

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed khider – Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et Hydraulique

Référence :...../ 2024



جامعة محمد خيضر- بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية والري

المرجع:...../ 2024.

Mémoire de Master

2ème année

Option : Matériaux en

Génie civil.

THEME :

L'effet du sable de dune broyé sur la durabilité de mortier de terre stabilisé à la chaux.

Etudiante :

- Zouzou Safa

Encadrant :

- Dr Izemmouren Ouarda

Promotion: 2024

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la force, le courage et la volonté nécessaires pour achever ce mémoire.

Je remercie particulièrement mon encadrante, Dr. Izemmouren Ouarda. Je lui exprime ma profonde gratitude et reconnaissance pour m'avoir guidé et orienté tout au long de la conception et de l'élaboration de ce mémoire.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour leur présence et le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de mon travail.

DÉDICACE

Je dédie ce Travail à :

À ma chère mère,

Quoi que je fasse ou dise, je ne pourrai jamais te remercier comme il se doit. Ton affection m'enveloppe, ta bienveillance me guide, et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour surmonter les obstacles.

À mon cher père,

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail soit l'expression de ma gratitude et de mon affection.

À mon frère Marwan, et Mes sœurs Imane et Maya,

Vous avez partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Votre soutien chaleureux et vos encouragements tout au long de mon parcours m'ont été précieux.

À ma chère grand-mère Messaouda,

Je te souhaite une bonne santé.

Enfin, à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu,

À vous tous que j'aime.

Résumé

Cette étude vise à valoriser le sable de dune en combinaison avec la chaux pour la production des mortiers à base de terre dans les joints de maçonnerie. Dans ce cadre, on a utilisé trois teneurs en sable de dune broyé (10%,20% et 30% du poids de la chaux), avec une teneur de 10% de la chaux. Les échantillons ont été soumis aux essais des résistances mécaniques de traction et de résistances en compression et aussi aux essais de la durabilité : absorption totale et capillaire, gonflement, abrasion et attaque de sulfate.

Les résultats obtenus ont montré que les mélanges incorporant 20 % de sable de dune broyé (SDB) présentaient les meilleures résistances avec une durabilité accrue. De plus, cette substitution a entraîné une augmentation de 18,18 % de la résistance à la compression. En outre, des réductions de 24,01 % de l'absorption capillaire, de 16,34 % de l'absorption totale et une augmentation de 43,31 % de la résistance à l'abrasion ont été observées. Ces résultats indiquent que le SDB peut potentiellement être utilisé avec la chaux pour produire des mortiers stables et durables.

Mots clés: Mortier de terre, la chaux, sable de dune, résistances mécaniques, durabilité.

Abstract

This study aims to valorize dune sand in combination with lime for the production of earth-based mortars in masonry joints. In this context, three different contents of ground dune sand (10%, 20%, and 30% by weight of lime) were used, along with 10% lime content. The samples were subjected to tests for mechanical tensile and compressive strength as well as durability tests, including total and capillary absorption, swelling, abrasion, and sulfate attack.

The results showed that mixtures incorporating 20% ground dune sand (GDS) exhibited the best strengths with increased durability. Additionally, this substitution led to an 18.18% increase in compressive strength. Furthermore, reductions of 24.01% in capillary absorption, 16.34% in total absorption, and 43.31% in abrasion resistance were observed. These findings indicate that GDS can potentially be used with lime to produce stable and durable mortars.

Keywords: Earth mortar, lime, dune sand, mechanical strength, durability.

المخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تبيين رمل الكثبان الرملية مع الجير لإنتاج ملاط قائم على التربة في فواصل اللبانات. في هذا السياق، تم استخدام ثلاث نسب من رمل الكثبان المطحون (10%، 20%، و30% من وزن الجير) مع نسبة 10% من الجير. خضعت العينات لاختبارات المقاومة الميكانيكية للشد والضغط وكذلك لاختبارات المتانة: الامتصاص الكلي والشعري، الانتفاخ، التآكل و الوسط الكبريتي.

ظهرت النتائج أن الخلائط التي تحتوي على 20% من رمل الكثبان المطحون (SDB) قدمت أفضل مقاومات مع زيادة في المتانة. بالإضافة إلى ذلك، أدى هذا الاستبدال إلى زيادة بنسبة 18.18% في مقاومة الضغط. علاوة على ذلك، لوحظت تخفيضات بنسبة 24.01% في الامتصاص الشعري، و16.34% في الامتصاص الكلي، وزيادة بنسبة 43.31% في مقاومة التآكل. تشير هذه النتائج إلى أن رمل الكثبان المطحون يمكن أن يستخدم بشكل محتمل مع الجير لإنتاج ملاط ثابت ودائم.

الكلمات المفتاحية: ملاط التربة، الجير، رمل الكثبان الرملية، المقاومة الميكانيكية، المتانة.

Table des matières :

Remerciement	I
Dédicace	Ii
Résumé	Iii
Abstract	Iv
الملخص	V
Table de matières	Vii
Liste des figures	Xi
Liste des tableaux	Xii
INTRODUCTION GENERALE	2

Chapitre 01 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.

1.1	Introduction	4
1.2	Avantages et inconvénients	4
1.3	Constitution de la terre	5
1.3.1	Les argiles	5
1.4	Le mortier de terre	9
1.4.1	Le rôle de mortier.....	10
1.4.2	Les Caractéristiques du mortier de terre :	10
1.5	Stabilisation de la terre :	11
1.5.1	Définition :	11
1.5.2	Stabilisation physique :	12
1.5.3	Stabilisation mécanique :	12
1.5.4	Stabilisation chimique :	12
1.5.5	Stabilisation au ciment :	13
1.5.6	Stabilisation par la chaux :	14
1.6	Effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des matériaux à base de terre	17
1.7	Effet du dosage des ajouts sur la durabilité :	20

1.8	Sable de dune finement broyé :	24
1.9	Conclusion :	25

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES.

2.1	Introduction :	27
2.2	Matériaux utilisés :	27
2.2.1	Sol	27
2.2.2	Sable concassé :	31
2.2.2.1	La chaux :	32
2.3	Conduite de l'essai.....	32
2.3.1	Matériel spécifique :	32
2.3.2	Composition des mélanges	33
2.3.3	Préparation des mélanges	33
2.3.4	Mode de cure des mortiers	34
2.4	Réalisation des essais.....	35
2.4.1	Résistances mécaniques	35
2.5	Propriétés physique.....	36
2.5.1	Mesure de la masse volumique (NF P94-054).....	36
2.6	Essai de la durabilité	36
2.6.1	Absorption capillaire (NF XP- P 13 901) :	36
2.6.2	Absorption totale d'eau	37
2.6.3	Gonflement.....	38
2.6.4	Résistances à l'abrasion	39
2.6.5	Attaque externe au sulfate	40
2.7	Conclusion.....	41

CHAPITRE03 : RESULTAT ET DISCUSSION.

3.1	Introduction :	43
3.2	Les propriétés physico-mécaniques	44
3.2.1	La densité	44
3.2.2	Résistance à la compression :	45
3.2.3	Résistance à la flexion :	46

3.3	Essais de la durabilité	47
3.3.1	Absorption totale et capillaire :.....	47
3.3.2	Gonflement :	48
3.3.3	Résistance à l'abrasion :	49
3.3.4	L'attaque de sulfate :	49
3.4	Conclusion :.....	52

Liste des figures

Figure 1.1 : Photographie au MEB (Hibouche, 2013).	7
Figure 1.2 : Photographie au MEB d'une montmorillonite. (Hibouche, 2013)	7
Figure 1.3 : Structure d'un chlorite ; (à droite), image MEB d'un chlorite (à gauche) . (Tucker, (2001	8
Figure 1.4 : Structure cristalline de la kaolinite. Bish and Von Dreele (1989) cité par (El . (Ouahebi, 2013).	9
Figure 1.5 : Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993).	9
Figure 1.6 : Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004).	13
Figure 1.7 : Variation du PH d'une solution de Ca (OH ₂) dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutée (Marrot, 2010).	15
Figure 1.8 . Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux. (M. Afes, G. Didier, 2000).	16
Figure 1.9 : Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH Little, (1987)	16
Figure 1.10 : Réaction pouzzolanique. Marrot, (2010)	17
Figure 1.11 : Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA. Almeasar et al. (2021	18
Figure 1.12 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (Izemmouren, 2016).	18
Figure 1.13 : : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche (Izemmouren, 2016).	19
Figure 1.14 : influence du dosage des ajouts sur l'absorption totale. Izemmouren (2016).	20
Figure 1.15 : influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire. Izemmouren (2016).	21
Figure 1.16 : Absorption totale de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA, après test d'ébullition. Almeasar et al. (2021).	21
Figure 1.17 : Absorption totale d'EMS en fonction de la teneur en DPA, après immersion dans l'eau. Almeasar et al. (2021).	22
Figure 1.18 : Diffractogramme X du sable de dune broyé (k. arroudj k. et m n. oudjit, 2002).	22

Chapitre 02 :

Figure 2.1: Le sol.	27
Figure 2.2 : Mesure de la masse volumique (a) Apparente, (b) Absolue.	28
Figure.2.3 : Détermination de WL et WP.	29
Figure 2.4 : Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande.	29
Figure.2.5 : Granulométrie du sol.	30
Figure 2.6. Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).	31
Figure 2.7 : Analyse granulométrique du sable concassé.	32
Figure 2.8 : Moule prismatique.	33
Figure 2.9 : Préparation de la pâte de terre dans les moules.	34
Figure 2.10: Conservation des blocs au laboratoire.	34
Figure 2.11 : Essai de compression.	35
Figure 2.12 : Essai de flexion.	36
Figure 2.13: Essai d'absorption par capillaire.	37
Figure 2.14: Essai d'absorption totale.	38
Figure 2.15: Essai de gonflement.	39
Figure.2.16 : Essai d'abrasion.	40
Figure 2.17 : Essai d'attaque externe au sulfate.	41

Chapitre 03 :

Figure 3.1 : Programme expérimental.	43
Figure 3.2 : Influence du dosage du SDB sur la densité des mortiers de terre.	44
Figure 3.3 : Influence du dosage du SDB sur la résistance à la compression des mortiers de terre.	45
Figure 3.4 : Influence du dosage du SDB sur la résistance à la flexion des mortiers de terre.	46
Figure 3.5 : Influence du dosage du SDB sur l'absorption capillaire et totale des mortiers de terre.	47
Figure 3.6 : Influence du dosage du SDB sur le gonflement des mortiers de terre.	48
Figure 3.7: Influence du dosage du SDB sur la résistance à l'abrasion des mortiers de terre.	49
Figure 3.8 : État des éprouvettes après exposition au milieu sulfaté	50

Figure 3.9 : Coupes transversales des échantillons montrant un précipité blanchâtre sur les sections internes. 50

Figure 3.10 : Influence du dosage du SDB sur le grain de masse des mortiers de terre . 51

Figure 3.11 : Influence du dosage du SDB sur la résistance à la compression des mortiers de terre. 52

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Travaux antérieurs sur l'utilisation des différentes additives minérales dans la production des matériaux à base de terre.	23
Tableau 2.1: Les masses volumiques du sol.	27
Tableau 2.2 : Limites d'Atterberg de sol.	28
Tableau 2.2 : Bleu méthylène .	30
Tableau 2.4 : Masses Volumiques du sable concassé.	30
Tableau 2.5 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive (Izemmouren, 2015).	31
Tableau 2.6 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.	32

Introduction Générale

Introduction générale

Contrairement au béton ou à l'acier, la terre naturelle peut être utilisée comme matériau de construction sans nécessiter une importante consommation d'énergie. Elle offre de nombreux avantages sur les plans environnemental, social et culturel. Cependant, les constructions en terre sont souvent sujettes à une faible résistance, à des fissures dues au retrait et à des problèmes liés à leur sensibilité à l'eau. Pour remédier à ces défis, diverses méthodes de stabilisation de la terre ont été développées, comprenant des approches physiques, chimiques et mécaniques. Cela a donné lieu à la création de plusieurs produits à base de terre, tels que l'adobe, le pisé, le torchis, les blocs de terre comprimée, le mortier de terre, et d'autres encore.

Le mortier de terre, fréquemment employé dans la construction en terre crue, se constitue d'un assemblage de terre, de sable, d'eau, et parfois de fibres végétales. À la différence des mortiers de ciment largement répandus, il présente un avantage écologique en raison de l'absence de nécessité de cuisson à haute température, ce qui diminue les émissions de gaz à effet de serre.

Les bâtiments construits avec des matériaux naturels tels que les briques de terre comprimée, le torchis, l'adobe, etc., utilisent de plus en plus les mortiers en terre en raison de leur faible impact environnemental. Cependant, ces constructions enduites de mortiers de terre sont vulnérables à l'humidité élevée, aux précipitations et aux vents, nécessitant ainsi des entretiens fréquents. Il est donc crucial de développer des mortiers plus solides et résistants aux intempéries. Pour atteindre cet objectif, de nombreuses recherches ont été menées pour tester différents remplisseurs et additifs dans les mortiers de terre afin de produire des enduits plus robustes. Dans ce travail ont étudié l'effet du sable de dune broyé sur les résistances mécaniques et la durabilité de mortier de terre stabilisé à la chaux.

À travers cet objectif et pour étudier l'effet de sable de dune broyé. Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

Le premier chapitre présenter une bibliographique, D'abord, ont abordé un rappel sur les différents types d'argile et les méthodes de stabilisation qui leur sont associées. Ensuite, je

vais présenter les études antérieures qui ont examiné l'effet des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des produits en terre.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'identification et la caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude, notamment les sols, le sable concassé, la chaux et le sable de dune broyé. Il présente également les différentes compositions des mélanges, les méthodes de stockage ainsi que les procédures d'essai expérimentales mises en œuvre.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus ainsi que les discussions qui en découlent. Il se penche sur l'analyse de l'effet du sable de dune broyé sur les résistances mécaniques et la durabilité de mortier de terre stabilisé à la chaux, nous avons utilisé les essais d'absorption totale et capillaire à l'eau, le gonflement et l'abrasion et l'érosion (goutte à goutte).

Une conclusion générale des principaux résultats dégagés lors de cette étude ainsi que des recommandations retenues sont présentées à la fin.

Chapitre 01
SYNTHÈSE
BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

À travers l'histoire, la terre reste l'un des principaux matériaux de construction. Elle est abondamment disponible et sa transformation en matériau de construction nécessite peu d'énergie. Ses excellentes propriétés plastiques et son caractère écologique en font un choix privilégié pour la construction depuis des siècles. Cependant, dans les pays industrialisés, l'avènement des parpaings, du béton et d'autres liants hydrauliques a relégué la construction en terre crue au second plan. Cependant, avec les préoccupations environnementales croissantes liées à ces matériaux, la construction en terre crue connaît un regain d'intérêt, aussi bien dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. Malgré ses faiblesses actuelles, telles que sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, la construction en terre crue, notamment lorsqu'elle est stabilisée selon des techniques spécifiques, présente d'énormes avantages environnementaux en tant qu'approche écologique (Houben, 1996).

1.2 Avantages et inconvénients**➤ Avantages**

Les avantages de la construction en terre sont nombreux :

- Elle est omniprésente et entièrement recyclable, ce qui en fait une ressource durable.
- Elle agit efficacement comme régulateur d'humidité, favorisant un environnement intérieur confortable et sain.
- Sa bonne inertie thermique et sa nature incombustible en font un matériau adapté pour maintenir des températures stables dans les bâtiments.
- Elle représente un patrimoine régional à préserver, contribuant à la préservation de l'identité culturelle et architecturale.
- Dans de nombreuses régions, elle demeure le seul matériau de construction disponible et accessible, offrant ainsi une solution économique et pratique pour la construction.

➤ Inconvénients

La construction en terre présente également des inconvénients :

- Elle repose sur une base de connaissances scientifiques relativement limitée.
- Elle manque de règles professionnelles et de normalisation spécifiques.
- Sa sensibilité à l'eau constitue un défi, notamment en termes de durabilité et de résistance.
- En termes d'isolation, elle présente des performances relativement faibles par rapport à d'autres matériaux.

