqu'à 70 %, sont particulièrement adaptés à la stabilisation à la chaux. En revanche, la présence de sulfates ou de matières organiques peut avoir des effets négatifs, bien que la chaux possède une certaine capacité à en neutraliser une partie .[26]



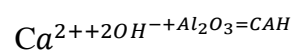
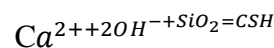
- Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique constitue l'un des mécanismes fondamentaux dans l'amélioration des propriétés des sols à l'aide de la chaux. Lorsque la chaux se dissout dans l'eau, elle libère des ions **calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )** et **hydroxyde ( $\text{OH}^-$ )**, ce qui entraîne une **augmentation du pH** du milieu. Ce milieu alcalin favorise la **décomposition des minéraux argileux**, notamment dans les sols riches en silicates, libérant ainsi de la **silice ( $\text{SiO}_2$ )** et de l'**alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**.

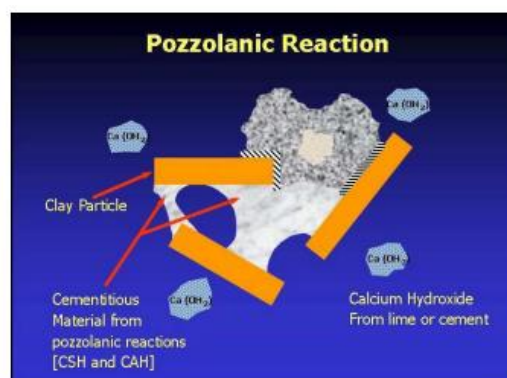
Ces oxydes réagissent avec le calcium disponible pour former des composés cimentaires amorphes tels que :

- les **hydrates de silicate de calcium (CSH)**,
  - les **hydrates d'aluminate de calcium (CAH)**,
  - et les **hydrates d'alumino-silicate de calcium (CASH)**,
- qui sont responsables de l'**amélioration de la cohésion et de la résistance mécanique** des sols traités au fil du temps. [27]

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes : [4]



Les agents cimentaires précipitent et durcissent avec le temps (cristallisation)



**Figure 1. 14** Réaction pouzzolanique [4]

## Carbonatation

- La carbonatation se produit lorsque la chaux réagit avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) pour former du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et du carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ), selon le type de chaux utilisé.
- Ce processus entraîne une diminution de la résistance mécanique finale, en raison de la consommation partielle de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique.
- Selon les études citées (Diamond & Kinter, 1965 ; Khattab, 2002 ; Cabane, 2004), ce phénomène peut avoir un effet négatif sur la stabilité des sols.[27]

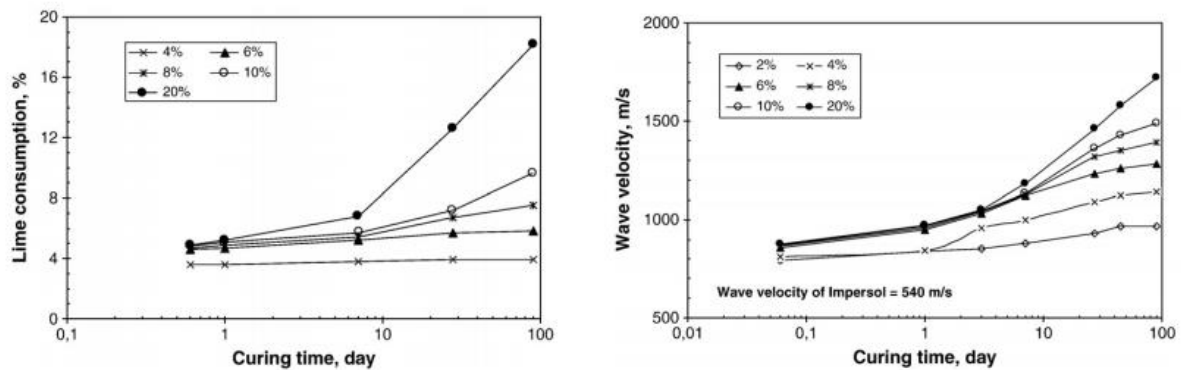
### 1.7 L'influence de l'ajout de chaux sur les propriétés mécaniques du matériau stabilisé

Les résultats des études géotechniques indiquent que l'ajout de chaux ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) constitue l'un des moyens chimiques les plus efficaces pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux, notamment en ce qui concerne la résistance à la compression ( $\sigma^c$ ). Cette amélioration est principalement attribuée à la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium et les composants actifs de l'argile, en particulier le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), conduisant à la formation de composés cimentaires liants tels que le C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) et le C-A-H (Calcium Aluminate Hydrate). Ces produits assurent la liaison entre les particules du sol et génèrent un gel hydraté (Hydrated Gel) qui renforce la cohésion et la rigidité du matériau au fil du temps.

L'efficacité de ces réactions dépend de plusieurs facteurs clés :

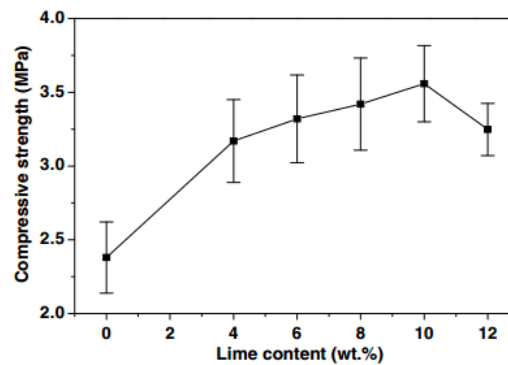
- **La composition minéralogique de l'argile** : les minéraux à forte réactivité chimique, tels que la montmorillonite, jouent un rôle déterminant dans l'activation de l'effet de la chaux.
- **La quantité optimale de chaux** : une dose adéquate permet de stimuler efficacement la réaction pouzzolanique sans engendrer d'effets indésirables, tels qu'un durcissement excessif ou une perte de flexibilité.
- **Le temps de cure (Temps de maturation)** : le développement des réactions chimiques dans le temps entraîne une augmentation progressive de la résistance mécanique.
- **La température ambiante (T)** : des températures plus élevées favorisent la cinétique des réactions chimiques et accélèrent la formation des composés cimentaires,

améliorant ainsi les performances mécaniques en un temps réduit. La température joue un rôle crucial dans l'accélération des réactions chimiques entre la chaux et les sols argileux, en particulier la réaction pouzzolanique. Avec l'élévation de la température, le taux de dissolution des composants actifs de l'argile, tels que le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), augmente, ce qui accélère la formation de composés cimentaires tels que les hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et les hydrates d'aluminate de calcium (C-A-H), responsables du renforcement de la cohésion et de l'amélioration de la résistance du sol (Figure 115). [27]



**Figure 1. 15** Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et du temps de cure [27]

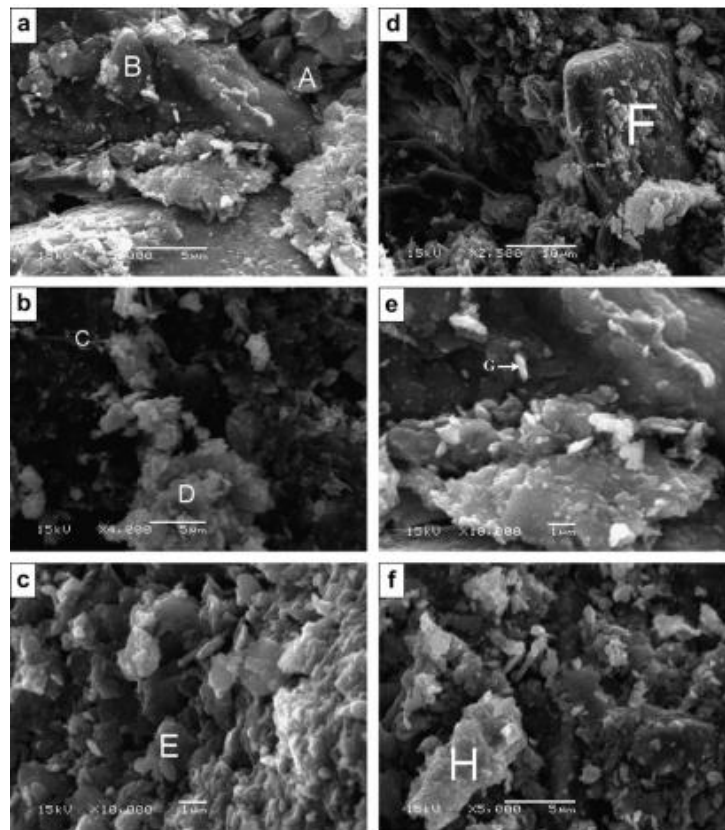
Les essais indiquent que la réaction initiale commence dès l'ajout de 5 % de chaux, favorisant l'amélioration des propriétés physiques par échange cationique. En revanche, la véritable réaction pouzzolanique débute à partir de plus de 6 % de chaux. Une élévation de la température de 20 °C à 50 °C pendant 90 jours entraîne une accélération significative des réactions et une amélioration notable des performances mécaniques du sol (Figure 1.16). [27]



**Figure 1. 16**Évolution de la résistance à la compression des briques d’adobe en fonction de la teneur en chaux. [27]

Les résultats des études montrent que l'ajout de chaux à la brique crue améliore la résistance à la compression jusqu'à un certain seuil. Il a été constaté que cette résistance augmente avec l'augmentation du taux de chaux. Toutefois, une teneur en chaux supérieure à 10 % en poids du mélange n'apporte pas d'amélioration significative. La microstructure observée soutient ces résultats.