1.3 Constitution de la terre

La terre représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre, formée par la transformation de la roche mère et enrichie par des apports organiques. Elle est à la fois le support et le produit du vivant. L'altération de la roche mère peut résulter de processus mécaniques et/ou chimiques sous l'influence des phénomènes climatiques et des organismes vivants (Delbecque, 2011).

La composition de la terre comprend un mélange de quatre éléments en proportions variables (Houben et Guillaud, 2006) :

- **Les graviers** : Ces particules de matériau grossier, de petite taille, proviennent de la désagrégation de la roche mère et des cailloux. Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Les graviers constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait.
- **Les sables** : il s'agit de roches sédimentaires meubles composées de petits fragments issus de la désagrégation de roches de diverses natures, principalement la silice. Leur taille varie entre 2 mm et 0,06 mm.
- **Les limons** : ces formations sédimentaires se caractérisent par des grains de taille intermédiaire entre les argiles et les sables, soit entre 2 et 63 μm .
- **Les argiles**: ce sont des particules microscopiques dont les dimensions sont inférieures à 2 μm .

1.3.1 Les argiles

1.3.1.1 Définition

Le matériau "argile" peut être défini en fonction de la taille des grains et de la minéralogie. En règle générale, les géologues considèrent comme "argile" tout minéral de granulométrie fine, dont la fraction la plus fine est généralement inférieure à 2 μm , et qui provient des roches et des sols (Alves de Azevero, 2005).

1.3.1.2 Structure de minéraux argileux

Les argiles sont constituées de minéraux composés de phyllosilicates hydratés. Ces minéraux adoptent une structure en feuillets bidimensionnels résultant de la liaison entre des tétraèdres SiO_4 et des octaèdres Al O_6 . Plus précisément, chaque tétraèdre SiO_4 partage trois sommets avec d'autres tétraèdres adjacents, créant ainsi une composante plane hexagonale.

Les sommets du tétraèdre qui ne sont pas dans le plan établissent des liaisons avec l'octaèdre AlO_6 . L'association de ces couches tétraédriques et octaédriques crée le treillis caractéristique de chaque type d'argile. Ces structures en feuillet confèrent aux argiles des propriétés intéressantes, telles qu'une grande surface spécifique et une capacité d'adsorption élevée.

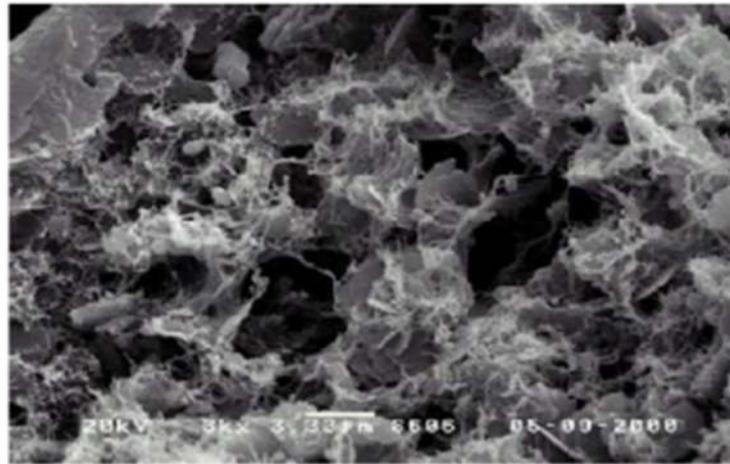
1.3.1.3 Classification et type d'argile

En fonction de leur structure chimique, les argiles peuvent être regroupées en trois familles principales : la famille de Kaolinite T-O, la famille d'Illite T-O-T et la famille de montmorillonite T-O-T.

- **Les minéraux de type 1 :1** ou T-O sont constitués d'un feuillet (une couche octaédrique et une couche tétraédrique) avec une épaisseur d'environ 7.2 Å (angström).
- **Les minéraux de type 2 :1** ou T-O-T sont constitués d'un feuillet (une couche octaédrique insérée entre deux couches tétraédriques) dont l'épaisseur varie entre 9 et 15 Å.
- **Les minéraux de type 2 :1 :1** ou T-O-T sont constitués d'un feuillet (une couche octaédrique encadrée par deux couches tétraédriques) avec une épaisseur d'environ 14 Å.
- **Certains minéraux interstratifiés** ont une épaisseur de feuillet variable, résultant d'un mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes précédents.
 - Les principales familles d'argiles sont les suivantes :

a) L'illite :

L'illite, membre de la famille des phyllosilicates 2 :1, se compose d'un feuillet élémentaire constitué d'une couche octaédrique d'aluminium intercalée entre deux couches tétraédriques de silicium. Dans ces couches tétraédriques, un ion Si^{4+} sur quatre est substitué par un ion Al_3^+ , créant un déficit de charge. Pour compenser cette charge, des ions potassium K^+ sont présents dans l'espace interfoliaire, assurant des liaisons solides entre les feuillets. (Bouchet et al., 2000 ; Truche, 2010).

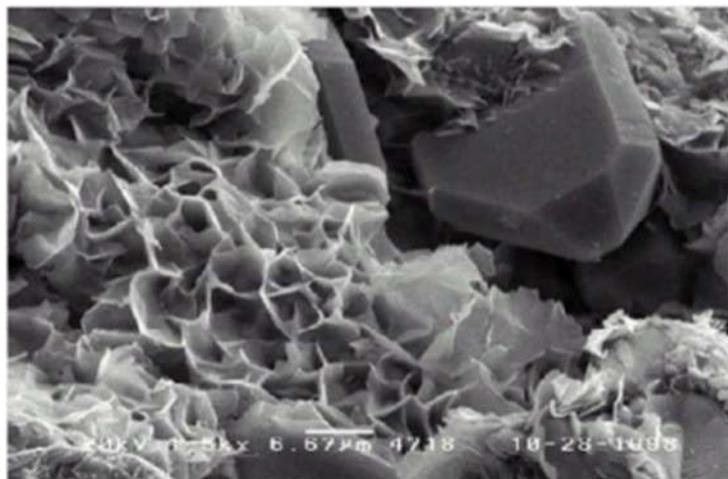


Picture size 33 μ -m this picture from the weatherford laboratories

Figure 1.1 : Photographie au MEB (Hibouche, 2013).

b) La montmorillonite :

La montmorillonite, appartenant à la famille des phyllosilicates, est une argile dioctaédrique caractérisée par une charge superficielle négative. Cette charge découle principalement de la substitution de silicium (Si) par de l'aluminium (Al) dans la couche tétraédrique, ainsi que de la substitution d'aluminium dans la couche octaédrique par des éléments tels que le magnésium (Mg), le fer (Fe), le zinc (Zn) ou le nickel (Ni). Ce défaut de charge est compensé par des cations mobiles et facilement échangeables tels que Na^+ et Ca^{2+} , comme illustré dans la figure (1.2) par Pedro (1994).



Picture size 67 μ -m this picture from the weatherford laboratories

Figure 1.2 : Photographie au MEB d'une montmorillonite. (Hibouche, 2013).

c) Les vermiculites :

Les vermiculites font partie de la famille des phyllosilicates 2:1. Elles sont étroitement liées aux smectites, mais se distinguent par un déficit de charge plus prononcé. Principalement tri-octaédriques, elles présentent un déficit de charge principalement dû à des substitutions tétraédriques. Ce déficit est compensé dans l'espace interfoliaire par des cations, principalement du magnésium (Mg^{2+}), ainsi que par des couches d'eau. (Bouchet et al., 2000 ; Truche, 2010).

d) Les chlorites :

Les chlorites sont classés dans la famille des phyllosilicates 2:1:1. Bien qu'ils partagent des similitudes avec les argiles et qu'ils puissent être présents en quantité significative dans les sols moins évolués de la région, il est important de les mentionner en raison de leurs propriétés. Leur structure est cependant plus complexe, comme illustré dans la figure (1.3). (Bouchet et al., 2000 ; Truche, 2010).

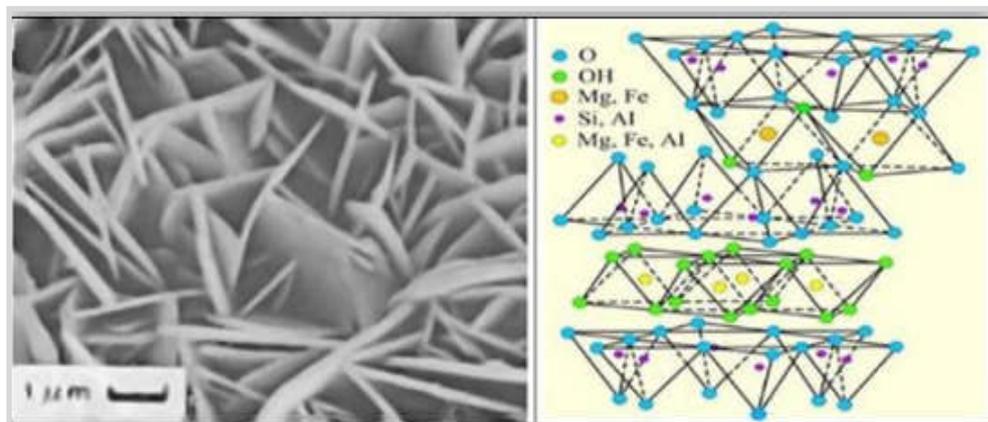


Figure 1.3: Structure d'un chlorite ; (à droite), image MEB d'un chlorite (à gauche) Tucker, (2001).

e) La kaolinite :

Les kaolinites font partie de la famille des phyllosilicates 1 :1. Leur feuillet élémentaire se compose d'une couche tétraédrique de silicium associée à une couche octaédrique d'aluminium. Entre les feuillets de kaolinite successifs, les ions hydroxyles OH^- des couches octaédriques sont alignés avec un plan contenant des ions oxygène O^{2-} de la couche tétraédrique. Les liaisons entre les feuillets sont ainsi le résultat d'une

combinaison de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals, comme illustré dans la figure (1.4). (Bouchet et al., 2000 ; Truche, 2010).

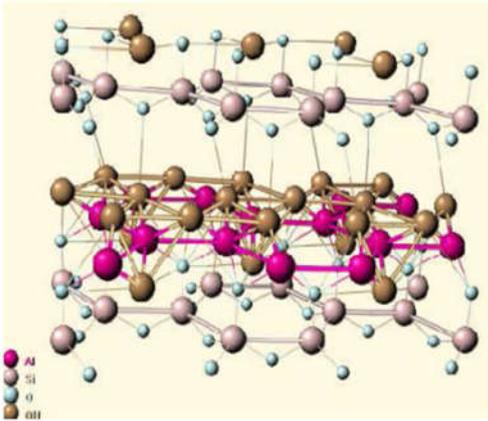


Figure 1.4 : Structure cristalline de la kaolinite. Bish and Von Dreele (1989) cité par (El Ouahebi, 2013).

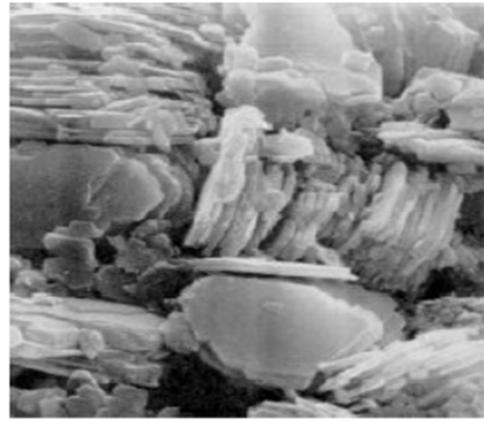


Figure 1.5 : Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993).

1.4 Le mortier de terre

Le mortier de terre est un matériau de construction traditionnel constitué de terre, de sable et d'eau, utilisé pour lier et fixer des éléments de construction tels que des briques, des pierres ou des blocs de béton. Contrairement au ciment, il s'agit d'un matériau naturel et écologique, souvent préféré dans la construction de maisons en terre et de bâtiments durables. La proportion habituelle est de 3 à 4 volumes de sable pour 1 volume de terre, mélangés avec de l'eau pour obtenir une consistance pâteuse. Après un mélange homogène, la pâte est appliquée sur les surfaces à sceller ou à fixer.

Le mortier de terre présente une bonne résistance à la compression et à la flexion, ainsi qu'une grande résistance aux intempéries. Facile à travailler et à façonner, il convient à diverses applications de construction. Cependant, comparé au ciment, il est moins résistant et peut se fissurer ou se dégrader plus rapidement, nécessitant ainsi un entretien régulier pour maintenir sa durabilité.

1.4.1 Le rôle de mortier

Le mortier de terre remplit diverses fonctions essentielles dans la construction :

- **Scellement des joints** : Il est utilisé pour combler et sceller les espaces entre les briques, les pierres ou les blocs de béton, assurant ainsi une liaison robuste et étanche entre les éléments de construction.
- **Fixation des éléments** : Il sert à coller de manière durable les différents éléments de construction tels que les briques ou les pierres, assurant leur stabilité et leur solidité.
- **Renforcement de la structure** : Il peut être employé pour renforcer la structure d'un édifice en formant des murs porteurs ou des piliers solides.
- **Isolation thermique et acoustique** : Naturellement isolant, le mortier de terre contribue à réguler la température à l'intérieur d'un bâtiment et à atténuer les bruits extérieurs.
- **Aspect esthétique** : Il permet de créer des finitions esthétiques en ajoutant des couleurs, des textures et des motifs à la surface des murs ou des éléments de construction.
- **En somme**, le mortier de terre joue un rôle polyvalent et crucial dans la construction, en assurant le scellement, la fixation et le renforcement des éléments tout en offrant des avantages en termes d'isolation thermique, d'isolation acoustique et d'esthétique.

1.4.2 Les Caractéristiques du mortier de terre

Les mortiers de terre sont des matériaux de construction traditionnels à base de terre, utilisés depuis des millénaires dans de nombreuses régions du monde. Leurs caractéristiques varient en fonction des ingrédients utilisés, mais voici quelques traits généraux :

- **Respirabilité** : Les mortiers de terre sont hautement perméables à l'air et à la vapeur d'eau, les rendant très respirant. Cette propriété permet une évacuation efficace de l'humidité des murs, prévenant ainsi la formation de moisissures et de pourriture.
- **Faible résistance à la compression** : Comparativement à d'autres matériaux de construction tels que le béton ou la brique, les mortiers de terre ont une résistance à la compression relativement faible. En conséquence, ils ne sont pas adaptés aux structures de grande envergure.

- **Élasticité** : Les mortiers de terre présentent une certaine élasticité, ce qui leur permet de s'adapter aux mouvements naturels du sol ou des fondations. Cette caractéristique les rend particulièrement adaptés aux structures en terre telles que les maisons en pisé.
- **Facilité de mise en œuvre** : Les mortiers de terre sont relativement simples à préparer et à appliquer. Bien que les techniques de construction en terre soient souvent transmises de génération en génération et varient localement, les méthodes modernes ont facilité la préparation et l'application des mortiers de terre.
- **Durabilité** : Correctement préparés et entretenus, les mortiers de terre sont très durables. Ils peuvent résister pendant plusieurs décennies, voire des siècles, sous réserve de conditions environnementales favorables et d'un entretien régulier du bâtiment.
- Il est important de noter que les caractéristiques des mortiers de terre varient considérablement en fonction des ingrédients utilisés et des méthodes de préparation. Les mortiers de terre modernes peuvent être renforcés avec des fibres ou d'autres matériaux pour augmenter leur résistance, et ils peuvent également être mélangés à d'autres matériaux de construction pour obtenir des résultats différents.

1.5 Stabilisation de la terre

1.5.1 Définition

Stabiliser la terre implique de modifier les propriétés d'un système composé de terre, d'eau et d'air afin d'obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application spécifique. Selon Houben (2006), la stabilisation est un processus complexe en raison de divers paramètres, notamment :

- Les propriétés intrinsèques de la terre.
- Les contraintes économiques du projet.
- Les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet.
- Ces différents facteurs influencent le processus de stabilisation de manière significative, nécessitant une compréhension approfondie et une approche adaptée à chaque contexte spécifique.

➤ Les procédés

On dénombre trois principaux procédés de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique). Izemmouren (2016).