L'augmentation du pourcentage de chaux jusqu'à 6 % entraîne la disparition de la silice libre et favorise la formation de liaisons interparticulaires, ce qui conduit à une microstructure homogène et à la formation de composés C-S-H responsables du renforcement de la cohésion. En revanche, au-delà de 12 % de chaux, des composés tels que la portlandite et la calcite se forment. Ces derniers apparaissent comme des zones brillantes dans la région H, indiquant une carbonatation excessive et une structure hétérogène susceptible d'altérer négativement les propriétés mécaniques.[27]



**Figure 1.17** SEM micrographs of adobe bricks: (a) 0% lime, (b) 4% lime, (c) 6% lime, (d and (e) 10% lime and (f) 12% lime [28]

### 1.8 Définition du mortier de terre

Le mortier de terre est un liant traditionnel utilisé dans la construction en pierre pendant de longues périodes historiques en Grande-Bretagne et en Irlande, depuis la préhistoire jusqu'à la période post-médiévale. Il a été employé dans divers types de bâtiments : religieux, résidentiels, agricoles, défensifs, industriels et publics. Malgré sa large diffusion et son utilisation dans des constructions de statuts sociaux variés, les termes péjoratifs utilisés pour le décrire dans la littérature historique ont contribué à minimiser sa valeur et à le négliger en tant que matériau de construction durable, ce qui a freiné sa reconnaissance comme une technique importante dans l'histoire de la construction. [29]

Le mortier de terre est un matériau de construction naturel composé principalement d'un mélange de terre et d'eau, parfois stabilisé avec des liants tels que la chaux, le ciment, le plâtre ou des fibres végétales. Ce type de mortier est utilisé pour lier les briques ou blocs de terre dans les constructions, et sert également de revêtement protecteur contre l'humidité et l'érosion causées par les conditions climatiques. [30]

Le mortier de terre est largement utilisé dans la construction, notamment dans l'architecture traditionnelle et durable. Ce type de mortier offre plusieurs avantages environnementaux et techniques, tels que l'amélioration de l'équilibre thermique à l'intérieur des bâtiments et la réduction de l'impact environnemental par rapport aux mortiers à base de ciment. Figure (1.18).[30]



**Figure 1. 18** Reconstitution archéologique d'un mur. Briques de terre crue et mortier de terre fibré.[31]

### 1.8.1 Principales caractéristiques du mortier de terre

#### 1. Composition

Il est principalement constitué d'argile, de sable et d'eau, avec la possibilité d'ajouter des matériaux naturels tels que la chaux ou des fibres végétales pour améliorer ses performances.

#### 2. Propriétés physiques :

- Il présente une bonne porosité, ce qui aide à réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments.
- Il affiche un retrait relativement faible par rapport à certains matériaux conventionnels.

#### 3. Propriétés mécaniques :

- Bonne résistance à la compression et au séchage, surtout lorsqu'il est amélioré par des additifs comme la chaux.
- Meilleure flexibilité que les mortiers cimentaires, ce qui le rend adapté à la restauration de bâtiments anciens.

#### 4. Comportement hydraulique :

- Bonne capacité d'absorption de l'eau, ce qui contribue à limiter l'humidité excessive dans les murs.

- Taux d'absorption réduit lorsqu'il est stabilisé avec des matériaux tels que la cendre ou la chaux.

##### 5. Durabilité et solidité :

- Sa durabilité peut être renforcée par l'ajout de matériaux minéraux comme la cendre de palmier utilisée dans l'étude.
- Il offre de bonnes performances contre l'érosion lorsqu'il est stabilisé avec des liants naturels.[30]

## 1.9 Fabrication des briques cuites

La brique cuite est l'un des matériaux de construction les plus anciens utilisés depuis des millénaires. Elle reste aujourd'hui largement employée grâce à ses propriétés mécaniques et isolantes. Son procédé de fabrication a connu une évolution notable, permettant de répondre aux exigences de performance structurelle, d'isolation thermique et acoustique, ainsi que de résistance à la dégradation et au feu.

### Matières premières

- **Argile** : Constitue la base du mélange. Son choix dépend de sa composition minéralogique (kaolinite, illite, smectite, chlorite), qui influence sa plasticité et son comportement lors de la cuisson.
- **Matériaux dégraissants (non plastiques)** : Tels que le sable, la chamotte et les cendres volantes, utilisés pour réduire la plasticité excessive et améliorer le façonnage et le séchage.
- **Agents poreux** : Comme le carbonate de calcium, ajoutés pour augmenter la porosité et améliorer l'isolation thermique, tout en maîtrisant leur dosage afin de ne pas altérer la résistance mécanique.

### Étapes de fabrication

1. **Préparation des matières** : Comprend l'extraction, le criblage, le concassage et le dosage des composants.
2. **Mélange** : Réalisé à sec ou en voie humide pour obtenir une pâte homogène.
3. **Façonnage** : Par extrusion ou pressage, selon le type de brique recherché.
4. **Séchage** : Permet l'évacuation progressive de l'eau sans provoquer de fissures.

5. **Cuisson** : Effectuée entre 800 et 1150 °C ; elle détermine les propriétés finales du produit, telles que la solidité et la durabilité face aux agressions extérieures.



**Figure 1. 19** Procédé de fabrication de briques cuites [32]

### 1.10 Les déchets de briques rouges

Les déchets de briques rouges sont des déchets solides issus des activités de construction et de démolition, ou des résidus de fabrication dans les usines de briques. Bien qu'ils soient classés parmi les déchets non dangereux, leur accumulation massive constitue un fardeau environnemental. Les déchets de briques rouges apparaissent ainsi comme une option prometteuse en raison de leur abondance sur les chantiers de construction, de démolition et dans les unités de production. Cela en fait un matériau intéressant pour le recyclage et pour une utilisation partielle ou totale dans certaines applications du bâtiment. L'étude de ces déchets s'inscrit dans une démarche visant à développer des matériaux de construction plus durables. [33]



**Figure 1. 20** Déchet de briques cuites [34]



### **1.10.1 Définition de déchet de briques cuites**

Les déchets de briques constituent des sous-produits issus de l'industrie de la fabrication des produits en terre cuite. Ces déchets sont présents en grande quantité à l'échelle nationale, en raison du nombre élevé de briqueteries et du taux significatif de rejets (briques non conformes ou endommagées) générés par ces dernières, représentant environ 10 à 15 % de la production totale. [35]

### **1.10.2 La méthode que nous avons adoptée pour le recyclage des déchets de briques**

#### **Collecte des déchets de briques cuites**

Les déchets de briques inutilisables ou cassées ont été collectés depuis les unités de production (l'usine), en raison des quantités importantes générées lors des différentes étapes de fabrication.

#### **Concassage et broyage primaire**

La taille des déchets a été réduite à l'aide d'un concasseur de type pierre afin d'obtenir de petits fragments.

#### **Broyage dans la machine Los Angeles**

5 kg de fragments de briques ont été introduits avec 12 billes en acier dans la machine Los Angeles.

La machine a effectué 1500 tours pour obtenir un matériau plus fin, adapté aux analyses.

#### **Broyage final dans la machine micro-Duval**

2 kg de résidus de briques ont été broyés avec 500 g de billes métalliques.

La machine a tourné pendant 2000 tours pour produire une poudre et des granulats très fins.

#### **Tamissage de la poudre**

La poudre a été tamisée pour obtenir une distribution granulométrique homogène, à l'aide d'une série de tamis (de 0,08 mm à 5 mm).

Le tamissage a été réalisé manuellement afin d'assurer le passage complet de la matière à travers les ouvertures les plus fines.



**Figure 1. 21** Brique broyé

### 1.11. Sable de dune

Le sable de dune est un matériau naturel composé principalement de fines particules de quartz ( $\text{SiO}_2$ ), formées par l'érosion et la sédimentation éolienne dans les régions désertiques, comme la région de Biskra en Algérie. Lorsqu'il est finement broyé, il est désigné sous le nom de **poudre de sable de dune (Dune Sand Powder - DSP)**, et présente des propriétés pouzzolaniques partielles qui permettent son utilisation comme addition minérale dans la fabrication du ciment et du béton.

Le sable de dune se caractérise par :

- Une **composition minéralogique riche en dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ )**, atteignant environ **74 %**.
- Une **structure cristalline fine** de type **quartz à basse température (low-quartz)**.
- Une **activité pouzzolanique limitée mais efficace** après broyage, permettant une réaction avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) pour former un gel de **C-S-H**, responsable du développement des résistances mécaniques dans les matériaux cimentaires.
- Des **propriétés physiques favorables**, telles qu'une **densité spécifique de  $2,77 \text{ g/cm}^3$**  et une **surface spécifique de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$** , ce qui le rend adapté à l'amélioration de la consistance des pâtes et à la réduction de la perméabilité.[30]



**Figure 1. 2**Sable de dune. [36]**Tableau 1. 2**Des études ultérieures

Auteurs	Eprouvettes	Dimension	Liants	Ajouts	Résultats
Almeasar K.S et.al 2021 [30]	Blocs de terre comprimée	4×4×16) cm <sup>3</sup>	LA chaux	Cendre déchets de palmier dattier : 0, 2, 4, 6, 8 et 10%	L'incorporation de la poudre de déchets de briques cuites (DPA) a contribué à la réduction des vides intergranulaires et à l'amélioration de l'homogénéité structurale entre les particules, ce qui a conduit à une optimisation de la microstructure de la matrice. Ces améliorations se sont traduites par une diminution de 8 % de la porosité, une augmentation de la densité apparente sèche, ainsi qu'une élévation de l'absorption capillaire de l'eau et du taux de gonflement.
O,Izemmouen et.al 2015 [37]	Blocs de terre comprimée	(10×10×5) cm <sup>3</sup>	Chaux (Lime) 6, 8 et 10 %	Pouzzolane naturelle 10, 20, 30 et 40%	L'incorporation de 30 % de pouzzolane naturelle avec la chaux contribue à une réduction significative de l'absorption capillaire, de l'absorption totale, de la résistance à l'abrasion, ainsi que de la perte de masse lors de l'essai de mouillage-séchage.
Elahi et.al , 2020 [38]	Blocs de terre comprimée		Ciment 0 ,3 ,5 ,7, 10%	Cendre volants : 10, 20 et 30 %	L'augmentation des proportions de ciment et de cendre volante réduit l'absorption d'eau et limite la perte de masse cumulative lors des cycles d'humidification et de séchage.

Bezaou. F et.al (2024) [39]	Blocs de terre comprimée		La chaux	Sable de dune et débris de brique concassés + DPA (0-10%)	La réduction de la porosité (jusqu'à -8 %) s'accompagne d'une augmentation de la densité sèche, ainsi que d'une diminution significative de l'absorption capillaire et du potentiel de gonflement.
-----------------------------	--------------------------	--	----------	---	--

### 1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, le contexte général de la construction en terre en tant que matériau durable et écologique a été présenté. Les processus physico-chimiques résultant de l'ajout de matériaux stabilisants au sol, notamment la chaux, ont également été exposés. Ensuite, l'effet de la chaux ou du ciment, ainsi que leurs combinaisons avec différents ajouts minéraux, sur la durabilité des matériaux à base de terre, a été analysé à la lumière des études antérieures.

Ces études montrent que les minéraux argileux et les matériaux pouzzolaniques jouent un rôle important dans l'amélioration de la durabilité des matériaux terreux. Dans ce cadre, notre travail s'est focalisé sur l'étude de l'effet de la poudre de déchets de briques cuites, considérée comme un matériau pouzzolan naturel riche en composants actifs, combinée au sable de dune concassé, sur la stabilisation et l'amélioration des propriétés des mortiers de terre, dans le but de développer des solutions constructives locales, durables et performantes.

**CHAPITRE 02**  
**MATERIAUX ET**  
**METHODES**  
**EXPERIMENTALES**

## ***CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES***

### **2.1.Introduction**

Ce chapitre débute par une description détaillée des matériaux locaux utilisés, dans le but de valoriser leur emploi à travers l'analyse de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Il présente également les différentes formulations étudiées, les procédures de préparation des échantillons, ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre pour évaluer les performances mécaniques et la durabilité du mortier de terre.

### **2.2Matériaux utilisés**

Les additifs utilisés dans cette étude sont de la poudre de déchets de briques cuites et du sable moulu, qui ont été ajoutés au mortier de sol pour stabiliser ses propriétés et améliorer sa stabilité.

#### **2.2.1 Sol**

##### **2.2.1.1Origine de sol**

Un échantillon de sol a été sélectionné dans la région de Biskra, plus précisément à (SidiOkba). Pour notre étude afin de garantir sa disponibilité en grande quantité et son abondance dans la région.



**Figure 2. 1Le sol**

##### **2.2.1.2caractéristiques physiques du sol**

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrété 2mm. (Houben, 1994)

Nous avons donc effectué les tests suivants :

#### **A) Densité**

La masse volumique de l'éprouvette constitue un indicateur essentiel des performances physico-mécaniques du matériau .elle est déterminée à l'aide de l'essai au pycnomètre , conformément aux prescription de la norme

NF P94-054 .



**Figure 2. 2** Mesure La masse volumique apparente , absolue

Le tableau montre les masses volumiques apparentes et absolues de sol étudié

**Tableau 2. 1:** les masses volumiques du sol

	La masse Volumique apparente $\rho(g/cm^3)$	La masse volumique absolue $\rho_s((g/cm^3)$
<b>Sol</b>	1.32	2.54

### **b) Composition granulaire**

- analyse granulométrique par tamisage ( NF P 18- 560)

-La sédimentométrie (NF P 94-057)

L' analyse granulométrique par sédimentation

- L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer les proportions des grains de différentes tailles dans le sol. (figure 2.3) L'essai de granulométrie par tamisage en voie humide a été réalisé sur un échantillon d'argile imbibé d'eau pendant une journée avant la réalisation de l'essai. Cet essai a été effectué conformément à la norme NF P 94-056.

Une fraction du matériau passant au tamis (0,08 mm) a été analysée par un essai de sédimentation selon la norme NF P 94-057.

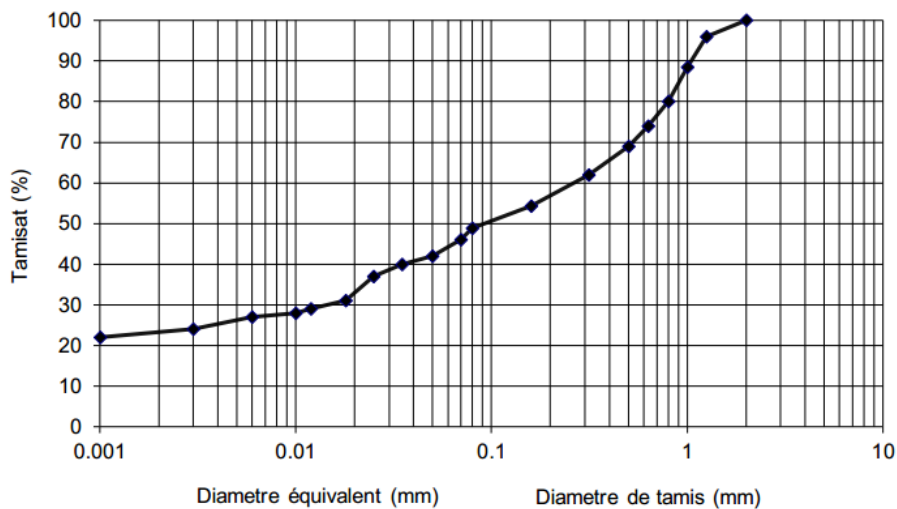


Figure 2. 3Granulométrie du sol

### C)Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400  $\mu\text{m}$ .

**Les deux limites utilisées sont :**

- **limite de liquidité (wl) :**(teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide – le sol est humide et déformable- et un état plastique) ,
- **limite de plasticité (wp) :** (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide - le sol durcit et fissure) .
- **indice de plasticité (Ip) :** Cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité :

$$IP = WL - WP$$



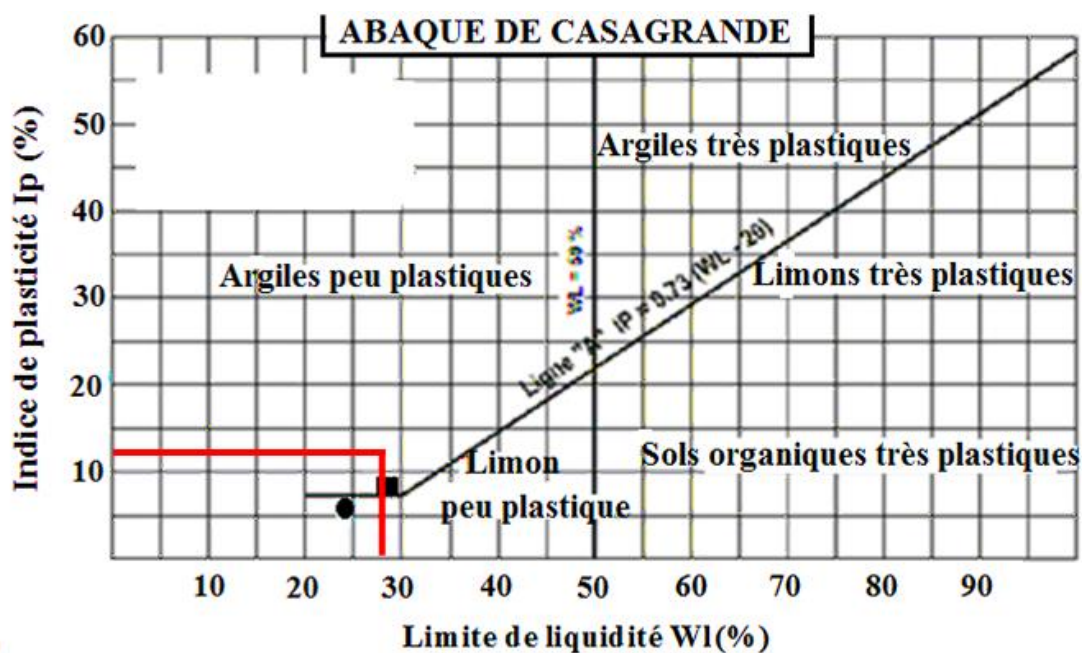


Figure 2. 4Détermination de WL et WP

Tableau 2. 2 : limites d'Atterberg du sol

limites d'Atterberg du sol		
Limite de liquidité (WL%)	limite de plasticité (WP%)	indice de plasticité (IP%)
29	18 ,85	11

La classification des sols fins repose sur les critères de plasticité, tels que définis par le limites d'Atterberg. Ces critères sont illustrés dans le diagramme de plasticité présenté à la figure 2.4. La position d'un point représentatif dans ce diagramme est déterminée par sa valeur en abscisse, correspondant à la limite de liquidité, et par sa valeur en ordonnée, représentant



l'indice de plasticité.

**Figure 2. 5**Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande

#### **D)Essai bleu de méthylène**

Dans le cadre de la caractérisation géotechnique des sols fins, l'essai au bleu de méthylène a été réalisé afin d'évaluer leur propreté et d'identifier les types d'argiles présents.

L'essai au bleu de méthylène constitue une méthode physico-chimique permettant d'évaluer la propreté des sols fins et de caractériser la nature minéralogique des argiles présentes (voir Figure 2.6). Ce colorant est fortement adsorbé par les argiles de type montmorillonite connues pour leur caractère expansif ainsi que par les matières organiques. En revanche, les argiles de type illite et kaolinite présentent une capacité d'adsorption nettement plus faible. L'essai a été mené conformément à la norme française NF P18-592, et les valeurs obtenues ont été relevées et analysées.



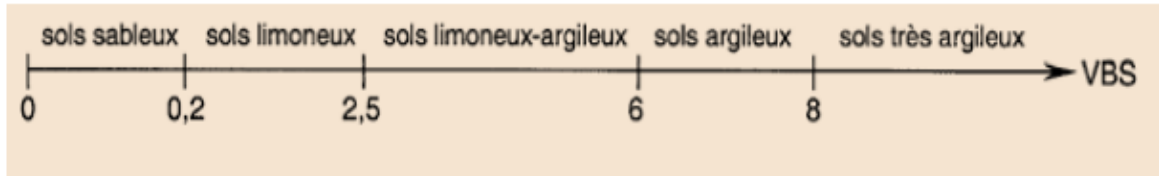
**Figure 2. 6**Bleu méthylène

$$V_{BS} = 100 \times \frac{B \times C}{M_s}$$

Où :

- B : Masse du bleu introduite (grammes)

- $M_s$  : Masse de l'échantillon à l'état sec
- $C$  : concentration de la solution du bleu (0,1g/l)



**Figure 2. 7** Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068)

**Tableau 2. 3 : Valeur de bleu méthylène**

	valeur de bleu $V_{BS}$	Classification de sol
<b>sol</b>	4,5	Sol limoneux-argileux

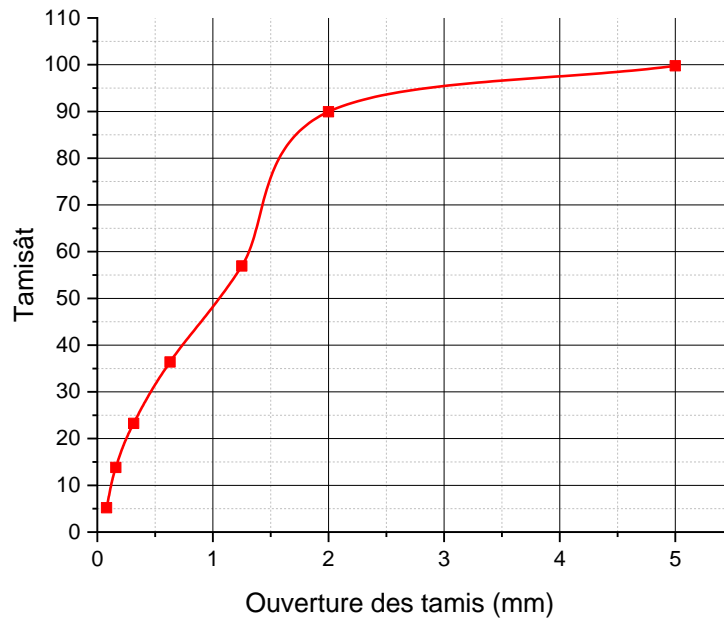
## 2.2.2Sable concassé

### 2 .2.2.1Caractéristique physique du sable

Un sable concassé de granulométrie 0/3, provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie), a été utilisé dans l'ensemble des mélanges. Son emploi principal a été destiné à l'ajustement de la courbe granulométrique du sol.