1.5.2 Stabilisation physique

Il existe deux approches principales pour procéder à une stabilisation physique :

1. Modification des propriétés du sol pour améliorer les caractéristiques du matériau en corrigeant sa granularité. Dans ce cas, l'intervention vise directement la granularité du sol. Le mélange obtenu peut conduire, selon les besoins, à la réduction de la plasticité du matériau de base en ajoutant du sable, ou à lui conférer une certaine cohésion en ajoutant des fines.
2. Une autre méthode de stabilisation physique consiste à ajouter des fibres végétales à des terres argileuses. Cette pratique renforce la structure du matériau en prévenant les fissures qui pourraient se former lors du retrait de l'argile pendant le séchage. Cette technique est étudiée notamment par Izemmouren et Guettala (2014).

1.5.3 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique vise à améliorer la brique de terre en modifiant sa densité naturelle. Ce processus, connu sous le nom de compactage, permet de réduire la porosité du matériau en resserrant ses particules. Cette compression entraîne une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Dans le cadre de la production de blocs de terre comprimée, la stabilisation mécanique est réalisée à l'aide d'une presse. L'action de ces presses consiste à resserrer les grains, comme décrit par MEUKAN (2004).

1.5.4 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété.

1.5.5 Stabilisation au ciment :

Dès 1915, les États-Unis ont été témoins des premières expérimentations de stabilisation au ciment dans le secteur des routes. Parallèlement, en Allemagne, à partir des années 1920, la stabilisation au ciment a commencé à être utilisée dans la construction de bâtiments. Aux États-Unis, à partir de 1935, l'utilisation du sol cimenté s'est progressivement étendue, notamment dans la construction de routes et de pistes d'aérodrome. Depuis lors, la stabilisation au ciment est devenue une pratique répandue dans le monde entier, utilisée à la fois dans les travaux publics et dans le domaine de la construction (Wetshondo, 2012 ; Laibi, 2017).

Le ciment a un effet limité sur les particules fines d'argile, ce qui le rend plus adapté aux sols peu argileux. Le dosage varie de 5 à 12 % en fonction du type de sol, pour obtenir des résultats satisfaisants en termes de stabilisation. Bien que la stabilisation au ciment améliore la résistance et la durabilité du sol, elle demeure coûteuse et contribue à la pollution. De plus, les sols stabilisés au ciment ne sont généralement pas réutilisables (Izemmouren, (2016)).

Des études telles que celle de Walker (1995), ont démontré une nette augmentation de la résistance à la compression du sol avec l'ajout de ciment. De même, Bahar et al. (2004) ont observé que la résistance à la compression et à la traction par fendage augmente proportionnellement à la teneur en ciment.

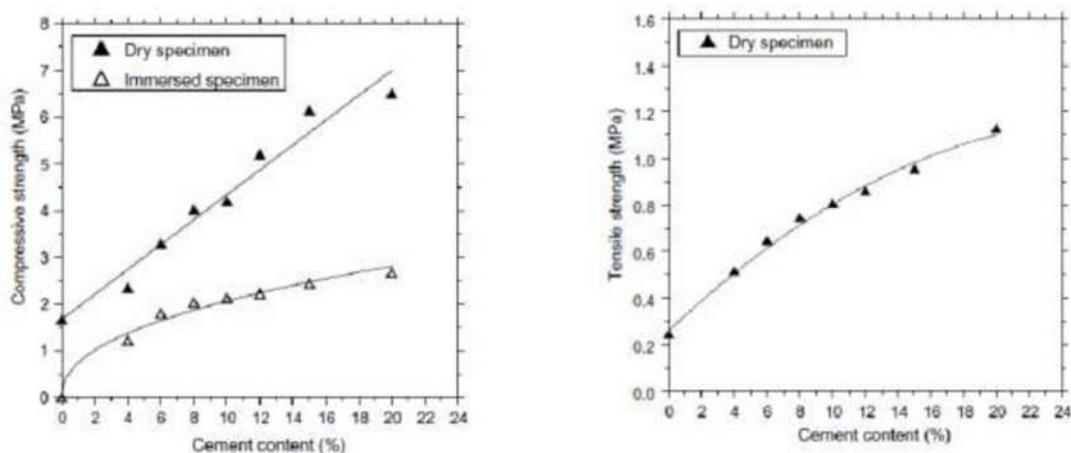


Figure 1.6: Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment (Bahar, 2004).

Le principal effet de la stabilisation au ciment est de rendre le matériau moins sensible à l'eau. Un traitement approprié au ciment peut conduire à des résultats très satisfaisants. Une étude menée par Venkatrama et al. (Venkatrama, 2005) a démontré que la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre stabilisée au ciment augmentent avec l'augmentation de la teneur en ciment. En doublant la teneur en ciment, la résistance à la compression humide a été multipliée par 2,3.

1.5.6 Stabilisation par la chaux

Le calcaire est une roche d'origine naturelle contenant des concentrations élevées de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme "chaux" englobe les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique. Ces trois catégories principales de chaux (chaux aérienne, chaux naturelle et chaux hydraulique) se distinguent par la composition de leur matière première, le calcaire, ainsi que par leur capacité à durcir.

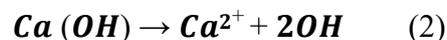
- La stabilisation des sols argileux par la chaux est régulée par :

a) Hydratation et ionisation :

Lorsque la chaux vive (CaO) est mélangée au sol, son hydratation se manifeste par la réaction suivante :



Lorsque les conditions requises sont réunies, à savoir un pH de 12,4 et une concentration en calcium de la solution de 22 mol/L, cette réaction devient exothermique et aboutit à la formation de la portlandite Ca(OH)_2 . Par la suite, l'hydroxyde de calcium peut se dissoudre selon la réaction d'ionisation suivante :



Plus la quantité de chaux est importante, plus l'augmentation du pH est significative, comme illustré dans la figure 1.7.

Le pH peut atteindre une valeur maximale de 12,6, se rapprochant ainsi du pH d'une solution aqueuse saturée en chaux. (Marrot, 2010).

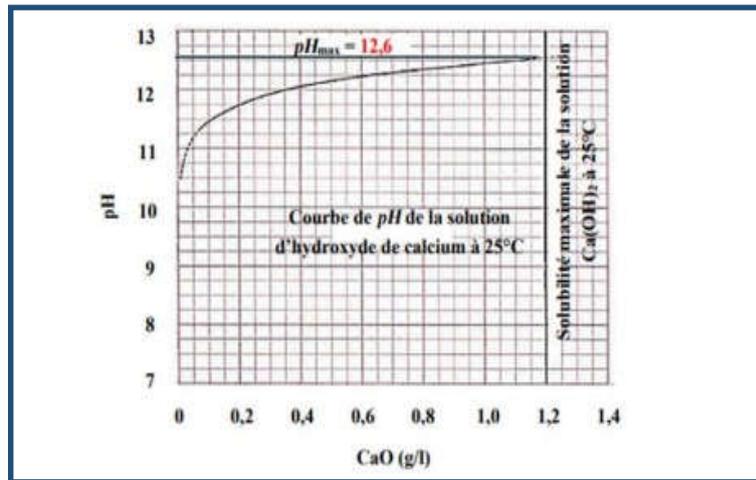


Figure 1.7 : Variation du PH d'une solution de Ca (OH₂) dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutée (Marrot, 2010)

b) Capacité d'échange cationique :

Les processus de réaction de l'échange cationique et de floculation ont pour effet d'accroître la plasticité, la maniabilité, la résistance et la capacité de déformation du sol stabilisé. En règle générale, cette étape de floculation engendre des sols qui sont plus faciles à mélanger, à manipuler et à compacter. Ces réactions immédiates jouent un rôle prépondérant dans la diminution du retrait et du gonflement du sol.

Selon Holtz (1969) et Bensalem Ahmed (2010), l'incorporation de 3% à 5% de chaux par poids sec de sol est préconisée pour obtenir des capacités de charge significatives. Il est généralement admis que ces réactions d'échange cationique sont réversibles.

Selon Eades et Grimm (1960), pratiquement tous les sols fins peuvent être traités à la chaux. En présence d'eau, des réactions d'échange cationique et de floculation-agglomération se produisent. Ces réactions entraînent des modifications dans les propriétés et la structure du sol par le biais de l'échange cationique et de la floculation, ce qui se traduit par des augmentations immédiates de la plasticité, de la maniabilité, de la résistance et de la déformation du sol. Selon M. Afes et G. Didier (2000) (figure 1.8), les résultats obtenus pour différents échantillons d'argile naturelle et traitée avec 3 et 6% de chaux montrent que la capacité d'échange cationique (CEC) diminue légèrement à mesure que le pourcentage de chaux ajoutée augmente.

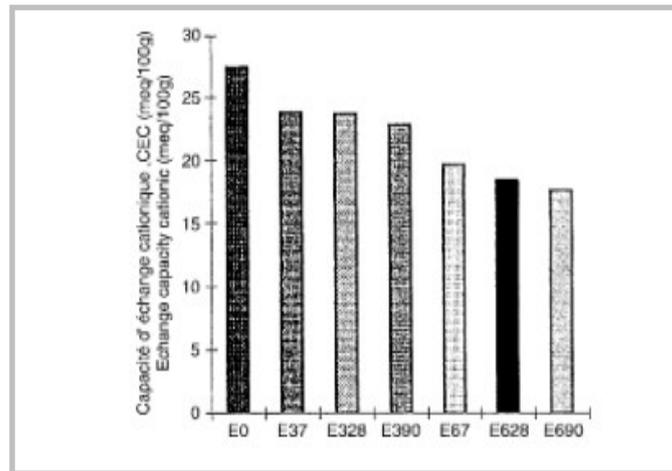


Figure 1.8. Evolution de la Capacité d'Echange Cationique en Fonction de Pourcentage de Chaux. (M. Afes, G. Didier, 2000).

c) Réaction pouzzolanique :

À des valeurs de pH élevées, attribuables à l'hydratation de la chaux vive (Formule 1) et à l'ionisation de l'hydroxyde de calcium (Formule 2), les silicates et les aluminates présents dans le sol peuvent subir une dissolution, comme indiqué sur leur diagramme de solubilité (Figure 1.9), selon Little (1987).

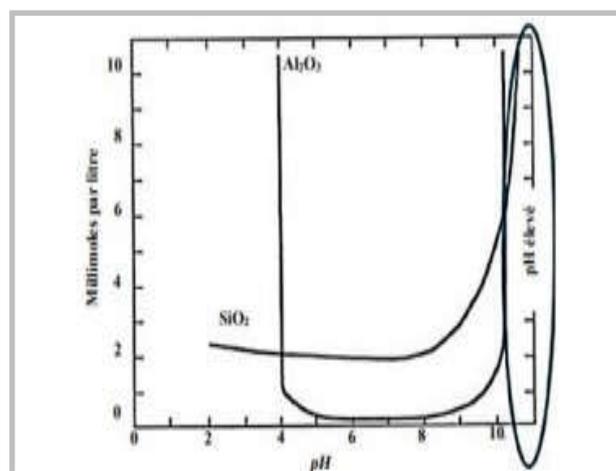


Figure 1.9: Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH Little, (1987).

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol, entraînant la libération des cations Ca^{2+} et des anions (OH^-), favorise la saturation de la solution en calcium et entraîne une augmentation du pH.

En environnement alcalin et en présence d'une saturation en ions calcium, les argiles subissent une réaction d'attaque libérant de l'alumine et de la silice. Ces composés réagissent ensuite avec le calcium présent dans le sol ainsi qu'avec les hydroxydes issus de la chaux en présence d'eau. Cette réaction engendre la formation d'hydrates calciques similaires à ceux présents dans les ciments, tels que les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminates de calcium hydratés (CAH) (voir figure 1.10), et les aluminosilicates de calcium hydratés (CASH). Cette explication est basée sur les recherches d'ATTIMA et al. (2014).

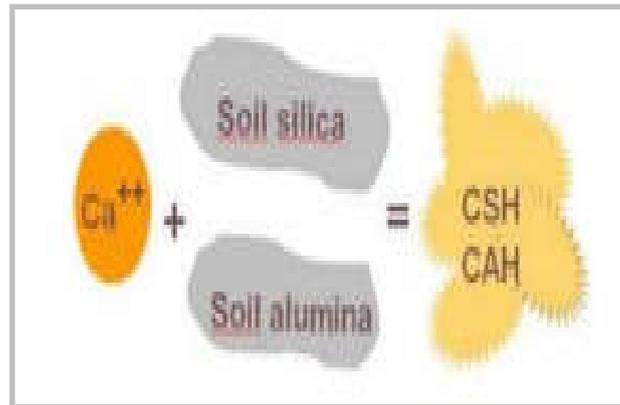


Figure 1.10 : Réaction pouzzolanique. Marrot, (2010).

1.6 Effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des matériaux à base de terre

De nombreuses études et recherches expérimentales ont examiné l'impact des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation dépend du type de sol, du dosage et de la combinaison des stabilisants, ainsi que du temps de cure.

Almeasar et al. (2021), ont étudié l'impact de l'incorporation de cendres de palmier dattier (DPA) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers de terre stabilisés à la chaux. Ils ont préparé des échantillons de mortier de terre contenant de la chaux, en y ajoutant diverses proportions de DPA (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %) par rapport au poids de la chaux. Les résultats de cette étude sont les suivants :

La figure 1.11, illustre la variation de la masse volumique apparente du mortier de terre en fonction de l'ajout de DPA. Les résultats indiquent que la masse volumique apparente varie entre 1505 et 1612 kg/m³. Une augmentation de la teneur en DPA jusqu'à 6 % entraîne une hausse de la densité apparente sèche.

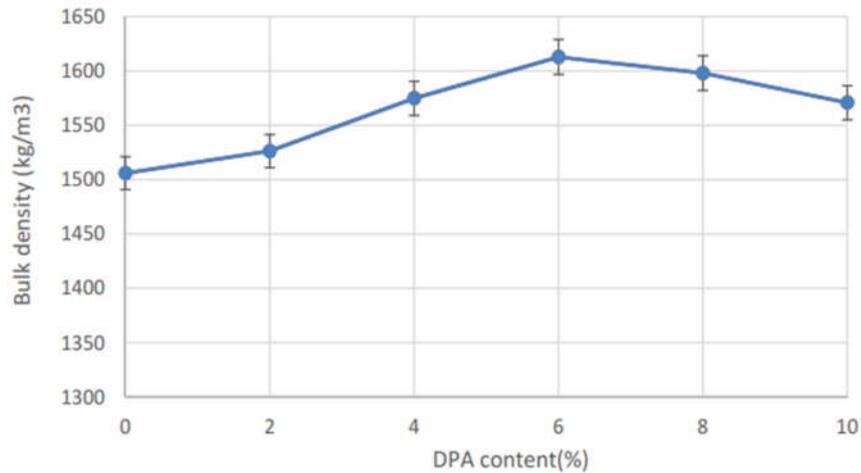


Figure 1.11 : Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA. Almeasar et al. (2021).

Les résultats de la résistance à la compression sèche (DCS) et humide (WCS) sont illustrés dans la figure 1.12. L'ajout de 6 % de DPA a entraîné une amélioration de la DCS et de la WCS des échantillons de 21,7 % et 16,5 %, respectivement, par rapport aux échantillons contenant uniquement de la chaux.

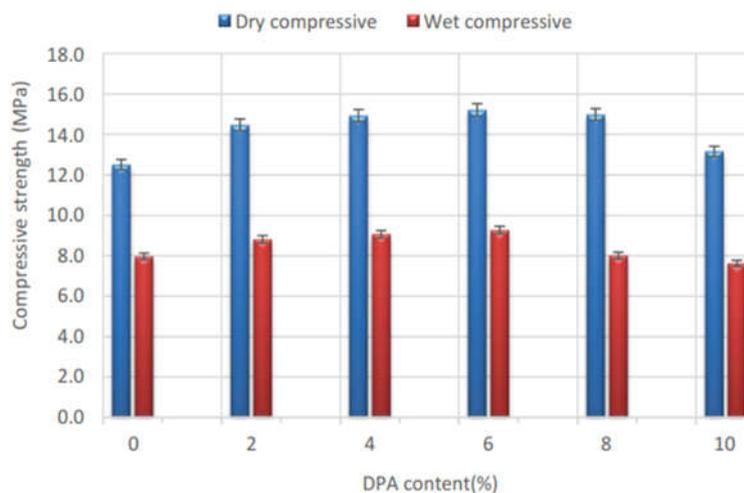


Figure 1.12. La résistance à la compression sèche (DCS) et humide (WCS) , Almeasar et al. (2021).

Izemmouren (2016) a examiné l'effet de la teneur en pouzzolane naturelle (NP) à différents dosages de chaux sur la résistance à la compression sèche des briques de terre comprimée (Figure 1.13). Les résultats indiquent que la résistance à la compression sèche augmente avec la teneur en NP jusqu'à 30 %. Au-delà de cette concentration, la résistance diminue pour les divers dosages de chaux. L'augmentation de la résistance à la compression sèche des briques

de terre comprimée est d'environ 2,94 %, 6 %, et 8,22 % pour des dosages de chaux de 6 %, 8 %, et 10 %, respectivement, dans la plage de 0 à 30 % de NP.

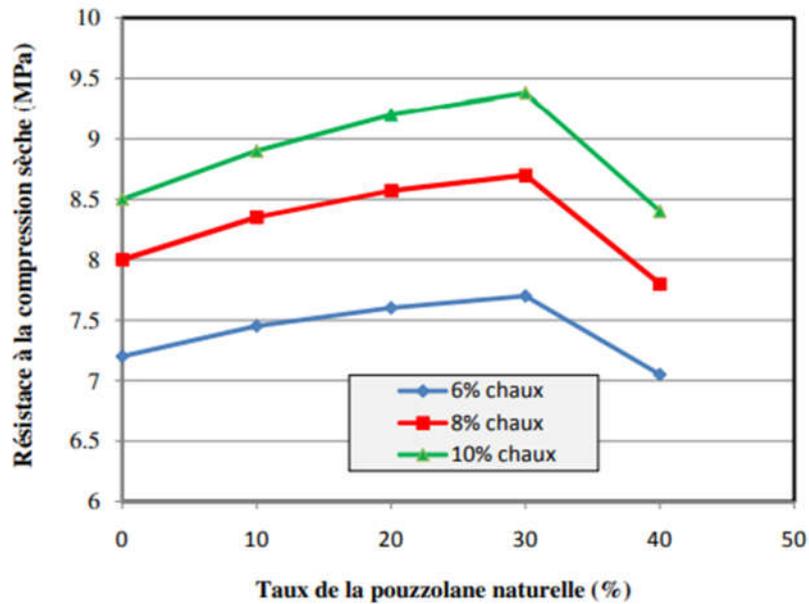


Figure 1.13 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (Izemouren, 2016).

Une observation similaire est faite quant à l'impact de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction des briques. Les résultats démontrent que l'incorporation de 30 % de pouzzolane naturelle conduit à une amélioration significative des résistances à la traction, indépendamment des différents teneurs en chaux (Figure 1.14).

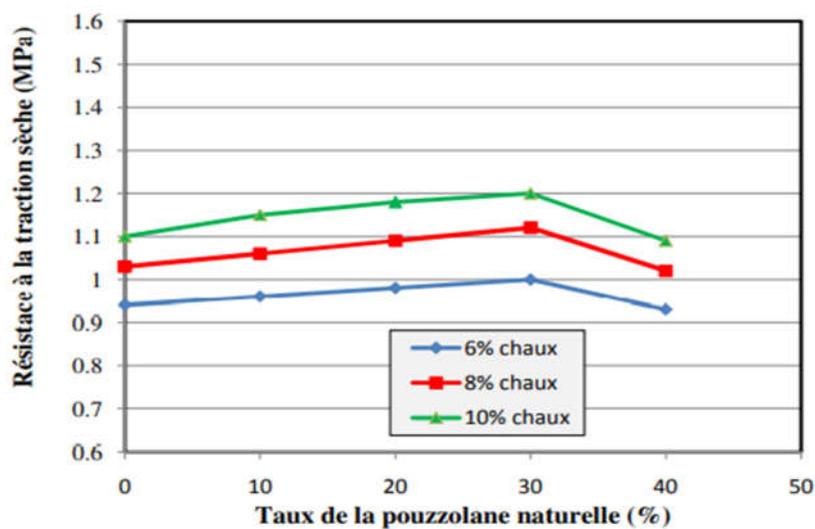


Figure 1.14 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche (Izemouren, 2016).

1.7 Effet du dosage des ajouts sur la durabilité :

Izemmouren (2016) a réalisé une étude sur l'impact du dosage des ajouts minéraux (pouzzolane (PN), poudre de verre (PV) et laitier (LG)) au fil du temps sur la durabilité des briques de terre comprimée, stabilisées avec différentes quantités de chaux, et compactées à une pression de 10 MPa. Ces briques ont été entreposées au laboratoire à température ambiante pendant une période allant jusqu'à 28 jours. Les résultats obtenus indiquent que :

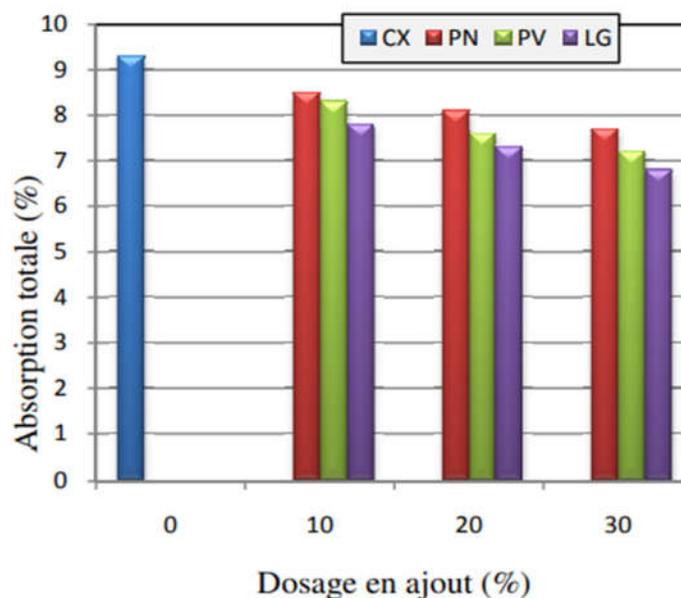


Figure 1.14 : influence du dosage des ajouts sur l'absorption totale. Izemmouren (2016).

L'absorption totale varie en fonction du dosage des ajouts à différents stades de maturation. On constate une baisse de l'absorption totale à mesure que le dosage des ajouts augmente pour différentes périodes de durcissement. En termes de pourcentage, cette diminution représente respectivement 15,28 %, 32,25 % et 38,31 % pour les dosages de 0 % à 30 % de NP, PV et LG à l'âge de 28 jours.

En plus des résultats mentionnés, Izemmouren (2016) a également analysé l'absorption capillaire en fonction du dosage des ajouts. Les conclusions indiquent que tous les ajouts ont un impact positif sur l'absorption capillaire. La réduction de cette absorption dépend à la fois de la nature et du dosage des ajouts. Notamment, une légère diminution de l'absorption est observée à 28 jours, avec une réduction d'environ 10,10 % pour un dosage de 30 % de NP.

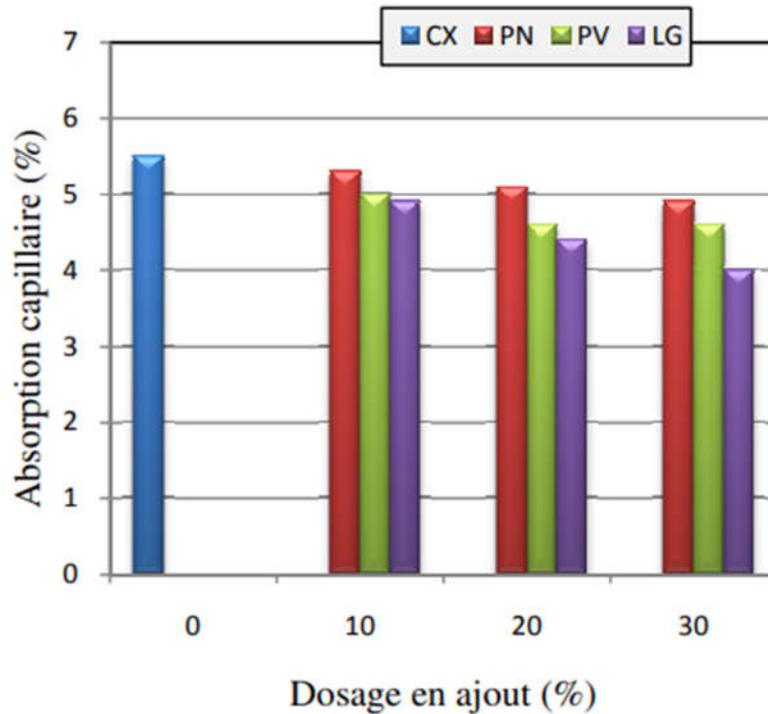


Figure 1.15 : influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire. Izemouren (2016).

Almeasar et al. (2021), ont étudié l'effet de l'ajout de cendre de palmier dattier DPA sur les propriétés physiques et mécaniques et comportement hygroscopique des mortiers de terre. Ils ont préparé des échantillons de mortier de terre stabilisé à la chaux, additionné de DPA à différentes dosages (0, 2, 4, 6, 8 et 10%) par rapport au poids de la chaux. Les résultats montrent que :

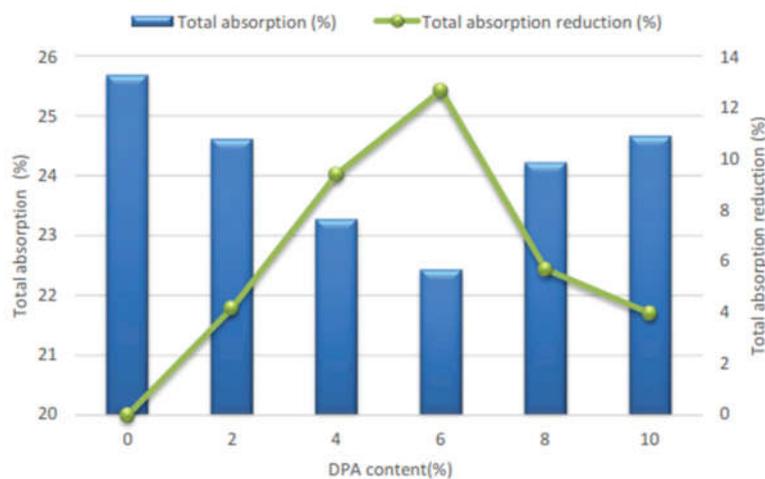


Figure 1.16 : Absorption totale de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA, après test d'ébullition. Almeasar et al. (2021).

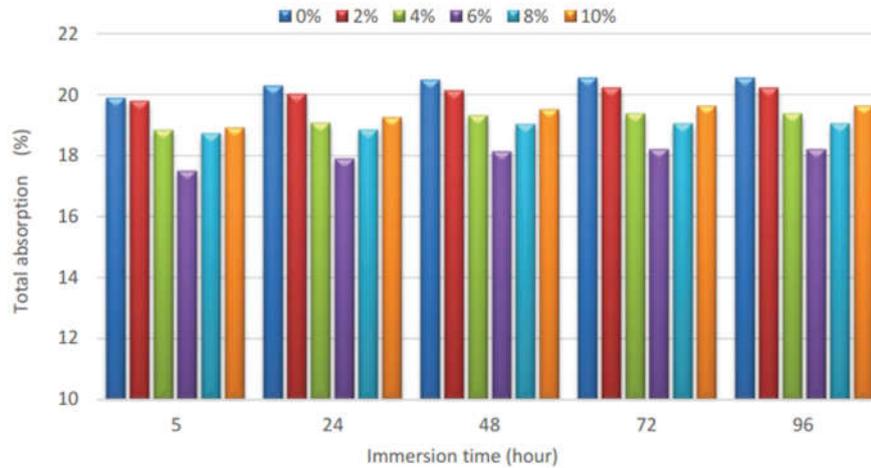


Figure 1.17 : Absorption totale d'EMS en fonction de la teneur en DPA, après immersion dans l'eau. Almeasar et al. (2021)

L'étude présentée expose les résultats de l'immersion d'échantillons dans de l'eau ordinaire et bouillante, ainsi que l'influence de l'ajout de DPA sur l'absorption d'eau. Lors de l'immersion dans l'eau ordinaire, il a été observé une augmentation de l'absorption d'eau au fil du temps, atteignant un maximum après 5 heures avant de se stabiliser. En comparaison, l'immersion dans l'eau bouillante a montré un taux d'absorption plus élevé, conduisant à une saturation complète des échantillons. L'incorporation de DPA a entraîné une réduction de l'absorption totale d'eau par rapport aux échantillons sans DPA.

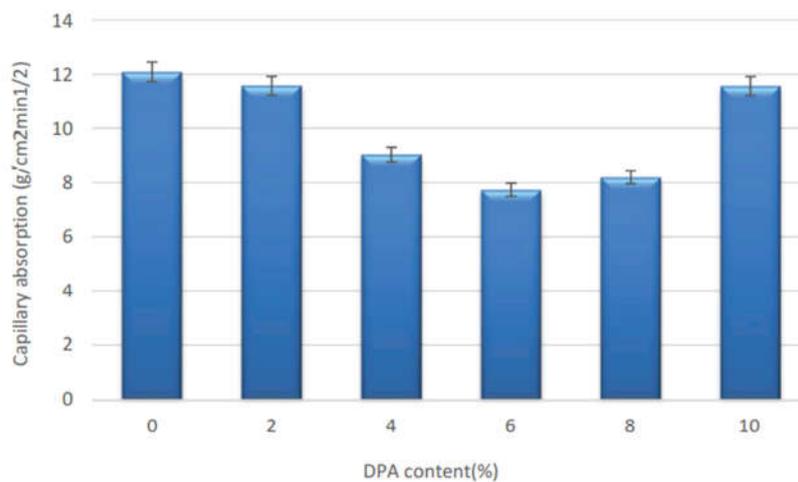


Figure 1.18 : Absorption capillaire de l'EMS en fonction de la teneur en DPA. Almeasar et al. (2021).

En outre, les chercheurs ont également analysé les résultats de l'absorption capillaire en fonction du DPA. Les données ont révélé que le niveau le plus bas d'absorption était enregistré à 6 % de DPA, représentant une diminution de 36 % par rapport à l'absence de DPA (0 %). L'adjonction de DPA avec la chaux a permis de remplir les pores du sol et de les cimenter, ce qui a réduit l'absorption capillaire.

Le tableau 1.1 propose une synthèse des recherches antérieures portant sur l'utilisation de différents additifs minéraux dans la fabrication de matériaux à base de terre. Les conclusions soulignent que ces additifs minéraux sont perçus comme des matériaux alternatifs respectueux de l'environnement, employés dans la production de ces matériaux à base de terre.

Tableau 1.1 : Travaux antérieurs sur l'utilisation des différentes additives minérales dans la production des matériaux à base de terre.

Auteurs	Eprouvettes	Dimension	Liants	Ajouts	Résultats (Durabilité)
Sandeep Singh et al, 2022	Blocs de terre comprimée		Ciment : 5%.	cendres de base de sucre et de paille de blé : 4, 6, 8 et 10% .	L'élévation de la quantité supplémentaire tout en maintenant une proportion fixe de ciment entraîne une diminution de la valeur d'absorption d'eau des blocs. Le pourcentage de réduction de l'absorption d'eau est influencé par l'introduction de cendres de base de sucre et de paille de blé.
Elahi et al, 2020	Blocs de terre comprimée		Ciment : 0, 3, 5,7 et 10%	Cendres volante : 10, 20 et 30%	À mesure que la proportion de ciment et de cendre volante augmente, l'absorption d'eau des blocs diminue. De plus, une augmentation de la quantité de ciment et de cendre volante entraîne une réduction de la perte de masse cumulative lors du test de mouillage-séchage.
Izemmouren et al. 2015	Blocs de terre comprimée	(10× 10 ×5) cm ³	La chaux : 6, 8 et 10%.	Pouzzolane naturelle : 10, 20, 30et 40%	L'incorporation de 30% de pouzzolane naturelle avec la chaux entraîne une diminution de l'absorption capillaire, de l'absorption totale, de la résistance à l'abrasion, ainsi que de la perte en masse lors du test de mouillage-séchage.