**Tableau 2. 4 : La masse volumique du Sable concassé**

	La masse volumique apparente $\rho(g/cm^3)$	La masse volumique absolue $\gamma_s((g/cm^3)$
<b>Sable</b>	1.43	2.58



**Figure 2. 8**Analyse granulométrique du sable concassé

### 2.2.3La chaux

Le type de chaux utilisé dans cette recherche est une chaux vive, produite dans la ville de Hassasna, située dans l'unité Erco de la wilaya de Saida, en Algérie. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.



**Figure 2. 9**la chaux vive

**Tableau 2. 5 : Analyse chimique de la chaux vive [23]**

Analyse chimique									
oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
massique%	82.	10.63	3.27	2.73	1.35	0.88	0.11	0.15	0.06

**Tableau 2. 6 : Caractéristiques physique de la chaux vive**

Caractéristiques physiques (g/cm <sup>3</sup> )				
	La masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	La masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		
Valeurs	1.81	0.627		

### Sable de dune et brique broyé

#### Déchet brique rouge

Les résidus issus de la brique cuite, utilisés dans la composition des mélanges à base de terre, proviennent de briques cuites produites par l'unité de fabrication de briques de la briqueterie El-Amouri, située à Biskra (Algérie).

Le broyage de ces briques a été effectué au sein du laboratoire des sciences des matériaux de construction (MDS) de l'Université de Biskra, à l'aide d'un broyeur de type "Los Angeles".

**Figure 2. 10**  
Briques broyées

**Tableau 2. 7 : La masse volumique Sable de dune et Brique broyé**

	<b>La masse volumique apparente <math>\rho(g/cm^3)</math></b>	<b>La masse volumique absolue <math>\rho_s(g/cm^3)</math></b>
<b>Sable de dune</b>	0.951	2.24
<b>Brique broyé</b>	0.814	2.05

## 2.3 Conduite de l'essai

### 2.3.1 Matériel spécifique

Les éprouvettes prismatiques ( $4 \times 4 \times 16 cm^3$ ) utilisées pour la détermination des essais fixés par notre programme objet de notre recherche, le démoulage de moule prismatique est effectué par ouverture du moule (dévissage des boulons).

**Figure 2. 11** Moule prismatique

### 2.3.2 Composition des mélanges

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du sable de dune moulu et de la poudre de déchets de briques cuites mélangés à de la chaux sur la durabilité du mortier de sol où le rapport sol/sable a été maintenu et le rapport chaux et le rapport sable de dune moulu et poudre de déchets de briques cuites ont été modifiés en fonction du poids du mélange sec où les rapports de mélange expérimentaux sont indiqués dans le tableau.

**Tableau 2. 8 :** Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

<b>sol%</b>	<b>Sable %</b>	<b>La chaux%</b>	<b>Sable dune%</b>	<b>de brique%</b>
<b>Par rapporte au mélange sec (sol +sable)</b>		<b>Par rapporte au poids du mélange sec global</b>		

70	30	11	0	0
70	30	11	30	30
70	30	11	10	50
70	30	11	20	40

### 2.3.3 Préparation des mélanges

Pour la première fois, le sol et le sable ont été séchés avant correction granulométrique pendant 24 h à 60°C. Les matériaux ont été mélangés et les échantillons ont été comprimés manuellement à la main pour couler le mélange dans le moule. Bien que le processus de production manuelle de mélanges et des spécimens ajoute une variabilité épistémique qui peut être réduite par la mise en œuvre de procédés mécaniques, les procédés manuelles sont utilisés dans la plupart des projets de construction utilisant des matériaux en terre dans la pratique réelle.



**Figure 2. 12** Préparation de la pâte de terre dans les moule.

### 2.3.4 Mode de cure des mortiers

Après le démoulage, les éprouvettes de mortier sont manipulées avec précaution pour éviter de toucher les arêtes en raison de leur fragilité. Elles sont ensuite enveloppées d'un film plastique pour garantir leur étanchéité. Afin d'optimiser l'hydratation du liant, les briques sont conservées au laboratoire à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 24 heures avant d'être soumises au processus de cure. Ensuite, toutes les éprouvettes étudiées sont placées dans une



étuve à  $65 \pm 2^\circ\text{C}$  pour une période de 7 jours. Après avoir retiré le film plastique, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte



**Figure 2. 13** Conservation des blocs au laboratoire sur l'étuve

## 2.4 Réalisation des essais

### 2.4.1 Propriétés physique et mécanique

#### 2.4.1.1 Mesure de la masse volumique (NF P 94-054)

La masse volumique d'un sol ( $\rho$ ) est le quotient de la masse ( $m$ ) du sol par le volume ( $v$ ) qu'il occupe dans la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{v}$$

**M** : la masse d'échantillon en (g)

**V** : volume d'éprouvette en ( $\text{cm}^3$ )

#### 2.4.1.2 Essai de compression simple (NF XP-13 901)

Pour nous essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques  $(4 \times 4 \times 16) \text{cm}^3$ , à l'aide d'une presse, la résistance en compression des adobes Pour chaque essai, trois blocs ont été testés.

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$\mathbf{Re} = \frac{F}{S}$$



**Re** : Résistance a la compression des blocs en (MPa)

**F** : Force maximale en (N)

**S** : Section comprimée en  $mm^2$



**Figure 2. 14**Essai de compression

#### 2.4.1.3Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5)

Cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $4 \times 4 \times 16cm^3$ . Pour déterminer la résistance à la traction par flexion, en emploiera la méthode de flexion à trios point.

La résistance en flexion (en N /mm) est calculée au moyen de la formule :

$$RT = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d1 \times d2}$$

**RT** : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

**d1** et **d2** : sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.

**F** : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

**L** : est distance entre les appuis, en millimètre.



**Figure 2. 15** Essai de flexion

## 2.5 Essai de la durabilité

### 2.5.1 Absorption capillaire (NF XP-P 13 901)

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée selon l'essai décrit dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Cette méthode consiste à immerger partiellement la brique jusqu'à une profondeur de 5 mm (voir Figure 2.15) le coefficient d'absorption d'eau, noté ( $C_b$ ), représente le taux d'absorption après 10 minutes. Ce coefficient ( $C_b$ ), se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C_b = \frac{100(M_h \times M_d)}{S \times \sqrt{t}}$$

Avec :

**M<sub>h</sub>** : la masse de l'échantillon à l'état humide.

**M<sub>d</sub>** : la masse de l'échantillon à l'état sec.

**S** : surface de la face immergée, en centimètres carrés.

**T** : est la durée d'immersion du bloc en minutes.



**Figure 2. 16**Essai d’Absorption par capillaire

### **2.5.2Absorption totale d’eau**

Pour cet assai, l’approche consiste à placer des échantillons dans un récipient rempli d’eau pendant une période de 24 heures, puis à mesurer l’augmentation de leur masse (Ph). L’indice (A%) , qui représente l’absorption totale d’eau de chaque échantillon, est généralement calculée selon la formule suivante :

$$A\% = \frac{Ph - Ps}{Ps}$$

ou’ :

**Ph** : poids de l’échantillon à l’état humide.

**Ps** : poids de l’échantillon à l’état sec.

### **2.5.3Gonflement**

La mesure du gonflement des briques d’adobe se fait selon la procédure suivante (norme XP13-901)

1. Sceller sur chaque bloc, à l’aide d’une résine époxyde, deux plots de mesure.

2. Mesurer la distance initiale entre les plots : ( $L_0$ )
3. Placer les briques dans un bac d'eau (voir Figure 2. 16)
4. Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les pendant 10 minutes, puis mesurer la distance entre les plots : ( $L_1$ )

L'amplitude du gonflement de chaque brique est donnée par formule suivante :

$$\Delta Lg(mm/m) = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

Avec :

**L0** : la distance avant immersion

**L1** : la distance après immersion



**Figure 2. 17** Essai de gonflement

#### 2.5.4 Résistance à l'abrasion

La norme expérimentale NFXP13-901 définit la méthode pour évaluer la résistance à l'abrasion des briques de terre compactée. L'objectif est de frotter la brique avec une brosse métallique de 25mm de largeur afin de simuler une friction. La brosse effectue un mouvement aller-retour à une cadence de 1 par seconde pendant une minute, soit un total de 60 allers-retours. A partir de cet essai, on obtient le coefficient d'abrasion.

$$Ca (cm^2/g) = \frac{s}{m_0 - m_1}$$

Avec :

**Ca** : coefficient d'abrasion de la brique.

**S** : Surface d'abrasion de la brique en  $cm^2$

**m0** : masse initiale de la brique avant abrasion en gramme .

**m1** : masse initiale de la brique après abrasion en gramme .



**Figure 2. 18**Essai d'abrasion

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières utilisées dans la formulation des éprouvettes de mortier de terre développées dans le cadre de cette étude. Ces matériaux comprennent la terre ainsi que des agents stabilisants tels que le sable concassé, la chaux, les briques broyées et le sable de dunes.