K.S.almeasar et al , 2021	Blocs de terre comprimée	(4× 4 ×16) cm ³	La chaux	la cendre de palmier dattier : 0, 2, 4,6, 8 et 10%.	L'inclusion de DPA a favorisé la réduction des vides et le renforcement de la liaison entre les particules, ce qui a conduit à une amélioration des caractéristiques de la matrice. Cela s'est traduit par une diminution de 8 % de la porosité et une augmentation de la densité apparente sèche, de l'absorption d'eau capillaire, ainsi que du gonflement.
Aninda and M.S. Islam , 2023	Blocs de terre comprimée		Ciment : 4, 6, et 8% .	Déchets de béton en poudre :0,5, 10,15,et 20%.	L'augmentation de la teneur en ciment et de déchets de béton en poudre entraîne une diminution de l'absorption d'eau de la masse. De plus, la résistance à l'humidité diminue pour tous les échantillons par rapport à la résistance à la compression sèche.
O. G. aluko et al , 2015	Blocs de terre comprimée		Ciment	Poudre de verre usagé.	L'intégration de la poudre de verre dans la masse stabilisée comprimée diminue sa résistance. Malgré le fait que les blocs de terre comprimée stabilisée sans ajout de déchets de verre présentent la résistance la plus élevée,

1.8 Sable de dune finement broyé

Malgré l'abondance de sable de dune dans le sud de notre pays, ce matériau reste largement méconnu. Sa quantité est estimée en milliards de mètres cubes. Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté comme matériau de construction : il présente un indice de propreté élevé et est dépourvu de matières organiques ainsi que d'autres substances indésirables telles que les sulfates et les carbonates. Composé de minuscules grains de quartz, le sable de dune est principalement constitué de dioxyde de silicium (SiO₂), également connu sous le nom de silice, l'un des minéraux les plus répandus sur Terre. L'analyse par diffractométrie aux rayons X révèle que le sable de dune finement broyé est composé de SiO₂ cristallin de type "low-quartz", contrairement à la fumée de silice qui présente une structure amorphe (k. arroudj k. et m n. oudjit, 2002) (voir figure 1.19). L'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune broyé

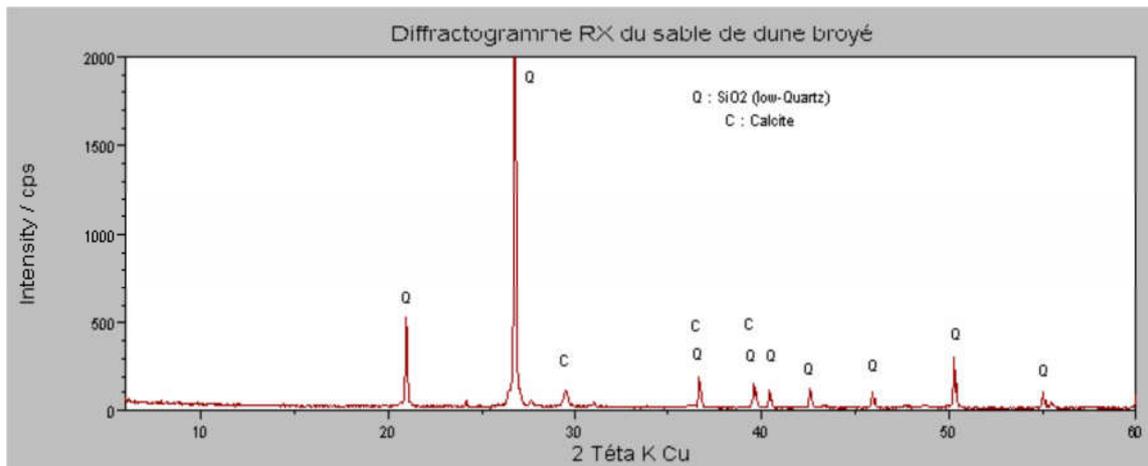


Figure 1.19 Diffractogramme X du sable de dune broyé (k. arroudj k. et m n. oudjit, 2002) .

1.9 Conclusion

Ce chapitre commence par examiner le contexte général de la construction en terre, en explorant les divers processus physico-chimiques qui résultent de l'ajout de la chaux au sol. Ensuite, les études antérieures ont bien analysé l'effet du ciment ou la chaux et de ses combinaisons avec des ajouts minéraux sur la durabilité des matériaux à base de terre. Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de sable de dune broyé stabilisée à la chaux sur la durabilité des mortiers de terre.

Chapitre 02

Matériaux et méthode expérimentale

2.1 Introduction

Ce chapitre s'ouvre sur une présentation des caractéristiques des matériaux employés, suivie de l'exposition de toutes les formulations à étudier, ainsi que des procédures d'essai associées. Ensuite, nous détaillons les différentes méthodes expérimentales employées pour évaluer les résistances mécaniques et la durabilité du mortier de terre.

2.2 Matériaux utilisés

Dans ce travail, nous avons cherché à valoriser le sable de dune comme ajout avec le ciment pour stabiliser le mortier de terre.

2.2.1 Sol

2.2.1.1 Origine de sol

Le sol utilisé dans notre étude est originaire de la région de Biskra. Les critères de sélection des sites de prélèvement sont leur disponibilité et leur abondance dans la région.



Figure 2.1: Le sol.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. (Houben, 1994). Pour cela nous avons été amenés à réaliser les essais suivants :

a) **Densité :**

La masse volumique de l'éprouvette traduit dans une large mesure ses propriétés techniques. Elle est évaluée à partir de l'essai au pycnomètre selon la norme NF P94-054.

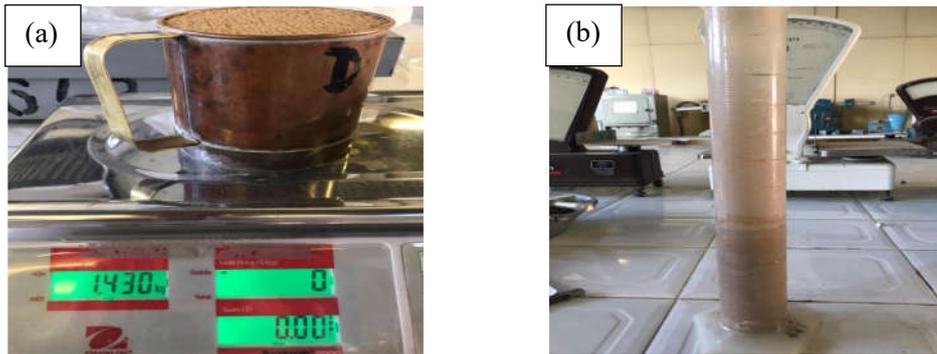


Figure 2.2 : Mesure de la masse volumique (a) Apparente, (b) Absolue.

Le Tableau 2.1 montre les masses volumiques apparentes et absolues du sol étudié.

Tableau-2.1 : Les masses volumiques du sol.

	Masse volumique apparente ρ (g/cm^3)	Masse volumique absolue γ_s (g/cm^3)
Sol	1.12	2.37

b) Limites d'Atterberg

Les teneurs en eau pondérales sont des caractéristiques spécifiques du sol qui correspondent à ses réactions particulières face aux variations de contenu en eau. Elles sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 micromètres. Les limites habituellement utilisées comprennent :

- Limite de liquidité notée WL : limite de liquidité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique)
- Limite de plasticité WP : limite de plasticité (teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide).
- Indice de plasticité noté IP : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et plasticité :

$$IP = WL - WP \quad (2.1)$$



Figure.2.3 : Détermination de WL et WP.

Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Limites d'Atterberg de sol.

Limites d'Atterberg du sol		
Limite de liquidité (WL%)	Limite de plasticité (WP %)	Indice de plasticité (IP %)
31	13	18

La classification des sols fins repose sur les critères de plasticité définis par les limites d'Atterberg. Ces critères sont détaillés dans le diagramme de plasticité présenté ci-après (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 en ordonnée, représentant l'indice de plasticité.

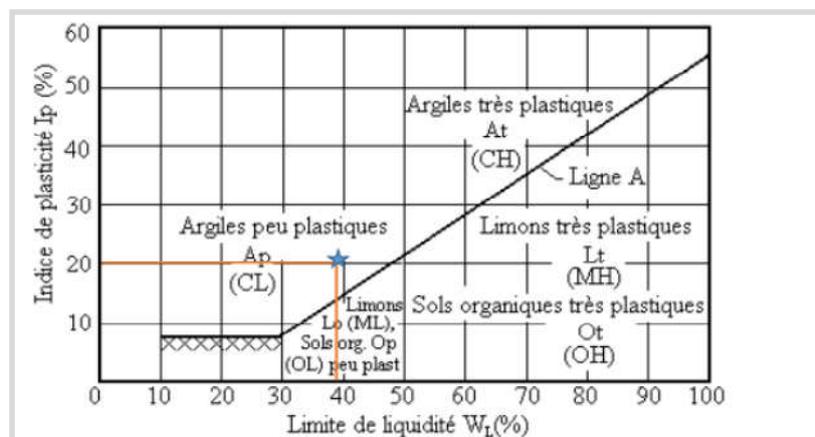


Figure 2.4 : Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande.

Suivant le diagramme nous pouvons dire que le sol est **une argile peu plastique**.

c) Composition granulaire :

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais :

- L'analyse granulométrique selon les normes NF P18-560.
- La sédimentométrie selon les normes NF P 94-057 .
-

d) L'analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057)

Cet essai vise à établir la distribution pondérale des grains du sol en fonction de leur taille. Les particules dont les dimensions dépassent 80 micromètres sont soumises à un tamisage, tandis que pour les particules plus fines (inférieures à 80 micromètres), l'essai de sédimentométrie est pratiqué. Les résultats sont illustrés dans **la figure 2.5**.

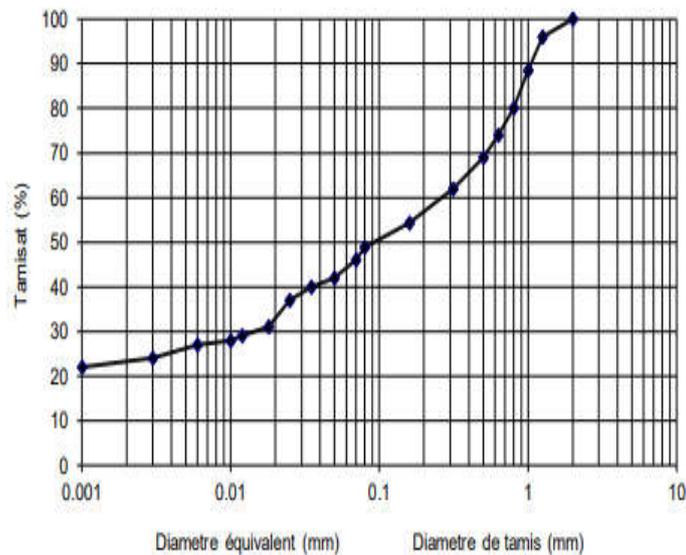


Figure.2.5 : Granulométrie du sol.

e) Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est une méthode utilisée pour évaluer la propreté d'un sol ainsi que pour identifier les différents types d'argiles qu'il renferme (voir Figure 2.6). Le bleu de méthylène est principalement absorbé par les argiles du type montmorillonite, qui sont des argiles expansives, ainsi que par les matières organiques. En revanche, les autres types d'argiles, tels que les illites et les kaolinites, montrent une sensibilité moindre au bleu de méthylène. Cet essai a été réalisé conformément à la norme française NF P18-592, et les valeurs de bleu de méthylène ont été rapportées dans le Tableau 2.3.

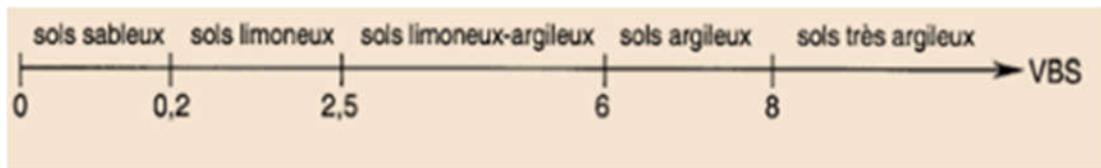


Figure 2.6. Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).

Les résultats obtenus son présentée dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Valeur de Bleu méthylène.

	Valeur de bleu V_{BS}	Classification de sol
Sol	4.2	Sol limoneux argileux

2.2.2 Sable concassé

2.2.2.1 Caractéristique physique du sable

Le sable utilisé dans tous les mélanges est du sable concassé (0/3), extrait des carrières situées dans la région de Biskra, en Algérie. Il a principalement été employé pour effectuer des corrections granulaires du sol.

Tableau 2.4 : Masses Volumiques du sable concassé.

	La masse volumique apparente ρ (g/cm ³)	La masse volumique absolue γ_s (g/cm ³)
Sable	1.57	2.6

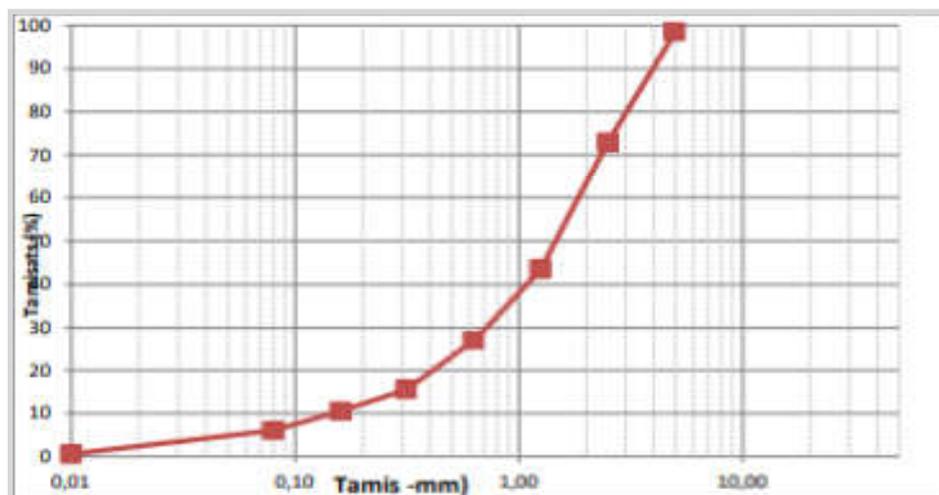


Figure 2.7 : Analyse granulométrique du sable concassé.

2.2.3 La chaux :

La chaux employée dans cette étude provient de la ville de Hassasna, située dans l'unité Erco de la wilaya de Saida, en Algérie. Ses principales caractéristiques sont répertoriées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive

(Izemmouren, 2015).

Désignation	Caractéristiques physiques (g/cm^3)		Analyse chimique (% massique)				
	Masse volumique absolue	Masse volumique Apparente	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Valeurs	1.89	0.608	82.77	10.63	3.27	1.35	1.88

Conduite de l'essai

2.3.1 Matériel spécifique

Les éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) utilisées pour la réalisation des différents essais prévus par notre programme de recherche sont démoulées en ouvrant le moule prismatique, ce qui se fait par le dévissage des boulons.



Figure 2.8 : Moule prismatique.

2.3.2 Composition des mélanges

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact du sable de dune broyé combinée à la chaux sur la durabilité du mortier de terre. Dans ce contexte, les pourcentages de sol et de sable ont été maintenus constants, et le pourcentage de chaux et de différent pourcentage de sable de dune broyé ont été variés en fonction du poids du mélange sec. Les proportions des mélanges expérimentaux sont présentées dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Sol (%)	Sable (%)	La chaux (%)	Sable de dune (%)
Par rapport au mélange sec (sol+sable)		Par rapport au poids du mélange sec global	
70	30	10	0
70	30	10	10
70	30	10	20
70	30	10	30

2.3.3 Préparation des mélanges

Pour la première fois, le sol et le sable ont été séchés pendant 24 heures à 60 °C avant la correction granulométrique. Le mélange des matériaux et le compactage des spécimens ont été réalisés manuellement, en versant le mélange dans les moules à la main. Bien que la production manuelle des mélanges et des spécimens introduise une variabilité épistémique pouvant être réduite par l'utilisation de procédés mécaniques, ces procédés manuels sont couramment utilisés dans la plupart des projets de construction en terre dans la pratique réelle.