La description détaillée de la composition des mélanges et des méthodes de mise en œuvre du mortier, présentée dans ce chapitre, constitue une base essentielle pour une analyse approfondie des données expérimentales et contribue à une compréhension plus précise de l'impact des paramètres étudiés sur les propriétés mécaniques et physiques du mortier de terre.

# **CHAPITRE 03**

## **RESULTATS ET**

## **DISCUSSION**

## ***CHAPITRE 03:RESULTATS ET DISCUSSION***

### **3.1 Introduction**

Ce chapitre présente en détail les résultats des essais expérimentaux réalisés dans le but d'étudier l'effet de l'ajout de poudre de déchets de briques cuites et de sable de dune broyé sur les propriétés et la durabilité du mortier de terre. Cette étude s'appuie sur un sol prélevé dans la région de Sidi Okba, wilaya de Biskra. La stabilisation du mortier a été effectuée à l'aide de 11 % de chaux vive, avec l'adoption de formulations contenant des proportions variables d'additifs.

Les compositions expérimentales ont porté sur trois mélanges principaux :

- Mélange 1 : 30 % de brique cuite + 30 % de sable de dune,
- Mélange 2 : 40 % de brique cuite + 20 % de sable de dune,
- Mélange 3 : 50 % de brique cuite + 10 % de sable de dune.

Les échantillons ont été traités conformément aux conditions standardisées, et l'influence de ces ajouts a été évaluée à travers une série d'essais portant sur les propriétés suivantes :

- la densité,
- la résistance à la compression,
- la résistance à la flexion,
- l'absorption totale,
- l'absorption capillaire,
- le gonflement par immersion,
- la résistance à l'abrasion.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les résultats de ces essais afin d'identifier le comportement des différentes formulations et de déterminer dans quelle mesure les matériaux ajoutés contribuent à l'amélioration des performances du mortier de terre en termes de solidité et de durabilité.

### 3.2 L'impact de mixte (brique broyée- sable ) sur la densité de mortier de terre

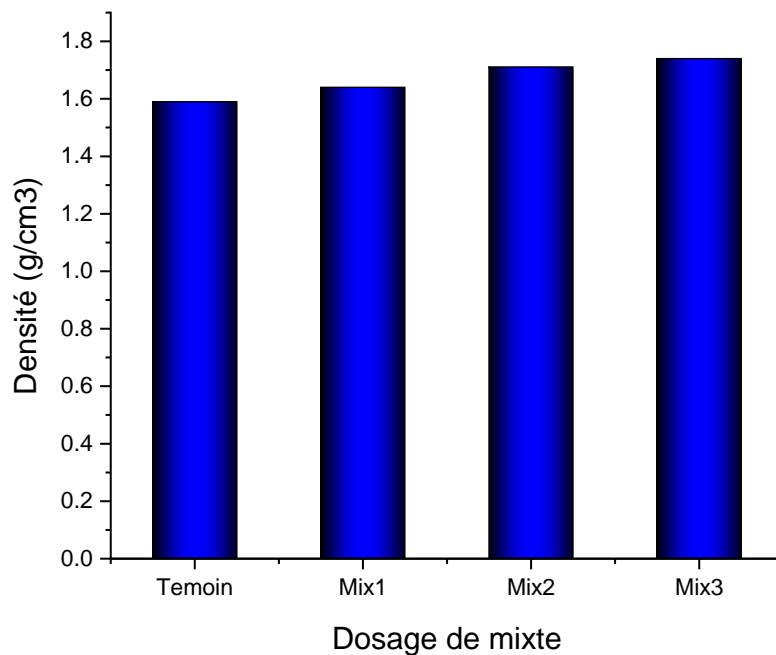
La densité apparente des différentes formulations étudiées a été mesurée et les résultats sont présentés dans la (Figure 3.1). On observe une augmentation progressive de la densité par rapport à celle du mortier de référence, enregistrée à 1,59 g/cm<sup>3</sup>. Avec une formulation contenant 30 % de poudre de briques cuites (DBC) et 30 % de sable de dunes broyé (SDB), la densité augmente d'environ **3,14 %**. En portant la teneur en DBC à 40 % et en réduisant celle du SDB à 20 %, l'augmentation atteint environ **7,62 %**. La densité maximale est obtenue avec le mélange comprenant 50 % de DBC et 10 % de SDB, soit une augmentation d'environ **9,43 %** par rapport au mortier de référence.

Cette augmentation de densité peut être expliquée par plusieurs facteurs. D'une part, la DBC possède une densité apparente plus élevée que celle de la terre crue et du SDB, ce qui contribue à accroître la densité globale du mortier. D'autre part, l'incorporation de DBC favorise la formation de produits d'hydratation de type C-S-H, améliorant la compacité de la structure interne du mortier en réduisant la porosité et en comblant les vides entre les particules.

Les résultats de mon étude concordent avec ceux obtenus par les chercheurs F.Bezaou et.al (2024) [39] dans leur étude intitulée « *Combined impact of dune sand and crushed brick waste on the characteristics of rawearth bricks* », qui examine l'impact combiné du sable de dune et des déchets de briques concassées sur les propriétés des briques en terre crue. Les deux études ont montré qu'intégrer de la poudre de brique concassée entraîne une augmentation progressive de la densité apparente. Dans mon cas, la densité est passée de 1,59 à 1,74 g/cm<sup>3</sup> avec l'utilisation de 50 % de DBC et 10 % de SDB, ce qui est en accord avec les résultats rapportés par Bezaou et al., qui ont mesuré une densité d'environ 1,78 g/cm<sup>3</sup> pour une formulation similaire.

Cette amélioration est attribuée à la densité réelle plus élevée de la poudre de brique (DBC) par rapport aux autres composants, ainsi qu'à son activité pouzzolanique, qui contribue à l'amélioration de la structure du mortier en générant des produits d'hydratation qui comblent les pores et réduisent la porosité globale de la matrice. Ces résultats soulignent clairement que l'ajout de DBC améliore significativement la densité apparente du mortier, produisant ainsi une structure matérielle plus compacte et dense





**Figure 3. 1**Influence du dosage mixte sur la densité des mortiers de terre

### 3.3 Influence de mixte (brique broyée- sable) sur la résistance à la compression

La (Figure 3.2) présente les résultats de la résistance à la compression des formulations expérimentales, mettant en évidence l'effet de l'ajout de la poudre de briques cuites (DBC) et du sable de dunes broyé (SDB) sur l'amélioration des propriétés du mortier de terre stabilisé à la chaux.

Par rapport au mélange de référence (sans ajouts), les mélanges modifiés présentent une amélioration significative. Le premier mélange, composé de 30 % de DBC et de 30 % de SDB, montre une augmentation de la résistance à la compression d'environ **19,26 %**. Cette amélioration est attribuée à l'effet structural induit par la réaction pouzzolanique de la DBC, ainsi qu'à l'amélioration de la granulométrie apportée par le SDB.

En augmentant la proportion de DBC à 40 % et en réduisant celle du SDB à 20 %, la résistance continue d'augmenter, atteignant une amélioration d'environ **23,44 %** par rapport au mélange témoin. Cela démontre que l'enrichissement en DBC favorise efficacement la réaction chimique avec la chaux, conduisant à la formation de composés cimentaires plus

cohésifs, tout en maintenant une quantité modérée de SDB permettant une meilleure compacité de la matrice.

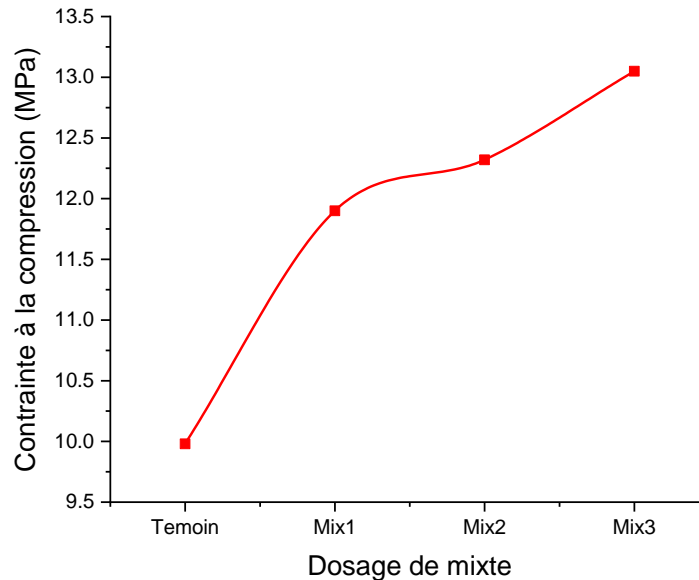
Dans le troisième mélange, contenant 50 % de DBC et seulement 10 % de SDB, la résistance maximale enregistrée montre une augmentation d'environ **30,76 %** par rapport à la référence. Ce résultat suggère que la teneur élevée en DBC atteint un seuil optimal d'activité pouzzolanique, renforçant la cohésion entre les particules et la compacité de la structure, tandis que la faible teneur en SDB contribue à la réduction de la porosité sans compromettre les réactions chimiques ou la microstructure du mortier.

De manière générale, les résultats confirment que l'augmentation de la teneur en DBC améliore directement la résistance à la compression grâce à ses propriétés pouzzolaniques, tandis que le SDB joue un rôle secondaire en optimisant la granulométrie et le remplissage des vides. Toutefois, un équilibre approprié entre les deux composants reste essentiel afin d'éviter toute saturation excessive susceptible d'altérer les performances mécaniques.

Les résultats obtenus dans notre étude sont similaires à ceux rapportés par **I.Aalil** et.al [40] dans leur étude intitulée « *Valorization of crushed bricks in lime-based mortars* », publiée en 2019 dans la revue *Construction and Building Materials*. Les auteurs y ont évalué l'effet de la

rouge  
sur la  
à la

de brique  
concassée  
résistance



compression des mortiers à base de chaux. Les deux études ont démontré qu'une augmentation du pourcentage de poudre de brique entraîne une amélioration significative de la résistance à la compression. Dans notre cas, l'augmentation de la teneur en DBC à 50 % a permis d'atteindre une résistance maximale de 13,05 MPa, soit une augmentation de plus de 30 % par rapport à l'échantillon témoin. Ce résultat concorde avec celui de Aalil et al., où la formulation contenant **10 % de chaux et 90 % de poussière de brique (M3)** a présenté la résistance à la compression la plus élevée parmi les mélanges testés, soulignant ainsi l'efficacité de la brique concassée comme addition pouzzolanique renforçant la cohésion et la solidité du mortier à la chaux. Ces résultats confirment le rôle crucial de la réaction pouzzolanique dans l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux destinés à la restauration du patrimoine architectural.

**Figure 3. 2**Influence du dosage de mixte la résistance à la compression des mortiers de terre

### **3 .4 Influence de mixte (brique broyée- sable) sur la résistance à la flexion**

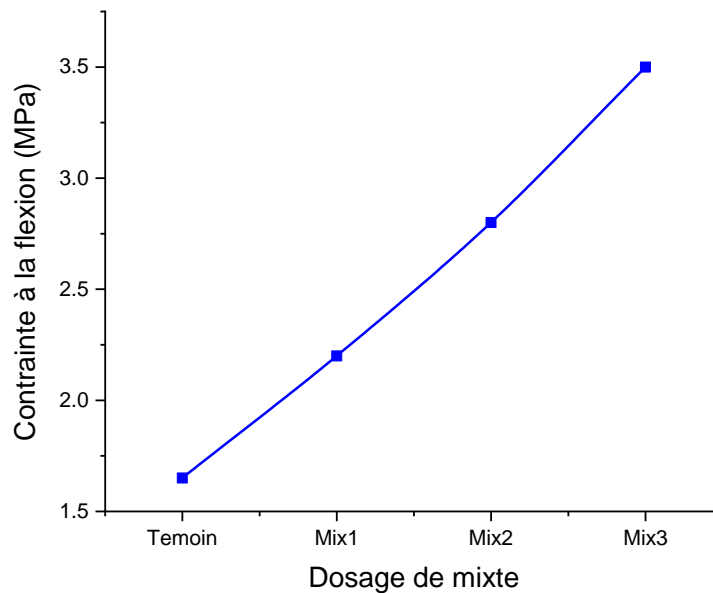
Les résultats de l'essai de flexion (Figure 3.3) montrent une évolution notable de la résistance du mortier de terre modifié par l'ajout de proportions variables de poudre de briques cuites (DBC) et de sable de dunes broyé (SDB).

Par rapport au mélange de référence (sans ajout), le mélange M1 (30 % DBC et 30 % SDB) présente une amélioration d'environ **33,33 %**. Cette amélioration est plus marquée dans le mélange M2 (40 % DBC et 20 % SDB), avec une augmentation d'environ **69,70 %**. Le mélange M3 (50 % DBC et 10 % SDB) montre la meilleure performance, avec une augmentation d'environ **112,12 %** par rapport à la référence.

Cette amélioration progressive de la résistance à la flexion est attribuée à la réaction pouzzolanique entre les composants du mélange, en particulier la poudre de briques cuites riche en oxydes actifs, qui contribue à la formation de produits d'hydratation supplémentaires, comblant les vides et renforçant la cohésion de la matrice interne du mortier.

Le sable broyé (SDB) joue également un double rôle : il améliore la granulométrie du mélange et remplit les pores fins, ce qui augmente la densité structurelle du matériau. Il est à noter que la performance maximale a été obtenue avec 50 % de DBC et 10 % de SDB, indiquant un équilibre optimal entre la réactivité pouzzolanique et la quantité de chaux disponible, sans saturer le mélange en particules inertes.

Ces résultats démontrent que l'augmentation progressive de la teneur en DBC, accompagnée d'une réduction graduelle de SDB, améliore les performances mécaniques du mortier, à condition de maintenir un rapport adéquat en chaux pour assurer l'achèvement des réactions.



**Figure 3. 3**Influence du dosage mixte sur la résistance à la flexion des mortiers de terre

### 3.5 L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la durabilité de mortier de terre

#### 3.5.1 Absorption capillaire

Les résultats de l'absorption capillaire du mortier de terre stabilisé à la chaux montrent que l'incorporation de poudre de briques cuites (DBC) et de sable de dunes broyé (SDB) améliore significativement les propriétés physiques du matériau, en réduisant le taux d'absorption d'eau par capillarité.

Le mélange de référence (sans ajout) est pris comme base avec un taux d'absorption considéré à 100 %. Le premier mélange, contenant 30 % de DBC et 30 % de SDB, montre une réduction d'environ **28,43 %** par rapport à la référence, indiquant le début de formation d'une structure plus dense et moins perméable.

Avec l'augmentation du taux de DBC à 40 % et la diminution de SDB à 20 % dans le deuxième mélange, le taux d'absorption diminue encore, avec une baisse relative d'environ **31,94 %** par rapport au mélange de référence. Ce résultat souligne l'effet actif du DBC dans la réduction de la porosité ouverte grâce à la formation de produits résultant de la réaction pouzzolanique qui comblent les vides microscopiques, tandis que le SDB joue un rôle modéré de comblement.

Dans le troisième mélange, comprenant 50 % de DBC et seulement 10 % de SDB, le taux d'absorption est réduit de manière significative, avec une diminution d'environ **44,68 %** par rapport à la référence. Cette performance élevée reflète une densification accrue de la structure et une réduction marquée de la perméabilité, liée à l'accumulation de produits cimentaires issus de la réaction avec la chaux, alors que la faible teneur en SDB ne compromet pas la densité structurale.

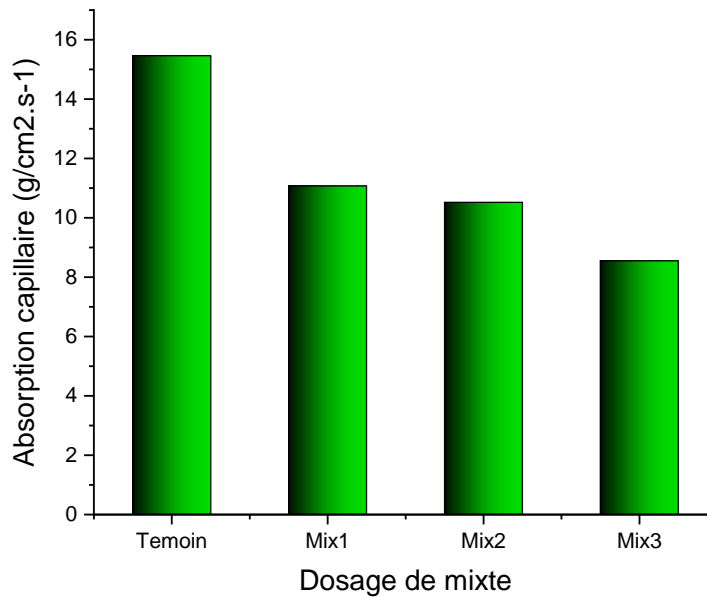
En général, les résultats confirment qu'une augmentation du contenu en DBC contribue directement à la réduction de l'absorption capillaire grâce à son effet pouzzolanique et à sa capacité à diminuer la porosité. Une teneur modérée en SDB améliore également le classement granulométrique, mais un excès peut nuire à la cohésion globale. Un équilibre entre DBC et SDB reste donc nécessaire pour obtenir des propriétés physiques optimales, réduisant l'absorption d'eau et améliorant la performance du mortier de terre stabilisé.

Les résultats que j'ai obtenus montrent une concordance notable avec ceux rapportés par I.Aalil [40] dans leur étude intitulée *"Valorization of crushed bricks in lime-based mortars"*. Dans les deux cas, l'incorporation de poudre de brique rouge a clairement contribué à l'amélioration de l'absorption capillaire du mortier.

Les essais réalisés ont révélé qu'un mélange de poudre de déchets de briques cuites (DBC) et de sable broyé (SDB) entraîne une réduction significative du taux d'absorption capillaire de l'eau. La valeur minimale enregistrée, soit 8,55 %, a été atteinte avec une composition contenant 50 % de DBC et 10 % de SDB. Cette diminution est attribuée à l'activité pouzzolanique de la DBC, qui participe à la réduction de la porosité ouverte et au renforcement de la cohésion de la matrice du mortier.

Par ailleurs, les résultats obtenus par Aalil et al. ont montré un comportement similaire, avec une baisse progressive de l'absorption capillaire à mesure que la proportion de poussière de brique augmente, la performance optimale ayant été observée à 75 %.

Cette comparaison met en évidence l'efficacité de la poudre de brique en tant que matériau pouzzolanique dans l'amélioration de la résistance du mortier à la pénétration de l'eau, notamment par la diminution de la porosité ouverte et l'augmentation de la densité de la matrice, ce qui se traduit par de meilleures performances en termes de durabilité et de propriétés physiques.



**Figure 3. 4** Influence du dosage Mixte sur l'absorption capillaire des mortiers de terre

### 3.5.2 Absorption totale

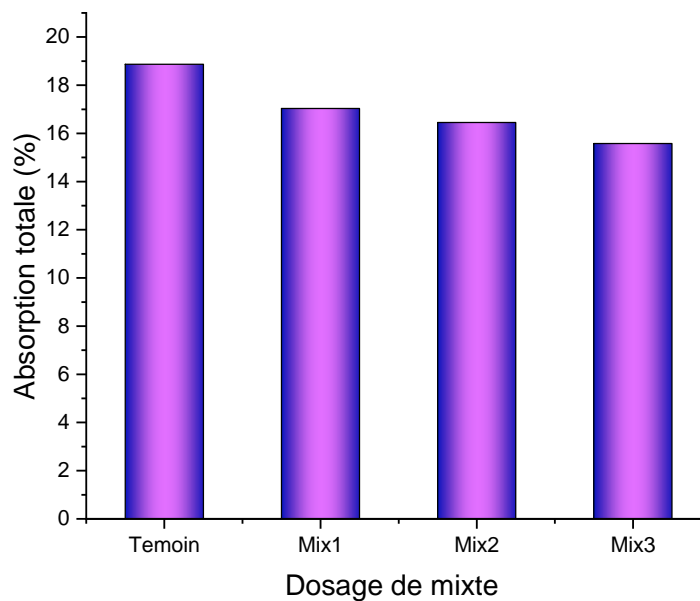
Les résultats montrent un effet clair des proportions d'ajouts de briques cuites broyées (BCB) et de sable de dunes broyé (SDB) sur la capacité du mortier de terre à absorber l'eau. Le taux d'absorption diminue progressivement avec l'augmentation de la proportion de briques cuites et la diminution de la proportion de sable de dunes, par rapport au mélange ordinaire sans ajout.