Figure 2.9 : Préparation de la pâte de terre dans les moules.

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 ± 2 °C pendant 24 heures avant d'être soumises au processus de cure. Ensuite, toutes les éprouvettes étudiées sont placées dans une étuve à 65 ± 2 °C pour une période de 10 jours. Après avoir retiré le film plastique, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve jusqu'à ce qu'une masse constante soit atteinte (Figure 2.10).



Figure 2.10 : Conservation des blocs au laboratoire sur l'étuve .

1.3 Réalisation des essais

➤ Propriétés mécaniques

2.4.1 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été évaluées à travers des essais de compression et de traction par flexion.

a) Essai de compression simple (NF XP- P 13 901) :

Pour nos essais, la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes prismatique (4x4x16 cm³) à l'aide d'une presse. La résistance en compression des adobes a été déterminée en testant trois blocs pour chaque essai. La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$Re = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

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

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en (mm²).



Figure 2.11. Essai de compression.

b) Essai de traction par flexion (NF EN 12390-5) :

Cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm. Pour déterminer la résistance à la traction par flexion, on emploiera la méthode de flexion à trois points.

La résistance en flexion (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$RT = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d1 \times d2} \quad (2.2)$$

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 la distance entre les appuis, en millimètre.



Figure 2.12 : Essai de flexion.

2.5 Propriétés physique

2.5.1 Mesure de la masse volumique (NF P94-054) :

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

$$\rho = m / v \quad (2.3)$$

M : la masse d'échantillon en (g).

V : volume d'éprouvette en (cm³).

2.6 Essai de la durabilité

2.6.1 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 2.10). 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 :

$$C_b = \frac{100 \times (M_h - M_d)}{s \times \sqrt{t}} \quad (2.4)$$

Avec :

M_h : la masse de l'échantillon à l'état humide.

M_d : 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 2.13: Essai d'absorption par capillaire.

2.6.2 Absorption totale d'eau

Cet essai consiste à immerger le bloc dans un bac d'eau pendant des durées variées (1, 2, 3 et 4 jours), puis à mesurer l'augmentation de son poids (P_h) par rapport à son poids à l'état sec (P_s) (voir figure 2.14).

L'indice ($A \%$) de l'absorption totale d'eau de chaque bloc est conventionnellement exprimé par la formule suivante :

$$A \% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (2.5)$$

Où :

P_h : poids de l'échantillon à l'état humide .

P_s : poids de l'échantillon à l'état sec.

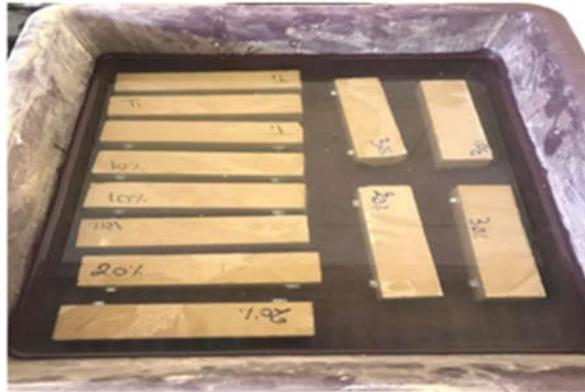


Figure 2.14: Essai d'absorption totale.

2.6.3 Gonflement

La mesure du gonflement des briques d'adobe se fait selon la procédure suivante (norme XP 13-901) :

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 2.11).
4. Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 minutes, puis mesurer la distance entre les plots : (L_1).

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

$$\Delta L_g \text{ (mm /m)} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (2.6)$$

Avec :

L_0 : la distance avant immersion .

L_1 : la distance après immersion.

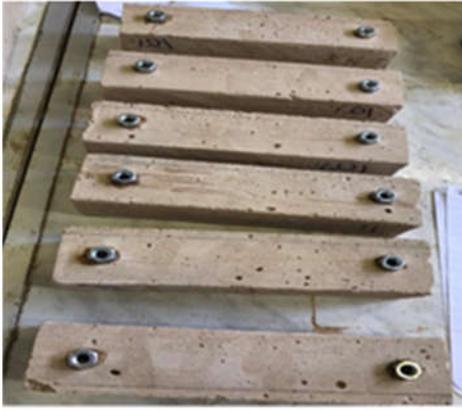


Figure 2.15: Essai de gonflement.

2.6.4 Résistances à l'abrasion

Après avoir conservé la brique jusqu'à une masse constante et l'avoir laissée stabiliser pendant au moins 24 heures, la peser pour obtenir sa masse initiale (m_0) (en grammes).

1. Poser la brique sur un plan horizontal pour le brossage. Placer la brosse métallique sur la brique, puis brosser la surface de la brique en effectuant un aller-retour par seconde pendant une minute (soit 60 aller-retour) sans appliquer de force verticale sur la brosse au cours de la manipulation.
2. À la fin du brossage, nettoyer les éléments détachés de la brique, puis la peser à nouveau pour obtenir sa masse finale (m_1).

De cet essai, on déduit le coefficient d'abrasion (C_a) de la brique, qui représente la perte de matière due au brossage de la surface d'abrasion.

$$C_a \text{ (cm}^2\text{/g)} = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad (2.7)$$

Avec :

C_a : coefficient d'abrasion de la brique.

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

m_0 : masse initiale de la brique avant abrasion en g.

m_1 : Masse de la brique après l'essai d'abrasion en g.



Figure.2.16 : Essai d'abrasion.

2.6.5 Attaque externe au sulfate

Évaluer la résistance et la durabilité du mortier de terre stabilisé à la chaux lorsqu'il est exposé à une attaque externe de sulfate, spécifiquement du sulfate de sodium (Na_2SO_4), Pour étudier l'influence du sulfate de sodium sur les éprouvettes de mortiers de terre, diverses procédures peuvent être utilisées :

1. Préparation des éprouvettes :

- Composition : Mélange de terre, sable et chaux à des proportions définies pour fabriquer des éprouvettes.
- Séchage et durcissement : Les éprouvettes sont laissées à sécher et à durcir pendant 7ours à l'étuve à une température de 65 C°

2. Exposition au sulfate :

- Immersion : Les éprouvettes sont immergées dans une solution de sulfate de sodium à une concentration de 10%
- Durée d'immersion : la période d'immersion est 15 jours pour observer les effets à court terme.

3. Observations et mesures :

- Observations visuelles : Détection de fissures, gonflements et changements de couleur.
- Mesures physiques : Mesure régulière de la masse, du volume et des dimensions des éprouvettes.

- Tests mécaniques : Évaluation de la résistance à la compression

Cet essai est crucial pour assurer la longévité des constructions en mortier de terre stabilisé à la chaux dans des environnements où les sulfates sont présents, offrant ainsi des solutions pour des constructions plus durables et résilientes.



Figure 2.17 : Essai d'attaque externe au sulfate.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a exposé les particularités des diverses matières premières employées dans la composition des blocs d'adobe élaborés dans cette recherche. Ces composantes comprennent la terre ainsi que différents agents stabilisants tels que le sable concassé, la chaux et le sable de dune broyée.

La présentation détaillée de la formulation des mélanges et des méthodes de fabrication des briques dans ce chapitre permettra une analyse approfondie des résultats obtenus et une meilleure compréhension de l'impact des différents paramètres examinés sur les propriétés de l'adobe. Les informations présentées dans ce chapitre sont tirées de la littérature existante ainsi que des essais de caractérisation réalisés au cours de cette étude.

Chapitre 03 :

Résultats et discussion.

3.1 Introduction

Le premier chapitre, qui présente une recherche bibliographique, met en lumière la nécessité de réaliser des essais pour étudier l'impact de l'ajout de sable de dune broyé sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité du mortier de terre. Les différentes phases de l'étude sont structurées comme présenté sur la figure 3.1, qui indique les différents paramètres considérés dans cette étude, ainsi que les essais effectués sur le mortier de terre.

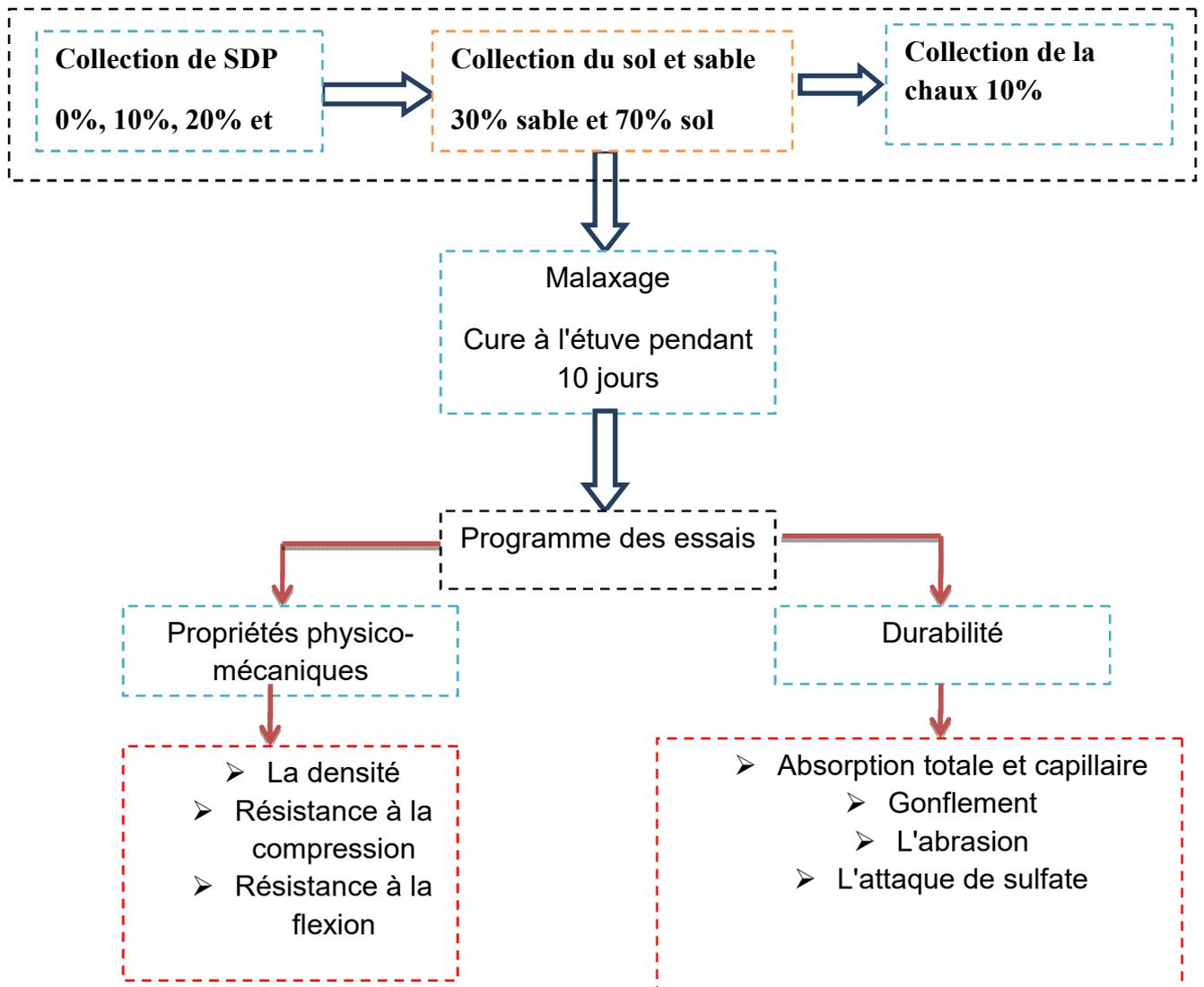


Figure 3.1 Programme expérimental

3.2 Les propriétés physico-mécaniques

3.2.1 La densité :

L'effet de la variation du dosage en sable de dune broyé (SDB) sur la densité des mortiers est présenté sur la figure 3.2. D'après cette figure la densité augmente en fonction du dosage du SDB. La densité maximale est atteinte avec une proportion de 20% de sable de dune broyé qui est de 1640 Kg/m^3 . Il convient également de noter que cette densité a augmenté de 9.67 % par rapport à celle de mortier de référence. Cette augmentation peut être expliquée par la formation des nouveaux hydrates (C-S-H), après l'ajout de SDB au mélange. Ces hydrates à un effet physico-chimique qui remplit les vides entre les granulats du sol.

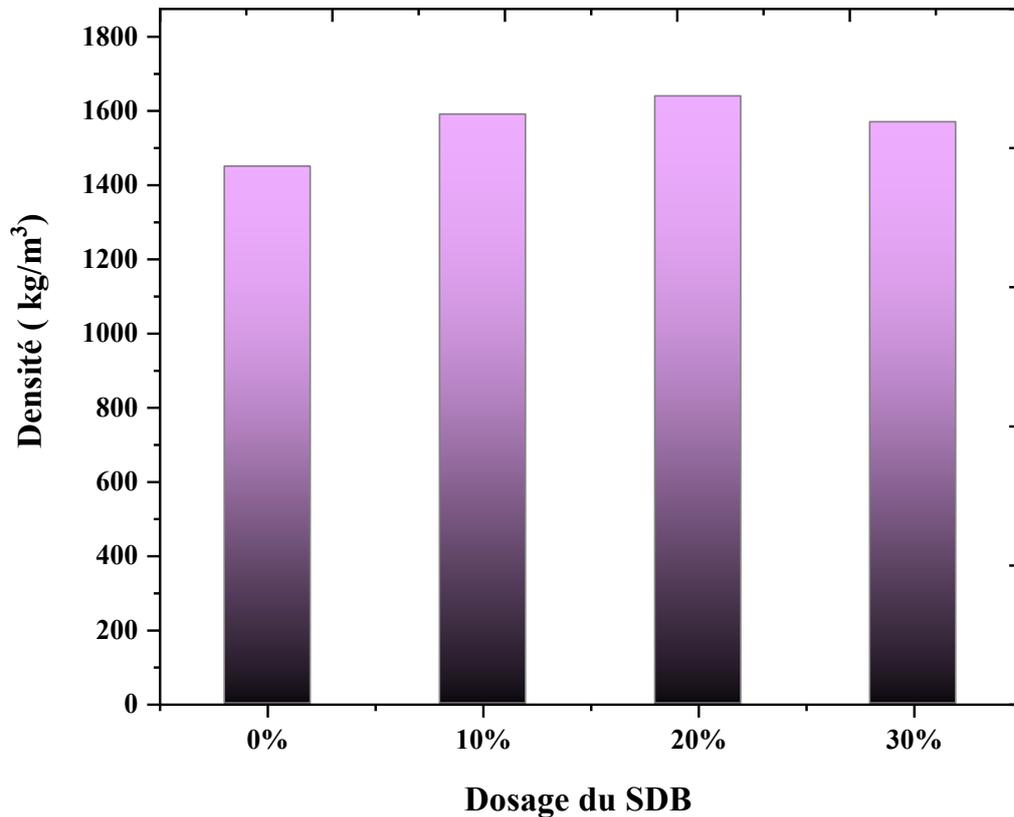


Figure 3.2 Influence du dosage du SDB sur la densité des mortiers de terre

3.2.2 Résistance à la compression :

La figure 3.3 montre clairement que l'ajout de sable de dune broyée améliore la résistance à la compression des mortiers (RC) stabilisés à la chaux, mais seulement jusqu'à un certain point. La résistance maximale est atteinte avec une proportion de 20% de sable de dune broyée. Au-delà de cette proportion, à 30%, la résistance à la compression commence à diminuer, ce qui suggère une saturation de la matrice et une réduction de l'efficacité des liaisons internes. L'augmentation initiale de 10% de sable de dune broyée améliore la compaction et la cohésion des mortiers, ce qui conduit à une augmentation de la résistance à la compression. À 20%, le sable de dune broyée semble optimiser la microstructure du mortier en offrant un équilibre idéal entre la cohésion des particules et la densité de la matrice. Cela permet d'obtenir une résistance à la compression maximale de 9,57 MPa, ce qui représente une augmentation de 18.18% par rapport au mortier de référence. Cependant, une teneur de 30% en sable de dune broyée peut entraîner une saturation de la matrice de mortiers, réduisant l'efficacité des liaisons entre les particules et diminuant ainsi la résistance globale de la structure.

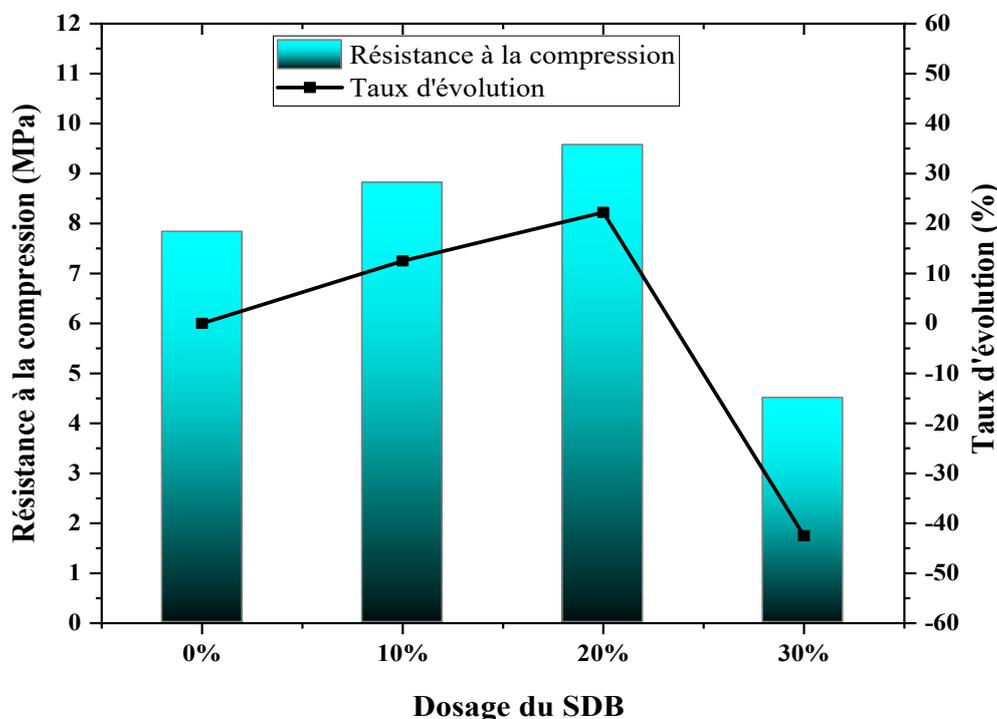


Figure 3.3 Influence du dosage du SDB sur la résistance à la compression des mortiers de terre

3.2.3 Résistance à la flexion :

La figure 3.4 illustre l'évolution de la résistance à la flexion (RF) du mortier de terre en fonction de la proportion de sable de dune broyé (SDB). Les résultats montrent que la RF augmente avec l'ajout de SDB jusqu'à atteindre un maximum à 20%, au-delà duquel la résistance commence à diminuer. Cette augmentation est de l'ordre de 9.17% et 24.45% respectivement pour l'ajout de 10% et 20% de SDB par rapport à l'échantillon de référence. Cette amélioration de la RF est due à la réaction pouzzolanique supplémentaire entre la chaux et le sable de dune broyé qui induit des nouveaux hydrates. En revanche, pour une teneur de 30 % SDB, il y a une chute. Dans ce cas, Le SDB n'aura pas suffisamment de la chaux pour la réaction pouzzolanique et donc, elle restera comme une charge inerte sans contribuer beaucoup au gain de résistance.

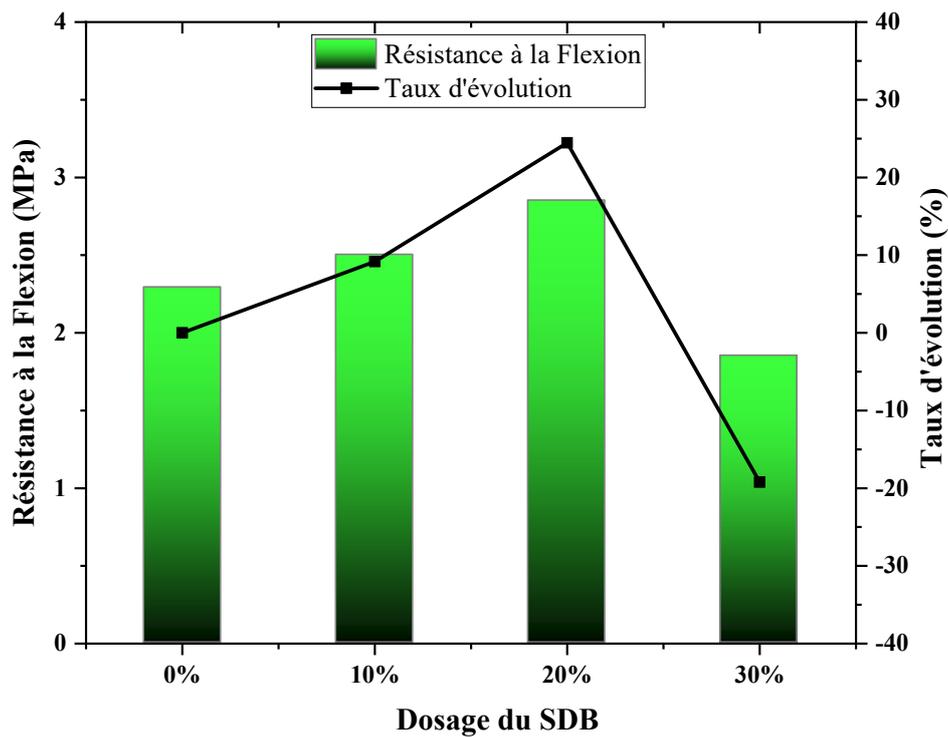


Figure 3.4 Influence du dosage du SDB sur la résistance à la flexion des mortiers de terre

3.3 Essais de la durabilité

3.3.1 Absorption totale et capillaire :

La figure 3.5 illustre la variation de l'absorption totale et capillaire en fonction du dosage de SDB. Les résultats montrent que l'ajout de SDB est susceptible de diminuer l'absorption capillaire du mortier de terre, car une plus grande proportion de sable peut remplir les pores du matériau, réduisant ainsi les voies capillaires par lesquelles l'eau peut pénétrer. , il apparaît que l'ajout optimal de 20% de sable de dune broyée stabilisée à la chaux permet de minimiser l'absorption totale et capillaire du mortier de terre. Cette amélioration revêt une importance cruciale pour assurer la durabilité et la résistance du matériau face aux dommages potentiels causés par l'humidité. En limitant l'absorption d'eau, on réduit la quantité d'eau absorbée par le mortier, ce qui peut contribuer à prévenir la détérioration prématurée et à prolonger la durée de vie de la structure.

L'analyse des données disponibles a montré que l'ajout de 20% de DSB donne les valeurs les plus basses de Cb et de TA. Ces valeurs ont atteint respectivement 11.66 g/cm².min^{1/2} et 18,58%. De plus, l'augmentation en pourcentage était d'environ 25.01% pour Cb et de 16,34% pour TA par rapport au mortier de référence.

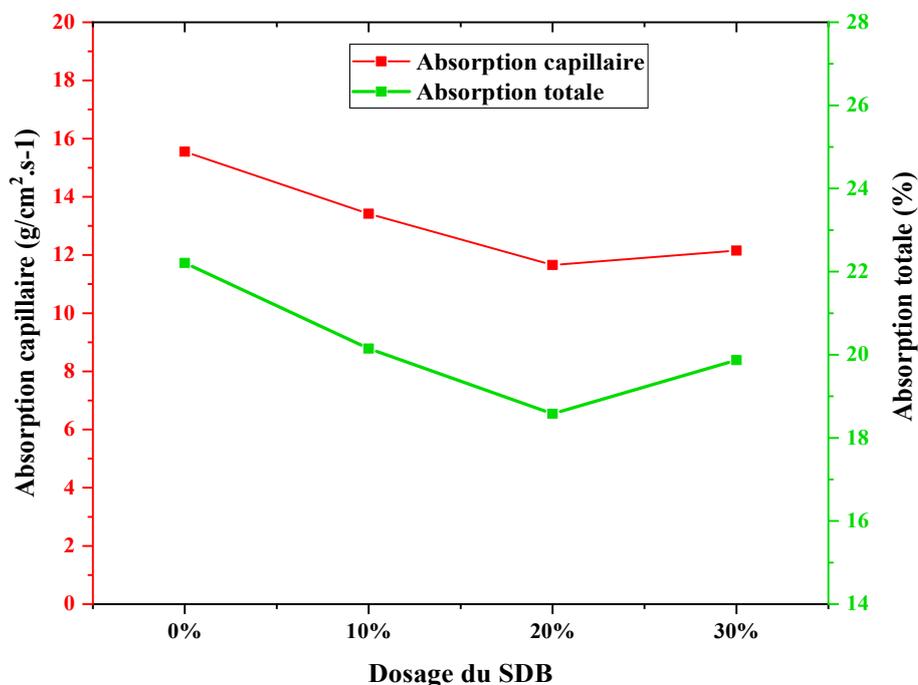


Figure 3.5 Influence du dosage du SDB sur l'absorption capillaire et totale des mortiers de terre

3.3.2 Gonflement :

Les résultats de la figure 3.6 montrent la variation du gonflement en fonction du dosage de sable de dune broyée stabilisée à la chaux dans le mortier de terre. Cela permet une meilleure compréhension des facteurs influençant les propriétés hygroscopiques et la durabilité du matériau. Cette compréhension est essentielle pour concevoir des mélanges de mortier adaptés à divers environnements et applications de construction. De plus, la présence de chaux dans le mortier peut affecter le gonflement. La réaction pouzzolanique entre la chaux et les particules de sable de dune broyée peut modifier les propriétés physico-chimiques du mortier, influençant ainsi son comportement en termes de gonflement. Cela est justifié par les résultats obtenus, montrant que le gonflement diminue avec l'ajout de sable de dune broyée (SDB) de 15.74% et 20.02% pour des proportions de 10% et 20% de sable de dune, respectivement, par rapport au mortier de référence.

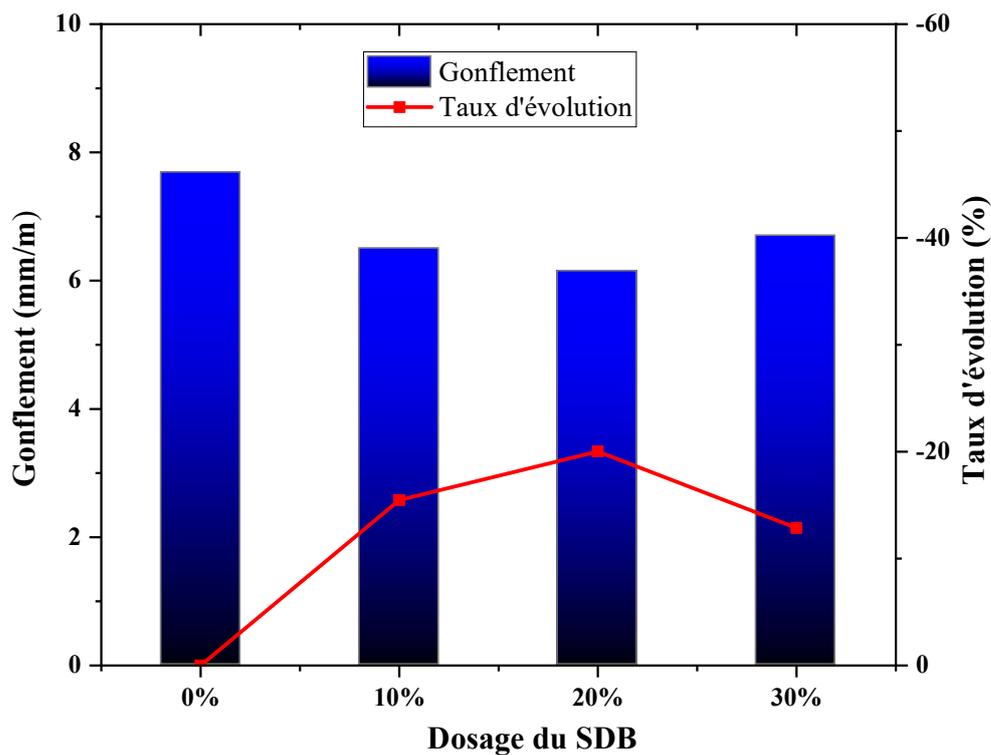


Figure 3.6 Influence du dosage du SDB sur le gonflement des mortiers de terre

3.3.4 Résistance à l'abrasion :

D'après l'analyse de la **Figure 3.7**, Il est crucial de comprendre la relation entre le dosage de sable de dune broyée et la résistance à l'abrasion pour évaluer la durabilité du mortier de terre dans des environnements sujets à l'usure. Une résistance accrue à l'abrasion peut prolonger la durée de vie du matériau et réduire les coûts d'entretien à long terme. Une augmentation du dosage de sable de dune broyée peut influencer la résistance à l'abrasion du mortier de terre. La plus grande résistance à l'abrasion est obtenue avec l'ajout de 20% de sable de dune broyée (SDB), atteignant une valeur de 30,2 cm²/m. Cela représente une augmentation de 43,31% par rapport au mortier de référence. Cette augmentation significative témoigne l'effet positif de l'ajout de SDB dans la confection des mortiers de terre stabilisés par la chaux.

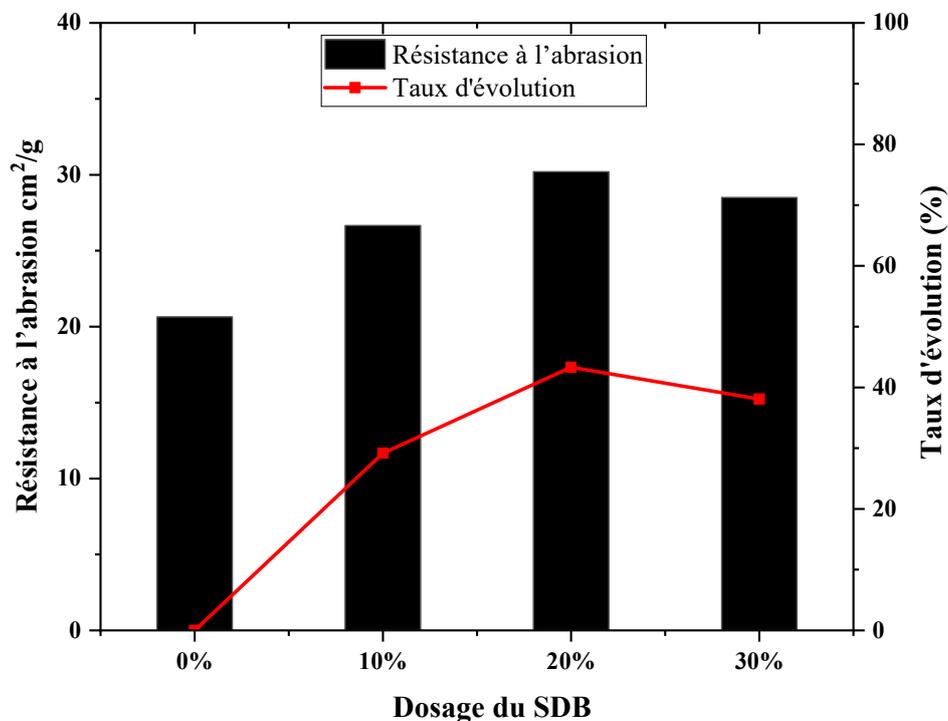


Figure 3.7 Influence du dosage du SDB sur la résistance à l'abrasion des mortiers de terre

3.3.4 L'attaque de sulfate :

3.3.4.1 Gain de mass :

L'aspect typique des échantillons après l'attaque par les sulfates est montré à la Figure 3.8. Aucun dommage visible ou éclatement n'est apparu sur les échantillons contenus 0%, 10% et 20% du SDB. Cependant, un éclatement a été observé dans l'échantillon de 30% de SDB.

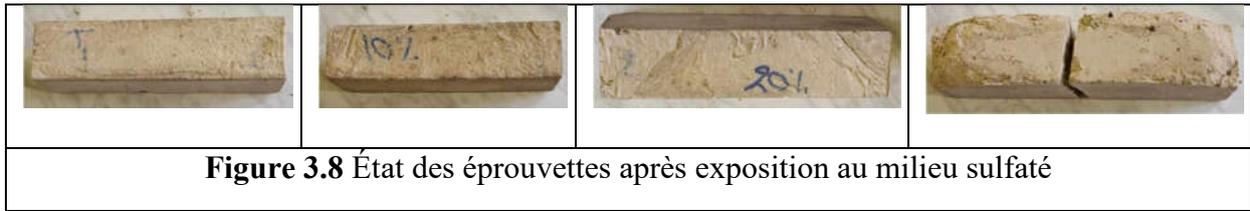


Figure 3.9 Coupes transversales des échantillons montrant un précipité blanchâtre sur les sections internes.

Les échantillons exposés à une solution de sulfate de sodium ont montré un gain de masse, comme le montre la Fig. 3.10. Le plus grand gain de masse a été observé sur l'échantillon de contrôle, avec une augmentation de 0.5%. Bien que le gain de masse diminue avec l'augmentation du contenu en SDB, le mortier contenant 20% de SDB a présenté une augmentation de masse inférieure à celle du mortier de référence. Ce comportement est généralement dû à la formation de cristaux d'ettringite dans le mortier de référence par rapport aux mortiers contenant des SDB, remplissant ainsi les pores et entraînant une augmentation de la masse du mortier de référence (P. Kasinikota et D. D. Tripura, 2021), voir la figure 3.9.

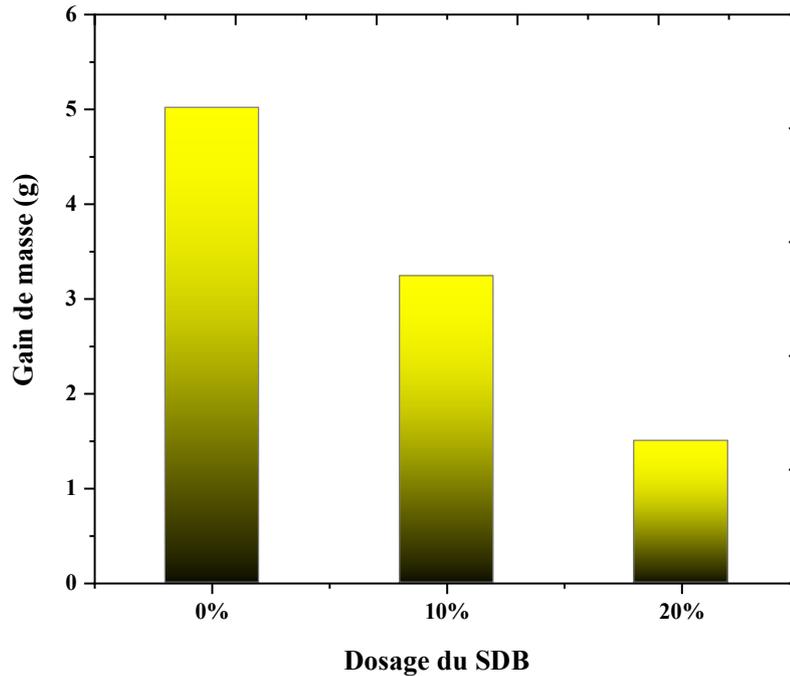


Figure 3.10 Influence du dosage du SDB de grain de masse sur mortiers de terre

3.3.3.2 Résistance à la compression :

La Figure 11 illustre l'impact de l'acide sulfurique (Na_2SO_4) sur la résistance à la compression du mortier après 15 jours. D'après, les résultats obtenus montrent que tous les échantillons exposés à l'attaque des sulfates ont montré une résistance à la compression plus basse que les valeurs initiales notées précédentes. La résistance la plus élevée a été enregistrée pour le mortier avec 20 % de SDB, atteignant 9.01 MPa. La résistance à la compression du mortier de référence diminue de 17.62 % après exposition à deux cycles dans une solution de Na_2SO_4 . De même, pour les mortiers contenant 10 à 20 % de SDB, une légère diminution de la résistance après exposition au Na_2SO_4 varie respectivement de 9.19 % à 5.85 %.

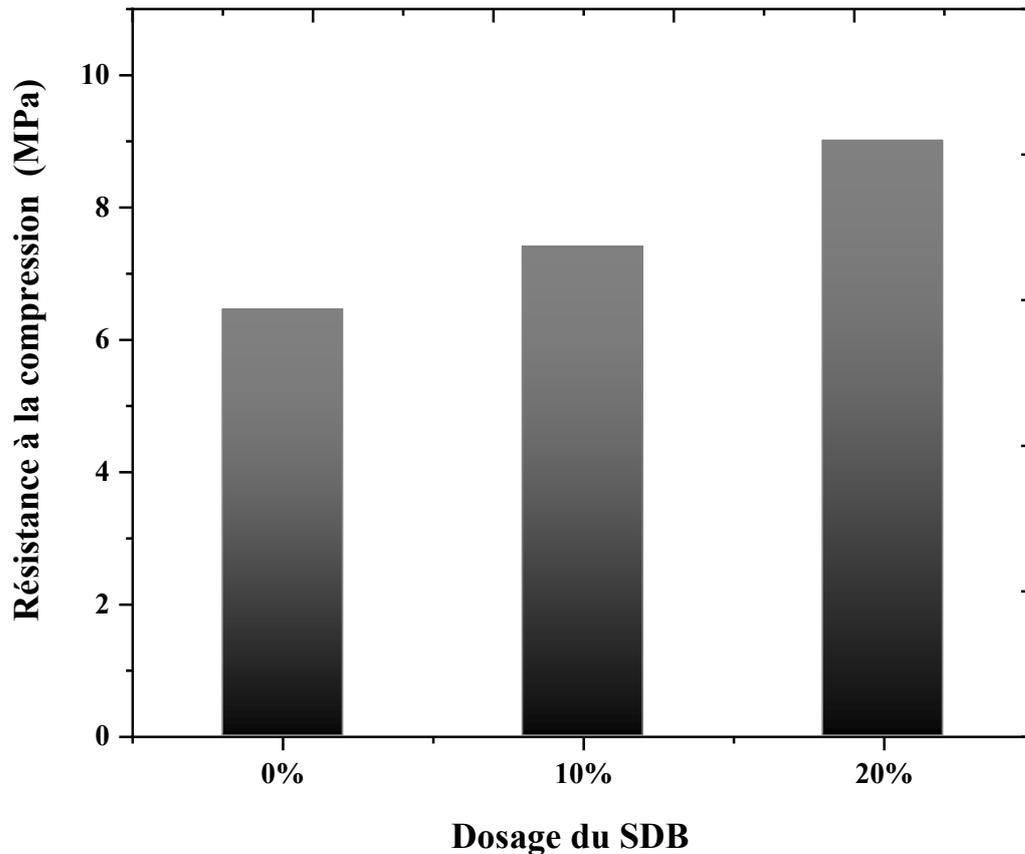


Figure 3.11. Influence du dosage du SDB sur la résistance à la compression des mortiers de terre

3.4 Conclusion

Une étude expérimentale détaillée a été menée pour évaluer l'influence du sable de dune broyé en tant que substitut de la chaux sur les propriétés des mortiers de terre stabilisée. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats expérimentaux :

- La densité des mortiers augmente avec l'ajout croissant de SDB. Cette augmentation est attribuée à la formation de nouveaux hydrates (CSH).
- L'ajout de 20 % de sable de dune broyé améliore la résistance à la compression et à la flexion de 18,18 % et 24,45 % respectivement par rapport au mortier de référence.
- Le mortier contenant 20 % de SDB présente la plus faible absorption totale et capillaire.

- Le gonflement diminue à mesure que la quantité de SDB augmente. Cette réduction atteint 15,74 % et 20,02 % pour des ajouts de 10 % et 20 % de sable de dune, respectivement, par rapport au mortier de référence.
- L'ajout de 20 % de SDB augmente significativement la résistance à l'abrasion, atteignant une amélioration de 43,41 % par rapport au mortier de référence.
- L'ajout de 10 % et 20 % de SDB rend les mortiers plus vulnérables à l'attaque des sulfates par rapport aux mortiers sans SDB.

Conclusion générale

Conclusion générale

En tant que matériau de liaison entre les unités de maçonnerie, le mortier joue un rôle essentiel. Les aspects cruciaux incluent sa capacité à assurer une cohésion monolithique de la maçonnerie, à faciliter l'empilement des unités en compensant leurs irrégularités géométriques et à répartir uniformément les contraintes de compression pour éviter leur concentration. Bien que sa contribution à la résistance en compression de la maçonnerie soit modérée, la résistance à la traction et au cisaillement de la structure dépend largement du mortier. Dans les murs de maçonneries irrégulières, la désintégration ou l'effondrement local sont également fortement influencés par la qualité du mortier.

La détermination des propriétés mécaniques et de la durabilité du mortier est donc cruciale dans l'analyse des murs de maçonnerie historiques, afin d'évaluer leur intégrité structurelle et d'identifier les mécanismes de détérioration possibles (E. Mammoliti et al.2021). Cependant, l'hétérogénéité des mortiers, en termes de constituants, de composition du mélange, de processus d'application et de conditions réelles, rend souvent leur caractérisation difficile. Cette complexité est encore accrue pour les mortiers à base de terre, en raison des variations de la quantité et de la composition de l'argile, de leur sensibilité à l'humidité environnementale et de la fréquence élevée de leur détérioration.

Le sable des dunes est abondant en Algérie, représentant près de 60% du territoire national. Bien qu'il offre des qualités potentielles, il demeure largement sous-utilisé. Des recherches antérieures ont démontré ses propriétés pouzzolaniques, ce qui en fait un choix attrayant comme additif dans la fabrication de mortiers à base de terre. Donc, l'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de sable des dunes finement proyé sur les résistances physico-mécaniques et de la durabilité des mortiers de terre stabilisé à la chaux.

Dans ce travail, le pourcentage de chaux est fixé à 10%. Pour accélérer la cure des éprouvettes, elles sont traitées dans une étuve pendant 7 jours. Ce choix se base sur des études antérieures réalisées sur le même type de sol.

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

CONCLUSION GENERALE

- La résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'ajout de sable de dune (SDB) jusqu'à 20%. Cette amélioration résulte de la formation d'hydrates supplémentaires, rendant le mortier plus dense. Au-delà de cette valeur, il n'y aura pas suffisamment de chaux pour la réaction pouzzolanique, ce qui fera que le sable de dune restera une charge inerte et ne contribuera pas significativement au gain de résistance.
- L'ajout du sable de dune à un effet bénéfique sur l'absorption totale, l'absorption capillaire, le gonflement et la résistance à l'abraion.
- Après l'exposition aux sulfates, les résistances se sont diminuées. En revanche, un gain de masse a été constaté lors de l'exposition au milieu sulfatique, le gain de masse le plus élevé étant observé dans l'échantillon de référence.
- Le mortier contenant 20 % de sable de dune broyé a présenté la plus grande résistance mécanique et une meilleure performance en termes de durabilité.

Références :

- **Aninda and M.S. Islam**, Effectiveness of waste concrete powder in fabricating compressed stabilized earth blocks: Strength, durability and thermal assessment , Journal of Building Engineering 80 (2023).
- **Armel Babatoundé LAIBI** . Comportement hygro-thermo mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi BENIN ,2017.
- **ARROUDJ K. et OUDJIT M.N.**, «*Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments*». 2ème Colloque Maghrébin en génie civil, Biskra, Algérie les 10 et 11 Décembre, 119-127, 2002.
- **ATTIMA, Z., DEKAYIR, A., BENNANI, M. A. D., & ELHAMMOUTI, K.**, Stabilisation des sols argileux par la chaux. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, 10. (2014).
- **Bahar R, Benazzoug M, Kenai S**. Performance of compacted cement stabilized soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.
- **Bensalem Ahmed**. Caractérisation et exploitation de l'argile de Benazzouz dans la construction routière. Memoire de magister, université de badji mokhtar-annaba, 136p.(2010).
- **Bouchet, A., Meunier, A., Sardini, P. (2000)**. Minéraux argileux: structure cristalline, identification par diffraction des rayons X. Pau.
- **Delbecque D**. Approche contemporaine de la construction en terre Histoire de la construction en terre, 2011.
- **Dr. Guettouche Amar**, "Identification et classification des sols,"p.31.
- **E. Mammoliti, A. Ferretti, M. Malavolta, R. Teloni, P. Ruggeri, G. Roselli**, Defining a non-destructive in situ approach for the determination of historical mortar strength using the equotip hardness tester, Appl. Sci. 11 (11) (2021).
- **Eades, J. L., et Grim, R. E**. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board, Bulletin 262, 51-63. (1960).
- **Givanildo anves de azeredo** . MISE AU POINT DE PROCEDURES D'ESSAIS MECANQUES SUR MORTIERS DE TERRE : APPLICATION A L'ETUDE DE LEUR RHEOLOGIE. Thèse de doctorates, Université Fédérale de Paraiba – Brésil, 2005).
- **Hénin. S., Chaussidon. J., and Calvet.R.**, "Surface, forme et croissance des minéraux desargiles," Bull. du Groupe français des argiles, vol. 21, no. 1, pp. 31–45, 1969, <https://doi: 10.3406/argil.1969.1106>.

- **Hénin. S., Chaussidon. J., and Calvet.R.**, “Surface, forme et croissance des minéraux des argiles,” Bull. du Groupe français des argiles, vol. 21, no. 1, pp. 31–45, 1969, [https://doi: 10.3406/argil.1969.1106](https://doi.org/10.3406/argil.1969.1106).
- **Hibouche A.** Sols traité aux liants, performance hydro- mécaniques et Hydrothermiques .application aux BTP. Thèse de doctorat, Université de havre France: 231p, 2013.
- **Houben H, Guillaud H.** Traité de construction en terre. CRA Terre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- **Houben H, Guillaud H.** Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; (1994).
- **Izemouren O, Guettala A.** Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Matec web of conférence, vol 11 02001,(2014).
- **IZEMMOUREN, O.** Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra). P 20-21. (2016).
- **K. S Almeasar, b.Taallah, o.izemouren, E. Atiki Ab. Guettala.** Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and Hygroscopicity Behavior of Earth Mortars. International Journal of Architectural Heritage. 17(1):1-19. 2021.
- **Kinshasa (RD Congo),** These de Doctorat Unique de l'Universite de Liege (Belgique),(2012).
- **Little, D. N.** Fundamentals of the stabilization of soil with lime. Bulletin of National Lime Association, 1987, 322, 17. 20p. (1987).
- **Marrot, L.** Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique. (2010).
- **MEUKAN,** Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments. (Doctoral dissertation, Université de Yaoundé I). p22. (2004).
- **O. G. aluko et al ,** A Study On The Short Term Compressive Strength Of Compressed Stabilised Earth Block With Waste Glass Powder As Part Replacement For Cement , 2015 .
- **O. Izemouren, A. Guettala, and S. Guettala,** "Mechanical properties and durability of lime and natural pozzolana stabilized steam-cured compressed earth block bricks," Geotechnical and Geological Engineering, vol. 33, pp. 1321-1333, 2015
- **P. Kasinikota et D. D. Tripura,** « Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste », *Construction and Building Materials*, vol. 280, p. 122520, 2021.
- **Pedro G.** Les minéraux argileux. Masson, Paris, France, 665p physiques des granulats. (1994).

- **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," *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120935, 2020.
- **Truche, C.** Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III). (2010).
- **Tucker .M. E,** *Sedimentary petrology : an introduction to the origin of sedimentary rocks.* Blackwell Science, (2001).
- **Venkatrama Reddy BV, Gupta A.** Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils. *Journal of Materials and Structures*, 38, 651-658, 2005.
- **Walker, P. Strength,** Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites*, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.
- **Wetshondo, O. D** Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la province .

La liste des normes

AN F P18 – 592 : Essai au bleu de méthylène

NF EN 12390-5 : Essai de traction par flexion

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

NF P 18-560 : Reconnaissance et essai analyse granulométrique des sols par tamisage à sec. **NF P 18 598** : Essai d'équivalent de sable.

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).

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

NF P94-054 : la densité .

XP-P 13 901 : Essais d'abrasion.

XP-P 13 901 : Essais d'absorption.

XP-P 13 901 : Essais de gonflement.

XP-P 13 901 : Essais de la compression simple.