- Pour le premier mélange, contenant 30 % de briques cuites broyées et 30 % de sable de dunes broyé, le taux d'absorption correspond à environ **96,5 % du taux d'absorption du mélange ordinaire.**

- Pour le deuxième mélange, avec 40 % de briques cuites broyées et 20 % de sable de dunes, le taux d'absorption est estimé à environ **94,3 % de celui du mélange ordinaire**.
- Enfin, pour le troisième mélange, comprenant 50 % de briques cuites broyées et 10 % de sable de dunes, le taux d'absorption représente environ **91,5 % de celui du mélange de référence**.

Cette diminution progressive du taux d'absorption reflète une amélioration de la résistance du mortier à l'humidité, due aux propriétés physiques et chimiques des briques cuites qui contribuent à réduire la porosité et à augmenter la densité, tout en favorisant l'adhérence entre les particules d'argile et la chaux dans la matrice. De plus, la répartition des particules de sable de dunes aide à combler les vides entre les grains d'argile et les briques, réduisant ainsi les microporosités responsables de l'absorption d'eau.

Ces résultats permettent de conclure que l'utilisation d'un mélange équilibré de briques cuites broyées et de sable de dunes, avec une réduction progressive de la proportion de sable, améliore significativement les propriétés hydrauliques du mortier de terre, notamment en ce qui concerne la réduction du taux d'absorption totale d'eau, ce qui renforce la durabilité et la résistance du mortier utilisé dans la construction traditionnelle.



**Figure 3. 5**Influence du dosage Mixte sur l'absorption totale des mortiers de terre



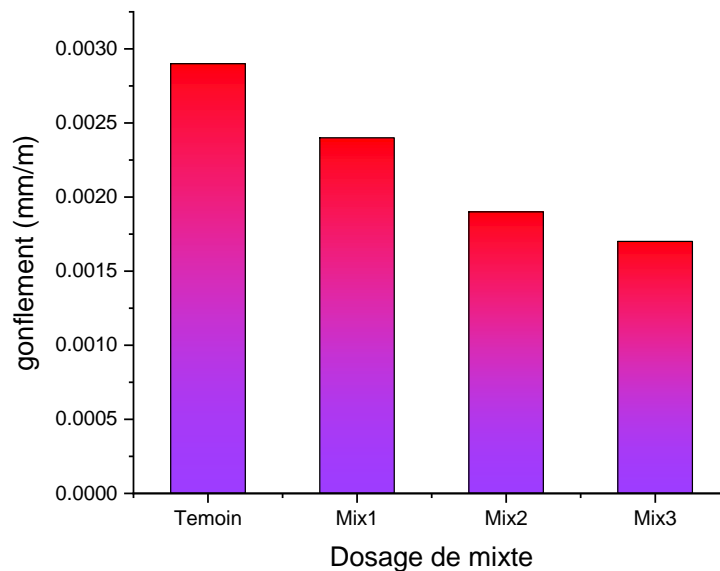
### 3.6 L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la Gonflement

Les résultats présentés dans la (figure 3.6) mettent en évidence l'effet significatif des ajouts combinés de déchets de briques cuites (DBC) et de sable de dune broyé (SDB) sur le comportement de gonflement par immersion du mortier de terre après 96 heures. Les courbes associées révèlent une tendance générale à la diminution du gonflement avec l'augmentation de la proportion de DBC et la réduction progressive de la teneur en SDB.

La valeur de gonflement mesurée pour l'échantillon témoin (sans ajouts) est prise comme référence. Par rapport à cette référence, les mélanges contenant différents pourcentages d'ajouts présentent des taux de gonflement relatifs comme suit :

- Le mélange avec 30 % de DBC et 30 % de SDB affiche un gonflement représentant environ **83 % de celui de la référence**.
- Le mélange contenant 40 % de DBC et 20 % de SDB présente un gonflement équivalent à environ **66 % de la valeur de référence**.
- Le mélange intégrant 50 % de DBC et 10 % de SDB atteint un gonflement minimal correspondant à environ **59 % par rapport à la référence**.

Ces résultats démontrent l'effet bénéfique des ajouts étudiés, notamment l'activité pouzzolanique des déchets de briques, qui améliore la cohésion interne de la matrice et réduit la perméabilité à l'eau du mortier. Cette réduction du gonflement traduit une meilleure stabilité dimensionnelle et renforce la durabilité des formulations à base de terre stabilisée.



**Figure 3. 6**Influence du dosage Mixte sur Gonflement des mortiers de terre

### 3.7 L'impact de mixte (brique broyée- sable) sur la Résistance à l'abrasion

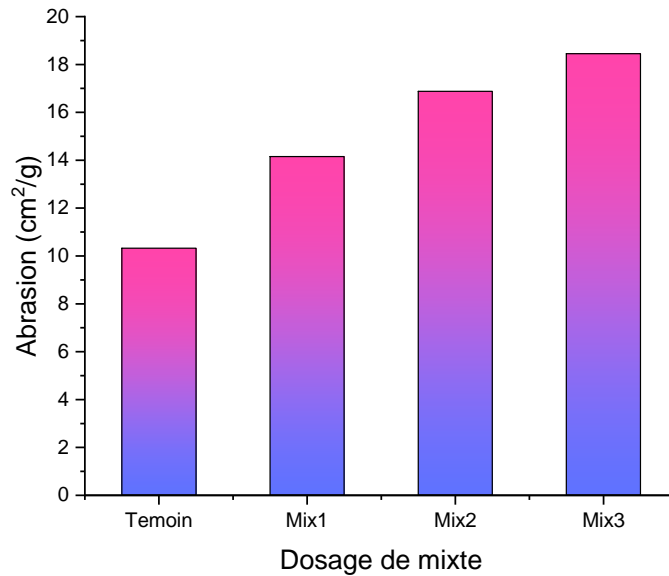
Les résultats présentés dans la (figure 3.7) mettent en évidence l'effet significatif des ajouts combinés de déchets de briques cuites (DBC) et de sable de dune broyé (SDB) sur le coefficient d'abrasion (CAR) du mortier de terre, un paramètre clé pour évaluer la résistance du matériau aux forces abrasives et, par conséquent, sa durabilité dans des environnements soumis à l'usure mécanique.

L'échantillon de référence, sans aucun ajout, a montré la plus faible résistance à l'abrasion avec une valeur de 10,32 cm<sup>2</sup>/g, prise ici comme référence à 100 %. L'introduction progressive des ajouts a permis une amélioration continue de ce paramètre.

Le mélange contenant 30 % de DBC et 30 % de SDB a atteint une valeur de 14,15 cm<sup>2</sup>/g, soit 137,1 % par rapport à l'échantillon de référence. Le mélange à 40 % de DBC et 20 % de SDB a donné 16,88 cm<sup>2</sup>/g, équivalant à 163,6 % de la référence. Enfin, le mélange le plus performant, composé de 50 % de DBC et de 10 % de SDB, a affiché 18,45 cm<sup>2</sup>/g, représentant 178,7 % de la résistance de l'échantillon sans ajouts, illustrant ainsi la meilleure performance en termes de dureté de surface et de résistance à la fragmentation par frottement.

Cette amélioration progressive reflète l'effet bénéfique des déchets de briques, dont l'activité pouzzolanique renforce la cohésion interne, ainsi que l'effet granulaire du sable de dune

broyé, qui améliore la structure de la couche superficielle. Ces résultats montrent que le choix optimal des proportions de DBC et de SDB permet d'améliorer significativement la résistance à l'abrasion du mortier de terre, soutenant ainsi l'utilisation de ces formulations dans des applications structurelles nécessitant une durabilité mécanique à long terme.



**Figure 3. 7** Influence du dosage mixte sur la Résistance à l'abrasion de terre.

### 3.8 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette étude démontrent clairement l'influence positive du mélange brique broyée (DBC) et sable de dune broyé (SDB) sur les propriétés physiques, mécaniques et durables du mortier de terre stabilisé à la chaux.

L'augmentation progressive de la proportion de poudre de briques cuites a permis d'améliorer significativement la densité apparente du mortier, ce qui est corrélé à une réduction de la porosité et une meilleure compacité de la matrice interne. Cette évolution favorable s'explique par l'activité pouzzolanique du DBC, qui génère des produits d'hydratation tels que les C-S-H, renforçant la cohésion interne et comblant les vides.

Par ailleurs, la résistance mécanique, aussi bien à la compression qu'à la flexion, a été améliorée de manière notable avec l'accroissement du taux de DBC combiné à une réduction modérée du SDB. Ce dernier joue un rôle complémentaire en optimisant la granulométrie et

en assurant un meilleur remplissage des interstices, contribuant ainsi à l'homogénéité et à la stabilité de la structure. L'équilibre entre DBC et SDB est crucial pour maximiser ces performances sans compromettre la durabilité.

Les résultats sur les propriétés hydriques, notamment l'absorption capillaire et totale, confirment une diminution significative de la perméabilité du mortier, traduisant une meilleure résistance à l'humidité. Cette amélioration est cohérente avec la formation de phases cimentaires qui limitent les voies d'entrée de l'eau. Le gonflement par immersion a également été réduit, attestant d'une meilleure stabilité dimensionnelle liée à la diminution de la porosité et à la cohésion accrue de la matrice.

Enfin, la résistance à l'abrasion a connu une augmentation progressive, soulignant un renforcement de la surface du mortier et sa capacité à résister à l'usure mécanique. Cette amélioration conforte l'utilisation des ajouts étudiés pour des applications nécessitant une durabilité et une robustesse accrues.

En résumé, l'intégration progressive de la poudre de briques cuites dans le mortier de terre, associée à une diminution contrôlée du sable de dunes broyé, constitue une solution efficace pour optimiser les propriétés physiques, mécaniques et hydriques du matériau. Ces résultats ouvrent la voie à une valorisation écologique des déchets de briques et à une amélioration durable des matériaux de construction traditionnels en terre.

### Conclusion générale

Le retour aux matériaux de construction traditionnels, notamment l'argile, constitue un choix stratégique imposé par le contexte environnemental et économique actuel, en raison de la durabilité de ces matériaux et de leur disponibilité locale. Cependant, l'amélioration de leurs propriétés physiques et mécaniques est devenue nécessaire afin de mieux répondre aux exigences de la construction moderne. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude, visant à évaluer l'effet d'un mélange de poudre de déchets de briques cuites (DBC) et de sable de dunes broyé (SDB) sur la stabilisation et l'amélioration des performances du mortier d'argile traité à la chaux.

Cette recherche a pour objectif d'étudier l'impact de la DBC et du SDB sur l'amélioration des propriétés du mortier d'argile stabilisé à la chaux, dans une démarche de recherche de solutions alternatives et durables dans le domaine des matériaux de construction, fondée sur la valorisation des déchets locaux et l'amélioration des performances physiques et mécaniques des matériaux traditionnels. Un taux fixe de chaux de 11 % a été adopté, avec un processus de séchage accéléré pendant 7 jours, sur la base d'études antérieures menées sur le même type de sol.

Les résultats ont montré qu'une augmentation progressive de la DBC, accompagnée d'une réduction du pourcentage de SDB, entraîne une amélioration notable de la majorité des propriétés étudiées. Concernant la densité apparente, une augmentation progressive a été observée avec l'augmentation de la teneur en DBC, atteignant une valeur maximale de 1,74 g/cm<sup>3</sup> pour la formulation contenant 50 % de DBC et 10 % de SDB. Cette amélioration est attribuée à la densité plus élevée de la DBC par rapport au sol brut, ainsi qu'à son rôle dans le renforcement de la structure interne par des réactions pouzzolaniques.

Sur le plan mécanique, la résistance à la compression et la résistance à la flexion ont connu une amélioration significative : la résistance à la compression est passée de 9,98 MPa pour l'échantillon de référence à 13,05 MPa pour la formulation optimale, tandis que la résistance à la flexion est passée de 1,65 MPa à 3,5 MPa. Cette évolution est due à l'interaction chimique entre la DBC et la chaux, ainsi qu'à une meilleure distribution granulométrique grâce au SDB, ce qui favorise la cohésion et réduit la porosité.

En ce qui concerne les propriétés d'absorption d'eau, les résultats ont révélé une réduction significative de l'absorption totale et capillaire, traduisant une évolution de la microstructure du mortier vers une moindre perméabilité et une meilleure durabilité. La formulation contenant 50 % de DBC et 10 % de SDB a enregistré le plus faible taux d'absorption, confirmant ainsi l'efficacité de ce mélange pour réduire l'impact de l'humidité.

Pour ce qui est du comportement au gonflement, il a été constaté qu'une augmentation de la teneur en DBC réduit l'allongement longitudinal du mortier, contribuant ainsi à une meilleure stabilité dimensionnelle et à une diminution des déformations dues à l'humidité. De plus, la résistance à l'usure s'est améliorée progressivement avec l'augmentation de la DBC, témoignant d'une plus grande dureté et d'une meilleure résistance à l'abrasion mécanique.

Ces améliorations sont attribuées à la réaction pouzzolanique active entre la poudre de briques cuites et la chaux, qui conduit à la formation de composés cimentaires (C-S-H) renforçant la cohésion du mortier et réduisant sa porosité, tandis que le SDB contribue à améliorer la granulométrie et à combler les pores fins.

En conclusion, le mélange étudié entre la DBC et le SDB, dans des proportions bien définies, constitue une stratégie efficace pour améliorer les propriétés du mortier d'argile. Il ouvre des perspectives prometteuses pour la valorisation des déchets de construction d'une manière écologique et performante, et participe au développement de matériaux de construction locaux et durables, adaptés aux régions semi-arides et respectueux de l'architecture traditionnelle

## Référence bibliographique

- [1] H. Van Damme and H. Houben, “Earth concrete. Stabilization revisited,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 90–102, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [2] J. Paulus, “Construction en terre crue: dispositions qualitatives ,constructives et architecturales,” *Appl. à un cas Prat. Ouagadougou*, p. 31, 2015.
- [3] P. Kasinikota and D. D. Tripura, “Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 280, p. 122520, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122520.
- [4] B. Ferdous, “Valorization of fired bricks waste and dune sand in adobe stabilization,” Université de Djelfa, 2024. doi: 10.13140/RG.2.2.12853.08162.
- [5] S. Layachi, “Formulation et caractérisation de blocs légers de terre crue stabilisée,” Université Mohamed Khider Biskra, 2024.
- [6] H. Niroumand, M. F. M. Zain, and M. Jamil, “Assessing of Critical Parametrs on Earth Architecture and Earth Buildings as a Vernacular and Sustainable Architecture in Various Countries,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 89, pp. 248–260, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.843.
- [7] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 512–519, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [8] “No Title.” [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Torchis>.
- [9] “No Title”, [Online]. Available: <https://www.levs.nl/en/projects/community-centre-wadouba>.
- [10] “No Title”, [Online]. Available: <https://www.tumblr.com/papalagiblog/102454080236/rammed-earth-building-also-known-as-taipa>.
- [11] “No Title.” [Online]. Available: <https://blog.geomaterio.fr/materiaux/quest-ce-que-le-torchis/>
- [12] E. Christoforou, A. Kylili, P. A. Fokaides, and I. Ioannou, “Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, no. January 2017, pp. 443–452, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.016.

- [13] N. Abdessalam, “Valorisation des sols fins en matériau de construction Soutenue,” Univ. 8 Mai 1945- Guelma, 2024.
- [14] N. Cabane, “Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l’identification et à l’analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation,” 2004. [Online]. Available: <https://vernaculaire.com/immeubles-antiques-de-shibam/>
- [15] A. Zeroual, “L’étude de la propagation des fissures d’une argile sous dessiccation The study of crack propagation of a clay under desiccation,” p. 145, 2024.
- [16] B. ASSIA, “Etude de L’activité catalytique de la sépiolite dans les réactions de polymérisation du styrène et du tétrahydrofurane,” UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE d’ORAN Mohamed Boudiaf, 2012.
- [17] K. Hicham, “Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l’adsorption de l’arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse,” 2016.
- [18] Nabil BABAHOUM, “Caractérisation, valorisation des bentonites Algériennes pour l’utilisation dans l’industrie pharmaceutique et cosmétique : cas du gisement de Maghnia , Tlemcen-Algérie,” Ecole Nationale Polytechnique, 2022.
- [19] K. Hicham, “ÉTUDE DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES ARGILES SOUS L’EFFET DES PRODUITS CHIMIQUES,” Univ. 8 Mai 1945 - Guelma, 2022.
- [20] L. MEKKI, “METHODOLOGIE D’ETUDE ET TECHNIQUES D’IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT DES SOLS FINS SOUMIS À DES CYCLES DE SECHERESSE PROLONGEE (APPLICATION AUX ARGILES EXPANSIVES DE M’SILA),” Université de M’sila, 2006.
- [21] “No Title.” [Online]. Available: <https://xn--gsil-65d.xn--wrpress-nbh.xn--cm-fmc/tag/clay/>
- [22] F. Z. Choumane, “Etude du pouvoir de sorption du Cuivre (II), du Zinc (II) et des polyphénols par les bentonites sous l’effet des irradiations micro-ondes,” Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2011.
- [23] O. Izemmouren, “Effet des Ajouts Minéraux sur la Durabilité des Briques de Terre Comprimée,” Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [24] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, and R. Chebili, “Durability of lime stabilized earth blocks,” *Courr. du Savoir-N°02*, pp. 61–66, 2002.



- [25] M. Bouhicha, F. Aouissi, and S. Kenai, "Performance of composite soil reinforced with barley straw," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 617–621, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013.
- [26] Vincent Rigassi, "6017\_BTC\_Manuel\_de\_production.pdf," 1995.
- [27] Z. ATTIMA, A. DEKAYIR, M. A. D. BENNANI, and K. ELHAMMOUTI, "Stabilisation des sols argileux par la chaux," *Journées Natl. Géotechnique Géologie l'Ingénieur JNGG2014*, p. 10, 2014.
- [28] Y. Millogo, M. Hajjaji, and R. Ouedraogo, "Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 12, pp. 2386–2392, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002.
- [29] S. Markley, "The 'Unseen Seen'—Earth Mortared Stone Construction, A Reilluminated Historic Construction Technique in Britain.," *Constr. Hist.*, vol. 33, no. 23–42, 2018.
- [30] K. S. Almeasar *et al.*, "Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and Hygroscopicity Behavior of Earth Mortars Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–19, 2021, doi: 10.1080/15583058.2021.1950235.
- [31] "No Title." [Online]. Available: [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Wall\\_reconstitution\\_Apadana\\_Susa.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Wall_reconstitution_Apadana_Susa.jpg)
- [32] T. YASSINE, "VALORISATION DES REJETS MINIERES DANS LA FABRICATION DE BRIQUES CUITES: ÉVALUATIONS TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTALE," UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE VALORISATION, 2017.
- [33] R. Harbi, "Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchet de briques.," université 8 Mai 1945 Guelma., 2009.
- [34] "https://www.istockphoto.com/fr/photo/quartier-vide-dunes-du-d%C3%A9sert-rub-al-khali-paysage-gm1221129797-357818622".
- [35] E. Atiki *et al.*, "Assessment of flexural behavior of compressed earth blocks using digital image correlation technique: effect of different types of date palm fibers," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–22, 2023, doi: 10.1080/19648189.2023.2245868.

- [36] “<https://www.middleeasteye.net/fr/actu-et-enquetes/science-dunes-sable-respirent-humidite-desert-qatar-mauritanie>”.
- [37] O. Izemmouren, A. Guettala, and S. Guettala, “Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks,” *Geotech. Geol. Eng.*, 2015, doi: 10.1007/s10706-015-9904-6.
- [38] T. E. Elahi, A. R. Shahriar, M. S. Islam, F. Mehzabin, and N. Mumtaz, “Suitability of fly ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120935, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120935.
- [39] F. Bezaou, O. Izemmouren, and S. Guettala, “Combined impact of dune sand and crushed brick waste on the characteristics of raw earth bricks,” *Stud. Eng. Exact Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 1335–1362, 2024, doi: 10.54021/seesv5n1-069.
- [40] I. Aalil *et al.*, “Valorization of crushed bricks in lime-based mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 226, pp. 555–563, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.265.

NF P 18 555 : Essai de la masse volumique apparent et absolue

NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par la méthode sédimentation.

NF P 94-054 : Sols : Reconnaissance et essai détermination de la masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre.

NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et essai détermination des limite d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau).