



Université Mohamed khider –Biskra

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

Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Réf. :

Présenté et soutenu par :

KACHROUD Doua

Le: mercredi 04 Juin 2025

Effet des déchets de brique cuites sur la stabilisation des mortiers de terre

Jury :

Encadreur : IZEMMOUREN Ouarda

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENT

Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour avoir exaucé mes prières et facilité chaque difficulté rencontrée. Par Sa grâce, les obstacles se sont transformés en opportunités, et j'ai bénéficié des moyens et des soutiens qui ont rendu mon parcours plus accessible. Je Lui demande de bénir mes efforts et de m'accorder toujours Sa réussite.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à mes chers parents pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant, qui ont accompagné chaque étape de ma vie jusqu'à ce moment précieux.

Je remercie chaleureusement mon encadrante, Dr. Izemmouren Ouarda, pour son accompagnement et ses conseils. Je lui souhaite santé et bien-être.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dr Afaf ZEROUAL pour ses orientations précieuses, sa patience et son soutien. Son accompagnement scientifique a été une source de confiance et d'inspiration, et sa supervision rigoureuse a grandement contribué au développement de ce travail et à sa réalisation finale.

Je remercie également les membres du jury pour leur présence et le temps accordé à l'évaluation de mon travail.

إِحْمَادَاء

من قال أنا لها "نالها"

الحمد لله حبا و شكرها و امتنانا، الذي يفضلها ها أنا اليوم أنظر إلى حلبها طال انتظاره و قد أصبح واقعاً أفتخر به.

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون، لم يكن الحلم قريباً و لا الطريق كان محفوفاً بالتسهيلات لكنى نلتها .

إلى ملاكي الطاهر، وقوى بعد الله داعمي الأولى و الأبدية "أبي فوزية" إلى من دععني بلا حدود و أعطاني بلا مقابل "أبي هشام" أهديكما هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتكما لما كان له وجود، ممتنة لإن الله قد اصطفاكما لي والذين من البشر يا خير سند و عوض.

إلى جدتي الغالية، من كان دعاؤها يسبقي دائمًا إلى روح جدي، التي فارقتنا جسداً و بقيت في القلب وكل دعاء فيه اسمك رحمة الله و اسكنه فسيح جناته

إلى من قيل فيه (سَنَشَدُ عَذَدَكَ بِأَخِيكَ)

إلى من آمنت بقدراتي و أمان أيامي أخي الكبرى "تبر".

إلى من مد يده دون كلل ولا ملل وقت ضعفي أخي "عبد العزيز" أدامك الله ضلعاً ثابتاً لي.

إلى من يذكرني بقوتي و يقف خلفي كظللي أخي الصغير" طارق".

إلى كل من تركوا في قلبي أثراً جميلاً، و كانوا النور في طرقي خلال هذه الرحلة كل صديقاني...

إلى شيراز و رشا، صديقتي الطفولة و رفيقتي الدرب من رافقتي معهم ملامح الذكريات الأولى

إلى خديجة، كتبت خير الصحبة و السند في فترات الضغط والتعب إلى أريح في صحبتك وفاء و سناء هدوئي في الزحام إلى آية الفتانة بريشة قلب جليل

إلى وجдан، رفيقتي في البحث و الخبر سرنا سويا خطوة بخطوة دعماً و مشاركة و ذكرك في هذا الإنجاز لا تغيب.

إلى كل عائلتي الكبيرة أتم الأصل والجذر إلى بنات خالاتي وأخواتي الرفقة الحلوة والمواقف التي لا تنسى كتم البهجة في كل وقت .

إلى قطي الصغير "هيبو" الذي كان يزرع البهجة في ايامي بصمته و حنانه و يسح تعبي بنظرته البريئة .

ملخص

سعت هذه الدراسة إلى استكشاف إمكانية إعادة تدوير نفايات الطوب الأحمر المطحون وتحويلها إلى مادة بناء مفيدة من خلال دمجها مع الجير لإنتاج ملاط ترابي متين، مناسب لملء فوائل الطوب. ولتحقيق هذا الهدف، تم تحضير أربع خلطات تجريبية تحتوي على نسب مختلفة من النفايات (10%، 20%، 30%، 40%)، مع الحفاظ على مكونات أساسية ثابتة تشمل الجير والتربة والرمل.

أجريت على العينات سلسلة من الاختبارات الشاملة لتقدير أدائها الميكانيكي (مثل قوة الضغط والانحناء ، الإنفاخ) وخصائصها الفيزيائية (مثل الامتصاص، مقاومة التآكل، والكتافة الجافة). وأظهرت النتائج تفوقاً ملحوظاً للخلط الذي يحتوي على 40% من نفايات الطوب الأحمر، حيث سجل تحسناً كبيراً في جميع المؤشرات مقارنة بالعينة المرجعية.

على سبيل المثال، ارتفعت مقاومة الضغط بنسبة 40% تقريباً، من 9.98 ميجا باسكال إلى 13.97 ميجا باسكال، بينما زادت مقاومة الانحناء من 1.65 ميجا باسكال إلى 4.30 ميجا باسكال. كما انخفضت قيم الامتصاص الشعري والكتل بشكل كبير، مما يشير إلى تحسن مقاومة الماء. بالإضافة إلى ذلك، لوحظت زيادة في الكثافة الجافة وتحسين في مقاومة التآكل، مما يؤكد فعالية هذه النفايات في تعزيز متانة الملاط.

تؤكد هذه النتائج أن إضافة نفايات الطوب الأحمر المطحون إلى الملاط الترابي يمكن أن يحسن أداءه بشكل كبير، مما يجعله خياراً واعداً لصناعة مواد بناء أكثر استدامة وأعلى جودة.

كلمات المفتاحية: ملاط الأرض، الجير، نفايات الطوب المحروق المطحون ، الخصائص الميكانيكية والفيزيائية، المتانة.

Résumé

Cette étude a cherché à explorer la possibilité de recycler les déchets de briques rouges broyées en les intégrant à la chaux pour produire un mortier de terre résistant, adapté au jointoiement des briques. Pour atteindre cet objectif, quatre mélanges expérimentaux avec différentes proportions de déchets (10 %, 20 %, 30 % et 40 %) ont été préparés, tout en maintenant une composition de base constante comprenant de la chaux, de la terre et du sable.

Les échantillons ont été soumis à une série de tests exhaustifs pour évaluer leurs performances mécaniques (la résistance à la compression et la résistance à la flexion) et leurs durabilité (l'absorption totale, l'absorption capillaire, le gonflement et l'abrasion).

Les résultats ont révélé une nette supériorité du mélange contenant 40 % de déchets de briques rouges, avec une amélioration significative de tous les indicateurs par rapport à l'échantillon témoin. La résistance à la compression a augmenté d'environ 40 %, passant de 9,98 MPa à 13,97 MPa, tandis que la résistance à la flexion est passée de 1,65 MPa à 4,30 MPa. Les valeurs d'absorption capillaire et totale ont également considérablement diminué, indiquant une meilleure résistance à l'eau. De plus, une augmentation de la densité sèche et une amélioration de la résistance à l'usure ont été observées, confirmant l'efficacité de ces déchets dans le renforcement de la durabilité du mortier.

Ces résultats confirment que l'ajout de déchets de briques rouges broyées au mortier terreux peut considérablement améliorer les performances, en faisant un choix prometteur pour la production de matériaux de construction plus durables et de meilleure qualité.

Les mots clé : le mortier de terre , la chaux , déchet de brique cuite broyée , propriétés mécanique et physique , durabilité .

Abstract

This study aimed to explore the potential of recycling crushed red brick waste by incorporating it with lime to produce a durable earthen mortar suitable for brick jointing. To achieve this objective, four experimental mixtures containing varying proportions of waste (10%, 20%, 30%, and 40%) were prepared, while maintaining a constant base composition of lime, soil, and sand. The samples underwent a comprehensive series of tests to evaluate their mechanical performance (including compressive and flexural strength, as well as swelling) and physical properties (such as water absorption, abrasion resistance, and dry density). The results demonstrated a clear superiority of the mixture containing 40% red brick waste, showing significant improvement across all measured parameters compared to the control sample. For instance, compressive strength increased by approximately 40%, rising from 9.98 MPa to 13.97 MPa, while flexural strength improved from 1.65 MPa to 4.30 MPa. Both capillary and total water absorption values decreased substantially, indicating enhanced water resistance. Furthermore, increased dry density and improved abrasion resistance were observed, confirming the effectiveness of this waste material in enhancing mortar durability.

These findings confirm that incorporating crushed red brick waste into earthen mortar can significantly improve its performance, making it a promising option for developing more sustainable and higher-quality construction materials.

Keywords: earth mortar, lime, crushed fired brick waste, crushed fired brick waste, mechanical and physical properties, durability.

Table des matières

Remerciement	I
إهاده	II
ملخص	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
Introduction générale	1
CHAPITRE 01 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Avantages et Inconvénients.....	3
1.2.1 Avantages	3
1.2.2 Inconvénients	3
1.3 Construction en terre.....	4
1.3.1 Constitution de terre.....	4
1.3.2 Les argiles	4
1.3.2.1 Définition	4
1.3.2.2 Structure des minéraux argileux	5
a.3.2.3 Classification et type d'argile	5
1.4 Mortier de terre :	8
1.4.1 La fonction du mortier	8
1.4.2. Les caractéristiques des mortiers de terre	9
1.5 Stabilisation du sol.....	10
1.5.1 Méthodes.....	10
1.5.1.1 Stabilisation Physique.....	10

1.5.1.2 Stabilisation par moyens mécaniques	11
1.5.2 Stabilisation par ciment	11
1.5.3 Stabilisation à l'aide de la chaux	12
1.5.3.1 Capacité d'échange cationique :	12
1.5.3.2 Réaction pouzzolanique	13
1.6 Effet du dosage des ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des matériaux à base de terre	14
1.7 Généralités sur les déchets de brique	21
1.7.1 Déchets De Brique	21
1.7.2 Définition de brique :	21
1.7.3 Méthode de fabrication des briques	21
1.7.4-Types de brique.....	22
1.7.5 Propriétés physico-chimiques de la brique	22
1.7.6 Valorisation des déchets de briques	23
1.7.7 Réutilisation des briques	23
1.7.8 – Recyclage des briques :	23
1.8 Approche adoptée pour le recyclage des déchets de briques	24
1.8.1 L'opération de récupération des déchets de briques	24
1.8.2 Procédé de fragmentation des briques	24
1.8.3 Tamisage de la poudre de brique :	26
1.9 Conclusion	27
CHAPITRE 02: MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES.....	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Matériaux utilisés.....	29
2.2.1 Sol	29
2.2.1.1 Origine du sol.....	29
2.2.1.2 Propriétés physiques du sol.....	30
2.2.2 Sable concassé	34
2.2.2.1 Propriété physique du sable	34
2.2.3 La chaux :.....	35
2.2.4 Le déchet de brique rouge broyés	36

2.3 Conduite de l'expérience	36
2.3.1 Matériel spécifique.....	36
2.3.2 Composition des mélanges	37
2.3.3 Préparation des mélanges.....	38
2.3.4 Mode de cure des mortiers.....	39
2.4.1 Propriétés mécaniques	39
2.4.1.1) Essai de la durabilité.....	39
2.5 Propriétés physique.....	41
2.5.1 Mesure de la masse volumique (NFP94-054, 1994) :.....	41
2.6 Essai de la durabilité	41
2.6.1 Absorption capillaire (NF XP- P 13 901).....	41
2.6.2 Absorption totale d'eau (NF XP- P 13 901)	42
2.6.3 Gonflement	43
2.6.4 Résistances à l'abrasion (NF XP- P 13 901)	44
2.7 Conclusion	45
CHAPITRE 03: RESULTATS ET DISCUSSION	46
3.1 Introduction.....	46
3.2 Les propriétés physico-mécaniques	47
3.2.1 l'impact des déchets de brique broyés sur la densité des mortiers :	47
3.2.2 La résistance à la flexion :	48
3.2.3 La résistance à la compression.....	49
3.3 Essais de la durabilité	50
3.3.1 L'influence des déchet de brique broyés sur le comportement capillaire du mortier	50
3.3.2 L'influence des déchet de brique broyés sur l'absorption totale du mortier	52
3.3.3 La variation de la résistance à l'abrasion des mortiers en fonction de l'ajout de déchets de brique broyés.....	53
3.3.4 L'impact des déchets de brique broyés sur le gonflement des mortiers.....	54
3.4 Conclusion	55
CONCLUSION GENERALE.....	56
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	58

Liste des figures

Chapitre 01 : Revue Bibliographique

Figure1. 1: Formes géométriques tétraédriques et octaédriques(https://gsoil.wordpress.com/tag/clay/).....	5
Figure1. 2: Structure atomique de la kaolinite (Al-Ani & Sarapaa.T, 2008).....	6
Figure1. 3: Groupe de minéraux argileux de structure T O T : a) illite et b) smectite (Qin et al., 2019)	7
Figure1. 4: Structure de la chlorite (Yang et al., 2019)	8
Figure1. 5: : Solubilité des alumates et des silicates en fonction du PH Little (Thi-Thanh-Hang NGUYEN, 2015)	13
Figure1. 6: Réaction pouzzolanique (Little, 1987)	14
Figure1. 7: Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA.....	15
Figure1. 8 Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA.....	15
Figure1. 9: Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (Izemouren, 2016).....	16
Figure1. 10 Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche (Izemouren, 2016).....	16
Figure1. 11 influence du dosage des ajouts sur l'absorption totale. Izemouren (2016).....	17
Figure1. 12: influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire. Izemouren (2016).	18
Figure1. 13: Absorption totale de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA, après test d'ébullition. Almeasar et al. (2021).....	18
Figure1. 14 :Absorption totale d'EMS en fonction de la teneur en DPA, après immersion dans l'eau. Almeasar et al. (2021)	19
Figure1. 15: Absorption capillaire de l'EMS en fonction de la teneur en DPA. Almeasar et al. (2021).....	19
Figure1. 16: Remblai de déchets de briques dans une usine.....	24
Figure1. 17: Les granulons des briques que nous avons obtenus De la machine concasseur.....	25
Figure1. 18 : Les granules des briques que nous avons obtenus De la machine los Anglos.....	25
Figure1. 19: Granulés de brique dans le Moule de la machine de Micro Duval avec granulés de fer	26
Figure1. 20: Tamisage de la poudre et granulés des briques	26

Chapitre02 : Materiaux Et Methodes Experimentales

Figure2. 1: le sol utilise dans l'étude.....	29
Figure2. 2 :Mesure de la masse volumique (a) Apparente, (b) Absolue.....	30
Figure2. 3: Détermination de WL et WP.....	31
Figure2. 4: Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande.	32

Figure2. 5: Granulométrie du sol	33
Figure2. 6: Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).	33
Figure2. 7: Essai au bleu de méthylène	34
Figure2. 8: Analyse granulométrique du sable concassé.	35
Figure2. 9: la chaux vive.....	35
Figure2. 10 : Déchets de briques broyées	36
Figure2. 11: Moule prismatique.....	37
Figure2. 12 : Préparation de la pâte de terre dans les moules.....	38
Figure2. 13 : Essai de compression.	40
Figure2. 14: Essai de flexion.	41
Figure2. 15: Essai d'absorption par capillaire.	42
Figure2. 16: Essai d'absorption totale.	43
Figure2. 17: Essai de gonflement.....	44
Figure2. 18 : Essai d'abrasion.....	45

Chapitre 03 : Résultats et discussion

Figure3. 1: Influence du dosage du brique broyés sur la densité des mortiers de terre	47
Figure3. 2: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à la flexion des mortiers de terre	48
Figure3. 3: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à la compression des mortiers de terre	49
Figure3. 4: Influence du dosage du brique broyée sur l'absorption capillaire	50
Figure3. 5: Influence du dosage du brique broyés totale des mortiers de terre	52
Figure3. 6: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à l'abrasion des mortiers de terre	53
Figure3. 7: Influence du dosage du brique broyés sur le gonflement des mortiers de terre	54

Liste des tableaux

Chapitre 01 : Revue Bibliographique

Tableau1. 1: Travaux antérieurs sur l'utilisation des différentes additives minérales dans la20

Chapitre02 : Matériaux Et Méthodes Experimentales

Tableau2. 1: Les masses volumiques du sol.	30
Tableau2. 2: Limites d'Atterberg de sol.	31
Tableau2. 3: Valeur de Bleu méthylène.	34
Tableau2. 4: Masses Volumiques du sable concassé.	34
Tableau2. 5: Caractéristiques physiques (g/cm ³)	35
Tableau2. 6: Analyse chimique (% massique).....	36
Tableau2. 7: Masses Volumiques du déchets de brique broyés.	36
Tableau2. 8 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.	37

Introduction générale

Contrairement à des matériaux comme le béton ou l'acier, la terre naturelle peut être utilisée en construction sans nécessiter une consommation énergétique importante. Ce matériau présente de nombreux atouts, notamment sur les plans écologique, social et culturel. Néanmoins, les constructions en terre souffrent souvent de certaines limites, telles qu'une faible résistance mécanique, des fissures dues au retrait, ainsi qu'une grande sensibilité à l'humidité.

Afin de remédier à ces contraintes, plusieurs techniques de stabilisation ont vu le jour, qu'elles soient physiques, chimiques ou mécaniques. Ces efforts ont abouti au développement de divers produits à base de terre comme l'adobe, le pisé, le torchis, les blocs de terre comprimée, ou encore le mortier de terre.

Ce dernier, largement utilisé dans les constructions en terre crue, est composé principalement de terre, d'eau, de sable, et parfois de fibres végétales. Contrairement aux mortiers à base de ciment, il présente un impact environnemental réduit, notamment par l'absence de cuisson à haute température, limitant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

L'intérêt croissant pour les matériaux naturels comme les briques de terre comprimée, l'adobe ou le torchis a favorisé l'usage des mortiers en terre. Toutefois, leur fragilité face à l'humidité, aux précipitations et à l'érosion éolienne ou hydraulique impose des besoins d'entretien réguliers. Cela rend nécessaire le développement de formulations plus performantes, capables de résister aux conditions climatiques sévères.

Dans cette optique, plusieurs recherches ont été menées afin d'introduire des ajouts minéraux ou organiques dans le mortier de terre, dans le but d'en améliorer la résistance et la durabilité.

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche, en étudiant l'effet de l'introduction de briques rouges broyées sur les propriétés mécaniques et la durabilité d'un mortier de terre stabilisé à la chaux.

Le contenu de ce mémoire s'articule autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique. Il débute par un rappel sur les types d'argile et les différentes méthodes de stabilisation, puis s'intéresse aux recherches antérieures sur l'apport des ajouts minéraux dans les produits en terre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'identification et à la caractérisation des matériaux utilisés, notamment les sols, la chaux, les briques rouges broyées et les autres constituants. Il détaille également les formulations des mélanges, les conditions de stockage et les protocoles expérimentaux adoptés.

Le troisième chapitre expose et analyse les résultats obtenus. Il s'attarde sur l'impact des briques rouges broyées sur les résistances mécaniques et la durabilité du mortier étudié, à travers divers essais tels que l'absorption d'eau (totale et capillaire), le gonflement, l'abrasion .

CHAPITRE 01

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 01 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Depuis l'Antiquité, la terre figure parmi les matériaux de construction les plus utilisés. Grâce à ses remarquables qualités plastiques et son impact écologique limité, elle a été privilégiée dans l'édification des bâtiments pendant des siècles. Toutefois, dans les pays développés, l'introduction des blocs de béton, du ciment et d'autres liants hydrauliques a relégué l'usage de la terre crue au second plan. Néanmoins, face aux enjeux environnementaux croissants liés à ces matériaux modernes, on assiste aujourd'hui à un retour progressif de l'intérêt pour la construction en terre crue, tant dans les pays émergents que dans les nations industrialisées. Bien qu'elle présente encore certaines limites, comme sa vulnérabilité à l'humidité et sa faible longévité, la terre crue, notamment lorsqu'elle est renforcée par des techniques de stabilisation appropriées, représente une alternative écologique aux matériaux conventionnels (Fabbri et al., 2018).

1.2 Avantages et Inconvénients

1.2.1 Avantages

La construction en terre offre de nombreux atouts :

- Ressource abondante et entièrement recyclable, elle contribue à une approche durable.
- Régulateur naturel d'humidité, elle favorise un environnement intérieur sain et agréable.
- Son inertie thermique et son caractère incombustible permettent de maintenir des températures stables dans les bâtiments.
- Elle valorise le patrimoine architectural régional et préserve l'identité culturelle.

1.2.2 Inconvénients

Malgré ses nombreux avantages, elle présente aussi quelques limites :

- La recherche scientifique sur ses propriétés reste relativement limitée.
- L'absence de normalisation et de réglementation spécifiques complique son utilisation à grande échelle.
- Sa sensibilité à l'eau pose un défi en termes de durabilité et de résistance.

1.3 Construction en terre

1.3.1 Constitution de terre

Les sols sont généralement composés de minéraux tels que le quartz et les argiles. On trouve parmi les feldspaths, les micas, les carbonates (calcite et dolomite), les oxydes et hydroxydes métalliques tels que l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer, ainsi que le gypse.

Ces minéraux apparaissent généralement dans les sols sous la forme de : - Poudres polygonales plus ou moins uniformes dont la dimension varie de quelques microns à quelques millimètres ; - Feuilles pour les argiles dont la taille maximale n'excède pas quelques microns ; - Agrégats qui correspondent à des morceaux de roches. La morphologie des minéraux qui les composent détermine leurs formes (Cabane, 2004).

Selon (Houben & Guillaud, 2006) , la composition du sol est constituée d'un mélange de quatre éléments dont les proportions peuvent varier.

- Les graviers : Ces particules de matière brute, de taille réduite, sont issues de la Fragmentation de la roche source et des galets. Ils mesurent entre 20 mm et 5 mm. Les graviers forment l'ossature du sol et restreignent sa capacité capillaire et son retrait.
- Les sables : ce sont des formations sédimentaires non consolidées, constituées de petits morceaux provenant de la fragmentation de roches variées, principalement la silice. Ils mesurent entre 2 mm et 0,06mm.
- Les limons : ces structures sédimentaires sont définies par des particules dont la taille se situe entre celle des argiles et celle des sables, c'est-à-dire entre 2 et 63 μm .
- Les argiles : il s'agit de particules microscopiques dont la taille est inférieure à 2 μm .

1.3.2 Les argiles

1.3.2.1 Définition

Le terme "argile" a été défini pour la première fois par des géologues et des pédologues afin de caractériser les particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètres ($<2 \mu\text{m}$).

Le mot "argile" désigne un matériau naturel composé principalement de minéraux à grains fins. Il est généralement plastique lorsqu'il contient une teneur en eau adéquate et durcit lorsqu'il est séché ou cuit. L'argile contient généralement des phyllosilicates, mais elle peut aussi renfermer d'autres

substances qui lui confèrent sa plasticité et sa capacité à durcir après séchage ou cuisson (Guggenheim & Martin, 1995).

1.3.2.2 Structure des minéraux argileux

Les argiles se composent de minéraux formés de phyllosilicates hydratés. Ces minéraux présentent une structure en couches bidimensionnelles qui découle de la liaison entre des tétraèdres SiO_4 et des octaèdres AlO_6 (Figure1.1). Plus précisément, chaque tétraèdre SiO_4 partage trois sommets avec des tétraèdres voisins, formant ainsi une composante hexagonale plane. Les sommets du tétraèdre qui ne se trouvent pas sur le plan forment des connexions avec l'octaèdre AlO_6 . La combinaison de ces structures tétraédriques et octaédriques donne lieu à la grille spécifique à chaque variété d'argile. Ces structures stratifiées confèrent aux argiles des caractéristiques intéressantes, comme une superficie spécifique importante et un forte capacité d'adsorption.

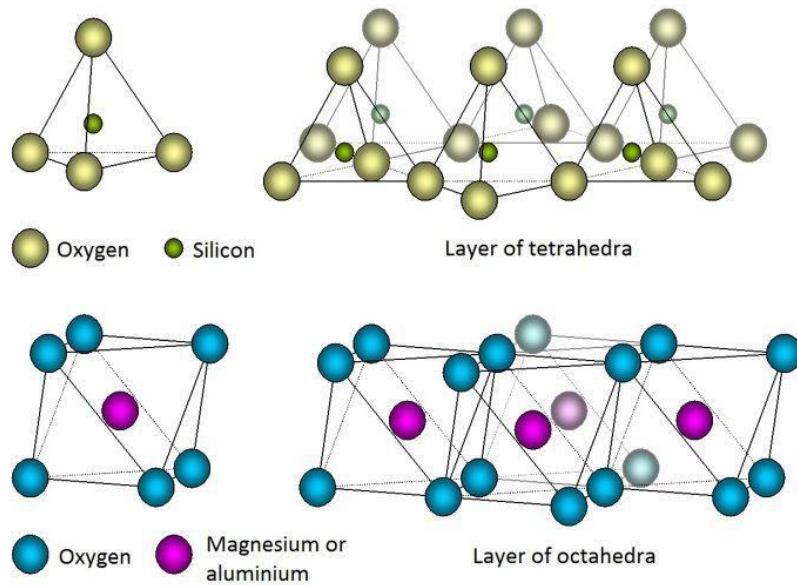


Figure1. 1: Formes géométriques tétraédriques et octaédriques(<https://gsoil.wordpress.com/tag/clay/>)

a.3.2.3 Classification et type d'argile

Selon leur composition chimique, les argiles se divisent en trois principales catégories : la catégorie Kaolinite T-O, la catégorie Illite T-O-T et la catégorie Montmorillonite T-O-T.

- Les minéraux de type 1 :1 ou T-O se composent d'un feillet (incluant une couche octaédrique et une couche tétraédrique) qui a approximativement une épaisseur de 7.2 Å (ångström).
- Les minéraux de type 2 :1 ou T–O–T se composent d'un feillet (une strate octaédrique intercalée entre deux strates tétraédriques) dont l'épaisseur fluctue entre 9 et 15 Å.
- Les minéraux de genre 2 :1 :1 ou T–O–T–O se composent d'une feuille (une couche octaédrique délimitée par deux couches tétraédriques) dont l'épaisseur est approximativement de 14 Å.

-L'épaisseur de feillet de certains minéraux interstratifiés peut varier, ce qui est dû à un mélange régulier ou irrégulier d'argiles des groupes mentionnés précédemment.

Voici les principales catégories d'agiles :

a) La kaolinite

La kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets de silice de forme tétraédrique et de feuillets de forme octaédrique. Les liaisons hydrogène, formées entre les hydroxyles de l'octaèdre et les oxygènes du tétraèdre, permettent de maintenir l'ensemble des couches de base successives (**Figure1.2**) De plus, la force de ces liaisons hydrogène empêche l'hydratation dans l'espace interfoliaire, ce qui explique l'insensibilité de la kaolinite au phénomène de gonflement ([Holtz & Kovacs, 1991](#)).

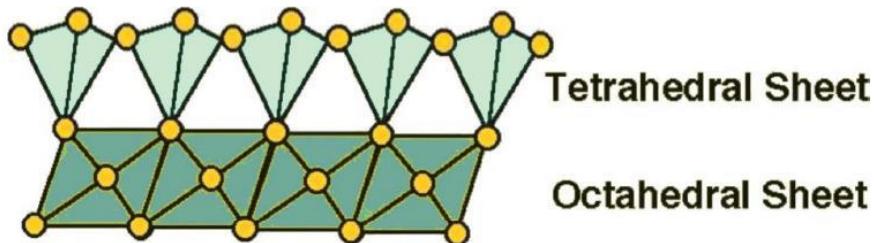


Figure1. 2: Structure atomique de la kaolinite ([Al-Ani & Sarapaa.T, 2008](#))

b) L'illite

L'illite possède la même structure que la montmorillonite (structure de type 2:1). Cependant, contrairement à la montmorillonite, les espaces entre les feuillets sont reliés par un atome de potassium K⁺ ([Holtz & Kovacs, 1991](#)). Les cations K⁺ ont la particularité d'avoir exactement la même taille que les cavités superficielles où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions

potassium anhydres est très forte et empêche les molécules d'eau de parvenir à pénétrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables. L'illite possède des feuillets d'équidistance fixes à 9,6 Å. Cette propriété leur confère un potentiel de gonflement plus faible que celui des montmorillonites et la formation de grosses particules.

c) Les smectites :

Les smectites sont composées de deux feuillets tétraédriques de silice avec un feuillet octaédrique central et sont qualifiées de minéraux de couche 2 :1. Des molécules d'eau et des cations occupent l'espace entre les feuillets 2 :1 (**Figure 1.3**). La smectite a la propriété de s'assembler en quasi-cristaux de 8 à 10 feuillets contigus, assemblés bord à bord et formant un véritable réseau. Ce réseau gonfle en période humide et se contracte en période sèche. De par leur structure, les smectites ont besoin d'équilibrer leurs charges dans l'espace interfoliaire par l'insertion de cations dans cet espace. Ces cations, indépendants de la structure, sont susceptibles d'être échangés par d'autres cations ([Garcia-Romero et al., 2021](#)).

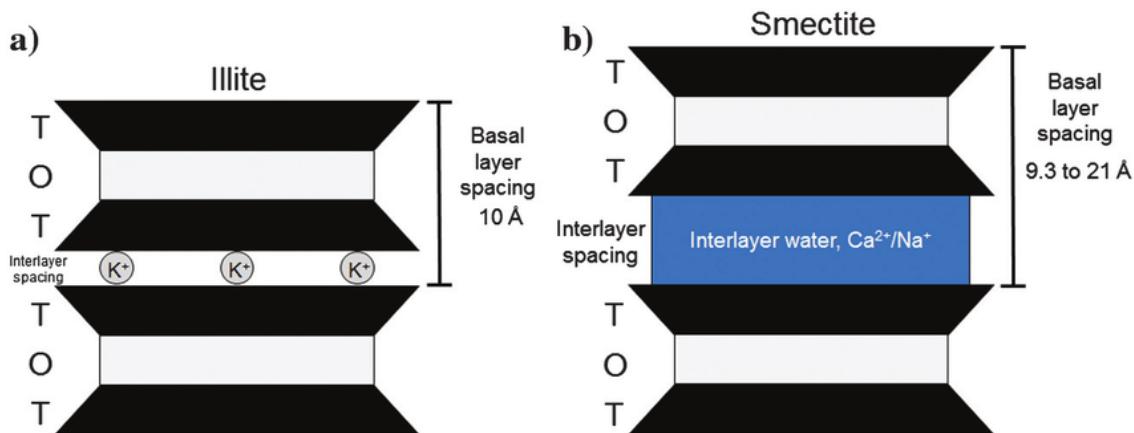


Figure 1. 3: Groupe de minéraux argileux de structure T O T : a) illite et b) smectite ([Qin et al., 2019](#))

d) Les chlorites

Les chlorites appartiennent à la catégorie des phyllosilicates 2:1:1. Même s'ils présentent des ressemblances avec les argiles et qu'une présence importante peut être observée dans les sols moins développés de la région, il est primordial de les signaler en raison de leurs caractéristiques. Toutefois, leur structure est plus complexe, comme le montre la (**Figure 1.4**). ([Ouchet et al., 2000](#); [Yang et al., 2019](#))

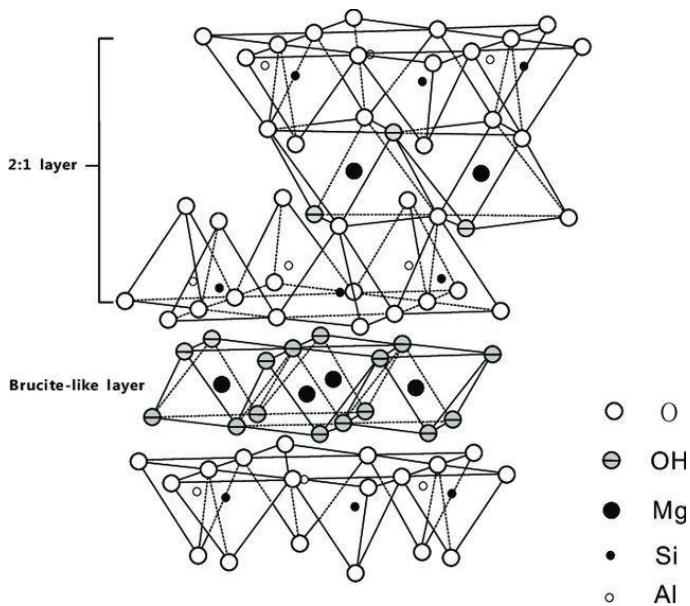


Figure 1. 4: Structure de la chlorite (Yang et al., 2019)

1.4 Mortier de terre :

Le mortier de terre est un matériau traditionnel de construction, composé de sable et de terre, et d'eau, utilisé pour lier et fixer des composants de construction comme des briques, des pierres ou des blocs de béton. À la différence du ciment, c'est un matériau naturel et respectueux de l'environnement.

Fréquemment privilégié pour l'édification de maisons en terre et de structures durables. Habituellement, on utilise 3 à 4 volumes de sable pour chaque volume de terre, le tout étant mélangé avec de l'eau afin d'obtenir une texture semblable à celle d'une pâte. Suite à une homogénéisation, la pâte est mise en place sur les surfaces à colmater ou à fixer.

Le mortier de terre se distingue par une meilleure résistance à la compression et à la flexion, en plus d'offrir une forte résistance aux conditions climatiques défavorables. D'une grande facilité de manipulation et de modelage, il s'adapte à diverses applications dans le domaine de la construction. Toutefois, en comparaison avec le ciment, sa résistance est moindre et il peut se fissurer ou se détériorer plus vite, ce qui exige un entretien périodique pour préserver sa longévité.

1.4.1 La fonction du mortier

Dans la construction, le mortier de terre joue divers rôles, dont :

- a) Étanchéifier les joints : le mortier de terre est employé pour jointoyer les briques, les pierres ou les blocs de béton, dans le but d'établir un raccordement robuste et imperméable entre les différents composants de construction.
- b) Fixation des composants : Le mortier à base de terre sert à lier les éléments de construction, comme les briques ou les pierres, en assurant une adhésion durable entre eux.
- c) Consolider la structure : le mortier de terre peut aussi servir à renforcer la structure d'une construction en formant des murs porteurs ou des piliers.
- Isolation thermique et acoustique : le mortier de terre constitue un matériau naturellement
- d) Isolation thermique et phonique : le mortier de terre est un matériau intrinsèquement isolant, susceptible d'aider à contrôler la température à l'intérieur d'une structure et à atténuer les sons venus de l'extérieur.
- e) Esthétique : le mortier de terre peut servir à réaliser des finitions esthétiques, en intégrant des couleurs, des textures et des motifs sur la surface des murs ou des composants de construction.

Pour faire court, le mortier de terre est essentiel dans le bâtiment car il permet l'assemblage, la fixation et le renforcement des composants de construction, tout en procurant des bénéfices thermiques, acoustiques et esthétiques.

1.4.2. Les caractéristiques des mortiers de terre

Les mortiers de terre, constitués de matériaux de construction traditionnels à base de terre, ont été employés pendant des millénaires dans diverses zones du globe. Les propriétés des mortiers de terre peuvent varier selon les matériaux employés, néanmoins voici quelques attributs généraux.

Respirabilité : les mortiers de terre possèdent une perméabilité élevée à l'air et à la vapeur d'eau, ce qui leur confère une grande capacité de respiration. Cela facilite le dégagement de l'humidité des murs, ce qui évite l'apparition de moisissures et de décomposition. **Faible résistance à la compression** : comparativement à d'autres matériaux de construction comme le béton ou la brique, les mortiers de terre présentent une résistance à la compression plutôt faible. Cela indique qu'ils ne sont pas adaptés aux structures de grande taille.

Élasticité : les mortiers de terre possèdent une élasticité qui leur offre la possibilité de se conformer aux déplacements naturels du sol ou des fondations. Cela les rend particulièrement appropriés pour les structures en terre telles que les maisons en pisé.

Facilité d'application : les mortiers de terre sont assez simples à préparer et à mettre en œuvre. Les méthodes de construction en terre, transmises à travers les générations, sont souvent spécifiques à chaque région. Cependant, les techniques contemporaines ont rendu plus aisée la préparation et l'utilisation des mortiers de terre.

Ils peuvent perdurer pendant des dizaines d'années, voire même des siècles, si les conditions

1.5 Stabilisation du sol

La stabilisation du sol consiste à modifier les caractéristiques d'un système composé de terre, d'eau et d'air afin d'obtenir des propriétés durables, adaptées à un usage spécifique.

Selon ([Houben & Guillaud, 2006](#)), la stabilisation est un processus complexe en raison de plusieurs facteurs, notamment :

- Les caractéristiques intrinsèques du sol,
- Les contraintes financières du projet,
- Les méthodes de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet.

Ces différents éléments influencent de manière significative le processus de stabilisation, ce qui nécessite une connaissance approfondie et une stratégie adaptée à chaque situation particulière.

1.5.1 Méthodes

On identifie trois méthodes principales de stabilisation : la stabilisation mécanique, physique et chimique ([Izemouren, 2016](#)).

1.5.1.1 Stabilisation Physique

On distingue deux méthodes majeures pour effectuer une stabilisation physique :

- Ajustement des propriétés du sol afin d'améliorer les caractéristiques du matériau en rectifiant sa granularité. Dans cette situation, l'intervention cible directement la granularité du sol. Selon les exigences, le mélange produit peut réduire la plasticité du matériau principal en intégrant du sable, ou lui donner une certaine consistance en incorporant des particules fines.

- Une autre approche pour stabiliser physiquement consiste à incorporer des fibres végétales dans les sols argileux. Cette méthode consolide la composition du matériau en évitant les fissures susceptibles de se développer lors du processus de séchage de l'argile ([Izemouren & Guettala., 2014](#)).

1.5.1.2 Stabilisation par moyens mécaniques

L'objectif de la stabilisation mécanique est d'améliorer la brique de terre en ajustant sa densité naturelle. Cette procédure, appelée compactage, vise à diminuer la porosité du matériau en consolidant ses particules. Cette compaction provoque une réduction de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Pour la fabrication de blocs de terre comprimée, on utilise une presse pour effectuer la stabilisation mécanique. Selon MEUKAN (2004), ces presses ont pour fonction de resserrer les grains ([MEUKAM, 2004](#)).

1.5.1.3 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique transforme les propriétés du sol grâce à l'incorporation de certains éléments. Pour améliorer les propriétés mécaniques et réduire la sensibilité à l'humidité, on fait fréquemment appel à l'ajout de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de substances chimiques, ce qui rend les sols traités moins susceptibles d'absorber l'eau. Il existe une multitude de stabilisants chimiques, chacun apportant des améliorations variées au sol en fonction de leurs caractéristiques.

1.5.2 Stabilisation par ciment

Les États-Unis ont connu les premiers essais de stabilisation des sols au ciment dans le domaine routier dès 1915. Parallèlement, en Allemagne, l'utilisation de cette technique a débuté dans les années 1920, principalement dans le secteur de la construction de bâtiments. À partir de 1935, l'emploi du sol cimenté s'est progressivement répandu aux États-Unis, notamment pour la réalisation de routes et de pistes d'aérodrome. Depuis, la stabilisation au ciment s'est imposée comme une technique couramment adoptée à l'échelle mondiale, utilisée aussi bien dans les travaux publics que dans la construction ([Solihu, 2020](#); [Wetshondo, 2012](#)). L'argile fine a peu d'effet sur le ciment, ce qui fait que ce dernier est plus approprié pour les sols contenant peu d'argile. La proportion oscille entre 5 et 12% selon le type de sol, afin d'obtenir une stabilisation satisfaisante. Même si la stabilisation au ciment renforce la solidité et la longévité du sol, elle reste onéreuse et participe à la pollution. En outre, il est généralement impossible de réutiliser les sols stabilisés au ciment ([Izemouren, 2016](#)).

Des recherches comme celle de ([Walker, 1995](#)) ont prouvé une hausse significative de la résistance à la compression du sol suite à l'incorporation de ciment. ([Yan et al., 2013](#)) ont également constaté

que la résistance à la compression et à la traction par fendage s'accroît proportionnellement au contenu en ciment.

L'effet majeur de la stabilisation au ciment est de diminuer la sensibilité du matériau à l'eau. Un traitement adéquat du ciment peut donner lieu à des résultats très appréciables. Une recherche effectuée par ([Venkatarama Reddy & Gupta, 2005](#)) a révélé que la résistance à la compression en milieu humide et la résistance à l'étirement des blocs de terre stabilisée au ciment s'accroît avec l'augmentation de la proportion de ciment. En doublant la quantité de ciment, la résistance à la compression en milieu humide a été multipliée par 2,3.

1.5.3 Stabilisation à l'aide de la chaux

Stabilisation des sols grâce à l'incorporation de chaux. La chaux figure parmi les matériaux les plus anciens employés par les Romains et d'autres civilisations antiques comme stabilisateur pour le pavage ([Manzoor & Yousuf, 2020; Negi et al., 2013](#)). La chaux agit sur le sol selon deux effets distincts : un **effet immédiat**, observable dès son mélange avec le sol, et un **effet à long terme**, dont les conséquences s'étendent de plusieurs mois à quelques années après son application. La chaux vive (CaO) est produite par calcination du carbonate de calcium (CaCO₃) à 900 °C, une réaction qui libère du dioxyde de carbone (CO₂). En réagissant avec l'eau, elle forme de la chaux éteinte (Ca(OH)₂), un processus exothermique générant 15,5 kcal/mol de chaleur, en partie issue de l'eau ([Azzouz, 2006; Zhao et al., 2014](#)). L'ajout de chaux vive réduit l'humidité du sol d'environ 1 % par pourcentage de chaux utilisé. Elle modifie également la structure de l'argile en introduisant des cations alcalins (Ca⁺⁺), qui remplacent les ions Na⁺ et K⁺. Ces échanges ioniques créent des forces électrostatiques, entraînant l'agrégation des particules d'argile en agrégats plus gros et friables ([Hu et al., 2015](#)). Enfin, la chaux élève le pH du sol jusqu'à 12,6, une valeur comparable à celle d'une solution aqueuse saturée en chaux ([Julien et al., 2023](#)).

1.5.3.1 Capacité d'échange cationique :

Les processus de réaction d'échange cationique et de flocculation contribuent à augmenter la plasticité, la maniabilité, la résistance et la capacité de déformation du sol stabilisé.

Habituellement, cette phase de flocculation produit des sols qui sont plus aisés à mélanger, à manipuler et à compacter. Ces réactions instantanées ont un rôle majeur dans la réduction du rétrécissement et de l'expansion du sol. D'après et ([Ahmed, 2010](#)), il est recommandé d'ajouter entre 3 % et 5 % de chaux, par rapport au poids sec du sol, afin d'améliorer significativement ses

capacités de charge. Ces réactions d'échange cationique sont généralement considérées comme réversibles. En présence d'eau, des réactions d'échange cationique et de flocculation-agglomération se produisent, entraînant des modifications dans les propriétés et la structure du sol. Ce processus améliore instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et la déformabilité du sol.

Selon les travaux de (Afès & Didier, 2000), les données recueillies sur divers échantillons d'argile naturelle et traitée avec des teneurs en chaux de 3 % et 6 % montrent que la capacité d'échange cationique (CEC) diminue légèrement à mesure que la proportion de chaux augmente.

1.5.3.2 Réaction pouzzolanique

Selon (Firoozi et al., 2017), à des niveaux de pH élevés, dus à l'hydratation de la chaux vive et à l'ionisation de l'hydroxyde de calcium , les silicates et les aluminates présents dans le sol peuvent se dissoudre, comme le montre leur diagramme de solubilité (Figure 1.5).

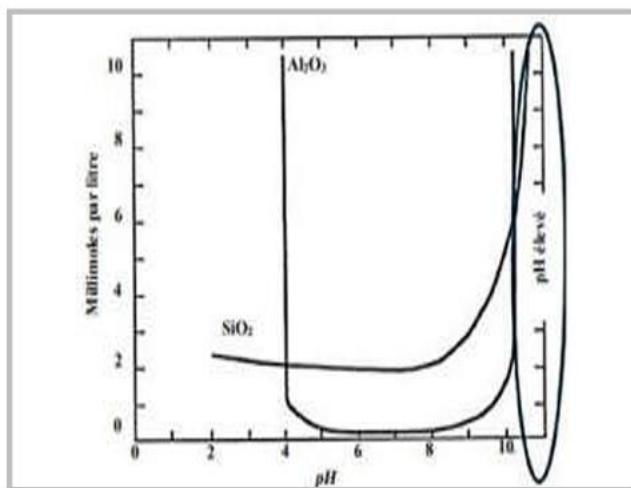


Figure1. 5: : Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH Little (Thi-Thanh-Hang NGUYEN, 2015)

La chaux, lorsqu'elle se dissout dans l'eau du sol, libère des cations de calcium (Ca^{2+}) et des anions hydroxyles (OH^-), ce qui contribue à saturer la solution en calcium et provoque une hausse du pH. Dans un milieu alcalin et en présence d'une saturation en ions calcium, les argiles réagissent par une attaque qui libère de l'alumine et de la silice. Ces substances interagissent par la suite avec le calcium contenu dans le sol et les hydroxydes dérivés de la chaux en présence d'eau. Cette réaction provoque la création d'hydrates de calcium comparables à ceux trouvés dans les ciments, comme

les silicates de calcium hydratés (CSH), les aluminaux de calcium hydratés (CAH) (référez-vous à la figure 1.6), et les aluminosilicates de calcium hydratés (CASH).

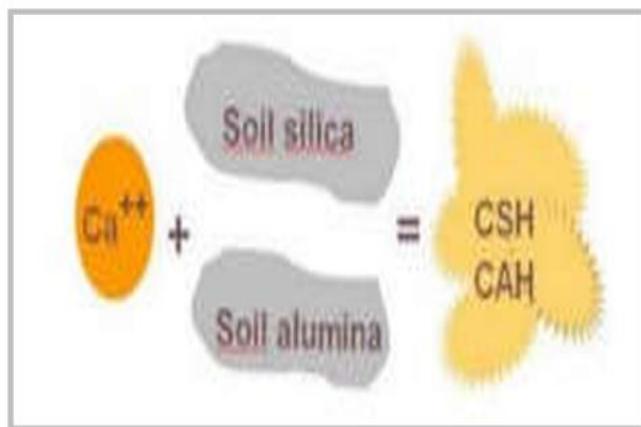


Figure1. 6: Réaction pouzzolanaque (Little, 1987)

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

Plusieurs recherches et études expérimentales ont analysé l'influence des ajouts de minéraux sur les caractéristiques physico-mécaniques et la longévité des sols argileux. La possibilité de stabilisation est fonction du genre de sol, de la quantité et du mélange de stabilisants, tout comme de la durée de cure. Selon (Almeasar et al., 2021), l'étude a porté sur l'influence de l'intégration de cendres de palmier dattier (DPA) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers de terre stabilisés à la chaux. Des échantillons de mortier de terre contenant de la chaux ont été élaborés, avec l'incorporation de différentes proportions de DPA (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %) en relation avec le poids de la chaux. Voici les résultats de cette recherche :

La figure 1.7 montre comment la masse volumique apparente du mortier de terre varie en fonction de l'incorporation de DPA. Les données montrent que la densité apparente fluctue entre 1505 et 1612 kg/m³. Une élévation de la concentration en DPA jusqu'à 6 % provoque une augmentation de la densité sèche apparente.

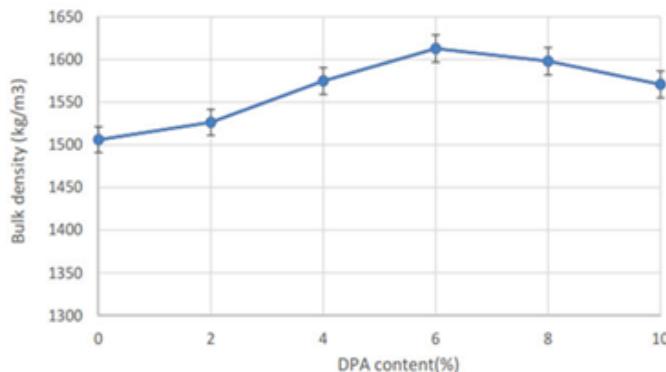


Figure1. 7: Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA

Les résultats de la résistance à la compression, à l'état sec (DCS) et à l'état humide (WCS), sont présentés dans la figure 1.8. L'incorporation de 6 % de DPA a permis d'améliorer la DCS et la WCS des échantillons de **21,7 %** et **16,5 %**, respectivement, par rapport aux échantillons ne contenant que de la chaux.

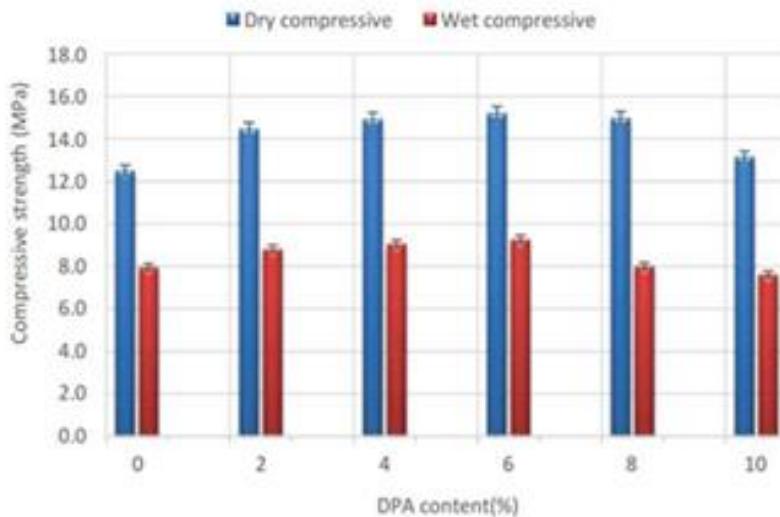


Figure1. 8 Densité apparente sèche de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA.

(Izemmouren et al., 2015) a étudié l'impact de la quantité de pouzzolane naturelle (NP) à divers niveaux de chaux sur la résistance à la compression à sec des briques en terre comprimée (Figure 1.9). Les observations montrent que l'augmentation du contenu en NP jusqu'à 30 % accroît la résistance à la compression sèche. Au-delà de cette concentration, la résistance décroît pour les

différents dosages de chaux. La résistance à la compression à sec des briques de terre comprimée s'accroît d'environ 2,94 %, 6 % et 8,22 % pour des proportions de chaux respectives de 6 %, 8 % et 10 %. Ces chiffres s'appliquent dans une plage variant de 0 à 30 % du NP.

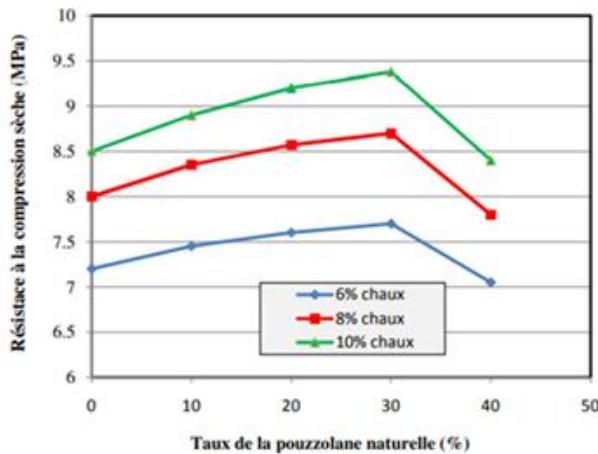


Figure1. 9: Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (Izemmouren, 2016).

On remarque de la même manière l'effet de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction des briques. Les observations révèlent que l'intégration de 30 % de pouzzolane naturelle entraîne une augmentation notable des résistances à la traction, sans tenir compte des diverses proportions de chaux (Figure 1.10).

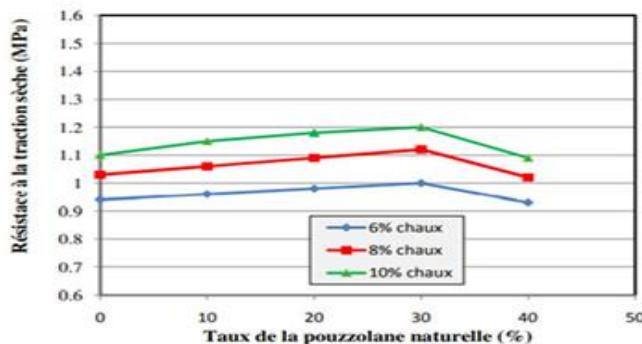


Figure1. 10 Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche (Izemmouren, 2016).

(Izemmouren et al., 2015) a étudié l'influence du dosage en ajouts minéraux – notamment la pouzzolane (PN), la poudre de verre (PV) et le laitier granulé (LG) – sur la durabilité des briques

de terre comprimée, stabilisées avec différentes proportions de chaux. Ces briques ont été compactées sous une pression de 10 MPa, puis conservées à température ambiante pendant une période maximale de 28 jours. Les résultats obtenus ont révélé que l'augmentation du pourcentage des ajouts minéraux améliore globalement la durabilité des briques. Toutefois, le comportement de chaque type d'ajout varie selon le temps de cure et la proportion introduite dans le mélange. La performance de ces ajouts dépend principalement de leur réactivité pouzzolanique ainsi que de leur interaction chimique avec la chaux, soulignant ainsi l'importance de bien adapter le type et le dosage des ajouts aux conditions spécifiques de durcissement. La totalité de l'absorption varie selon le dosage des ajouts à diverses étapes de maturation. Il est observé une diminution de l'absorption totale au fur et à mesure que la quantité d'ajouts s'accroît pour diverses périodes de durcissement. Sur le plan du pourcentage, cette réduction correspond à Pour les dosages de 0 % à 30 % de NP, PV et LG à l'âge de 28 jours, les taux respectifs sont de 15,28 %, 32,25 % et 38,31%.

Outre les résultats cités, ([Izemmouren et al., 2015](#)) a aussi étudié l'absorption capillaire selon le dosage des ajouts. Les résultats montrent que chaque ajout a un effet bénéfique sur l'absorption capillaire. L'atténuation de cette absorption est conditionnée par la nature et la quantité des ajouts. On note notamment une légère baisse de l'absorption à 28 jours, avec une diminution approximative de 10,10 % pour un dosage de 30 % du NP.

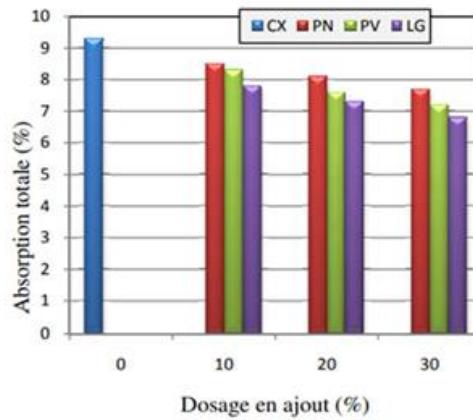


Figure1. 11 influence du dosage des ajouts sur l'absorption totale. [Izemmouren \(2016\)](#).

Almeasar et al. (2021) ont étudié l'effet de l'ajout de cendre de palmier dattier (DPA) sur les propriétés physiques, mécaniques ainsi que sur le comportement hygroscopique des mortiers de terre. Pour cela, ils ont élaboré des échantillons de mortier de terre stabilisé à la chaux, enrichis en DPA à des dosages variés (0, 2, 4, 6, 8 et 10 % en poids par rapport à la chaux). Les résultats ont révélé que :

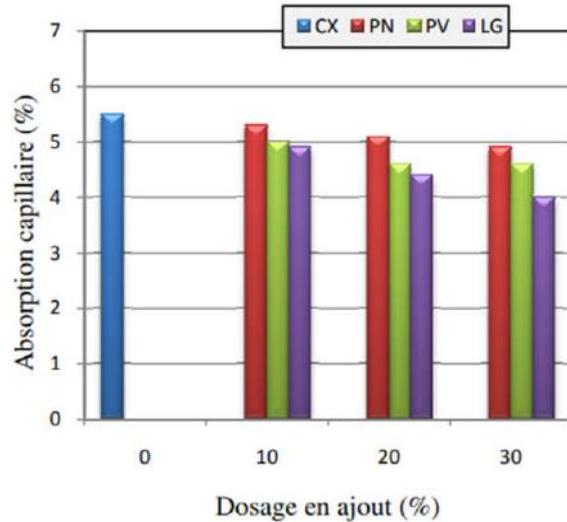


Figure1. 12: influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire. [Izemouren \(2016\)](#).

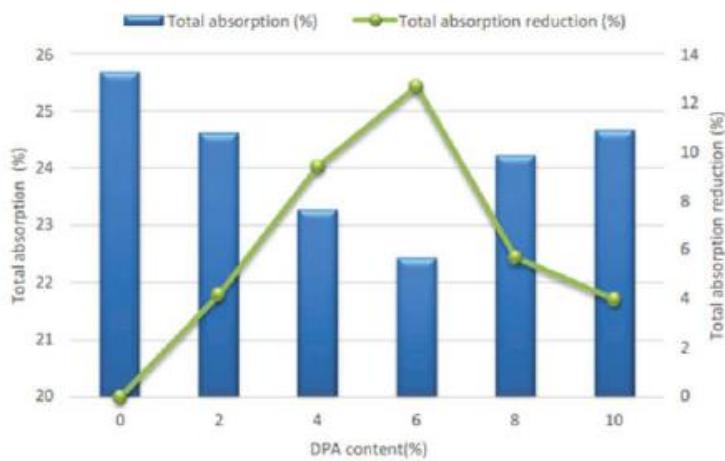


Figure1. 13: Absorption totale de mortier de terre en fonction de la teneur en DPA, après test d'ébullition. [Almeasar et al. \(2021\)](#).

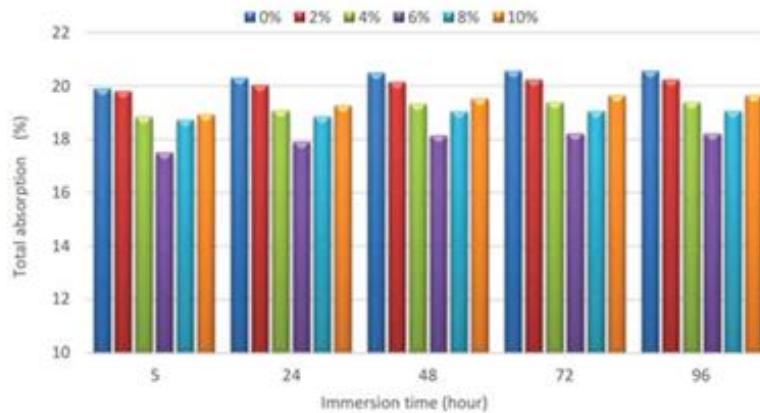


Figure1. 14 :Absorption totale d'EMS en fonction de la teneur en DPA, après immersion dans l'eau. [Almeasar et al. \(2021\)](#)

L'étude présentée met en évidence les résultats d'essais d'immersion d'échantillons dans de l'eau ordinaire et de l'eau bouillante, ainsi que l'effet de l'ajout de DPA sur leur capacité d'absorption. Lors de l'immersion dans l'eau à température ambiante, une augmentation progressive de l'absorption d'eau a été observée, atteignant un pic après 5 heures, avant de se stabiliser. En revanche, l'immersion dans l'eau bouillante a entraîné un taux d'absorption plus élevé, aboutissant à une saturation complète des échantillons. L'introduction de DPA dans la formulation a permis de réduire significativement l'absorption totale d'eau, comparativement aux échantillons de référence sans DPA.

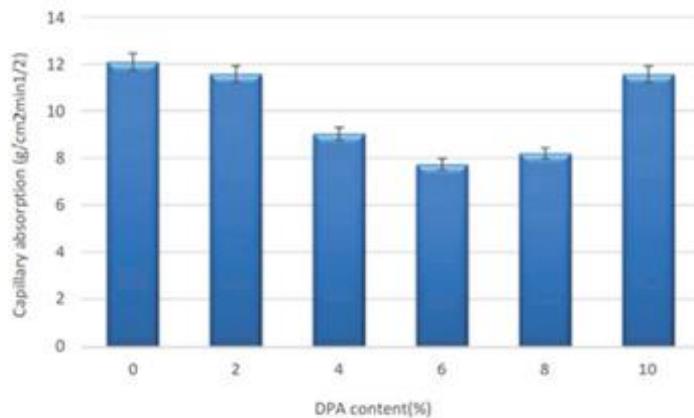


Figure1. 15: Absorption capillaire de l'EMS en fonction de la teneur en DPA. [Almeasar et al. \(2021\)](#).

Par ailleurs, les chercheurs ont aussi étudié les résultats liés à l'absorption capillaire en fonction du DPA (Baroghel-Bouny et al., 2002; Savadogo et al., 2015). Les informations ont montré que le taux d'absorption le plus faible était de 6 % de DPA, ce qui correspond à une baisse de 36 % comparé à l'absence de DPA (0 %). L'association de DPA et de chaux a comblé les pores du sol et cimenté ce dernier, entraînant une diminution de l'absorption capillaire.

Le tableau 1.1 offre un résumé des travaux précédents qui se concentrent sur le recours à divers additifs minéraux lors de la production de matériaux en terre. Les conclusions mettent en évidence que ces additifs minéraux sont considérés comme des matières alternatives écologiques, utilisées dans la fabrication de ces matériaux à base de terre.

Tableau 1: Travaux antérieurs sur l'utilisation des différentes additifs minéraux dans la production des matériaux à base de terre

Référence	Type de bloc	Stabilisant(s)	Additif(s) / Résidu(s)	Résumé des résultats
(K.S. Almeasar et al., 2021)	Blocs de terre comprimée	Chaux	Cendre de palmier dattier (0–10 %)	Réduction de la porosité (~8 %), augmentation de la densité, diminution de l'absorption capillaire et du gonflement.
Aninda and M.S. Islam, 2023	Blocs de terre comprimée	Ciment (4, 6, 8 %)	Déchets de béton en poudre (0.5–20 %)	Diminue l'absorption d'eau, mais réduit aussi la résistance à l'humidité comparée à la compression sèche.
O.G. Aluko et al., 2015	Blocs de terre comprimée	Ciment	Poudre de verre usagée	Diminution de la résistance mécanique avec ajout de verre. Résistance plus élevée sans déchets de verre.
Ouarda et al., 2015	Blocs de terre comprimée (traitement vapeur)	Chaux	pouzzolane naturelle (10–30 %)	Le traitement vapeur à 75°C/24h augmente fortement les résistances mécaniques (tensile, compression sèche et humide). Résistance maximale avec 30 % de pouzzolane naturelle et 10 % de chaux.
Zaidi et al., 2021	Blocs adobe	Chaux (12 %)	Déchets de palmier dattier (0.3–0.9 %)	Amélioration de la résistance à la traction (+67 %), résistance à l'abrasion, érosion et cycles humidification/séchage. Mais effets négatifs sur la compression, absorption d'eau et gonflement.
Bezaou et al (2024)	Blocs de terre comprimée	Chaux	Sable de dune + débris de briques concassées + DPA (0–10 %)	Réduction de la porosité (~8 %), augmentation de la densité, diminution de l'absorption capillaire et du gonflement.

1.7 Généralités sur les déchets de brique

1.7.1 Déchets De Brique

L'objectif de cette section est de fournir des informations sur les résidus de briques appelés « briquaillons » ou « brique concassée ». Bien que la brique soit utilisée à grande échelle à travers le monde, les données concernant ces déchets et leur valorisation comme granulats dans le béton demeurent limitées, en raison de leur usage encore peu répandu ([Darshita & Anoop, 2014](#)). En Algérie, les travaux de recherche portant sur ces matériaux sont très rares, selon les sources disponibles. Le terme « briquaillons » désigne généralement des fragments de briques issus soit de démolitions, soit de défauts de cuisson (comme une cuisson excessive).

1.7.2 Définition de brique :

La brique est un parallélépipède rectangle, de terre argileuse crue et séchée au soleil ou cuite au four, utilisé comme matériau de construction. L'argile est souvent mêlée de sable ([France, 2006](#)).

1.7.3 Méthode de fabrication des briques

La fabrication des briques constitue un processus élaboré qui permet de produire en grande quantité à un coût abordable, à condition de disposer d'une organisation rigoureuse. C'est sans doute pour cette raison qu'il a fallu attendre l'apparition de sociétés structurées, vers le troisième millénaire avant J.-C., pour que la cuisson des briques soit envisagée, bien que la poterie fût déjà connue depuis l'époque néolithique.

La fabrication d'une brique passe par cinq étapes principales ([France, 2006](#))

- **L'extraction de l'argile** : jusqu'à la fin du XIXe siècle, cette opération s'effectuait manuellement à l'aide de pelles, avant l'apparition des premières machines d'excavation motorisées.
- **La préparation du mélange** : elle consiste à combiner une ou plusieurs variétés de terres argileuses, ou du limon, avec de l'eau et des matériaux dits « allégeants », comme le sable.
- **Le moulage** : dès l'Antiquité, on utilise des moules en bois, avec ou sans fond, ayant les dimensions standardisées des briques à confectionner.
- **Le séchage** : il est essentiel de laisser la brique crue sécher lentement avant sa cuisson. Aujourd'hui, ce séchage se fait dans des chambres spéciales, mais autrefois, les briques séchaient à l'air libre sous de grands abris.

- **La cuisson** : c'est l'étape la plus délicate du procédé ; les briques sont cuites dans des fours spécialement conçus à cet effet ([France, 2006](#)).

1.7.4-Types de brique

Il existe différents types de briques pleines avec des aspects de surface variée.

On distingue différents types de briques :

- La brique de terre crue, qui peut aussi contenir des fibres (pailles, lin, crin...).
- La brique de terre compressée.
- La brique cuite pleine, matériau traditionnel très ancien, avec une variante appelée, brique pleine perforée (les perforations sont perpendiculaires au plan de pose).
- La brique légère et isolante (qui flotte sur l'eau) utilisée une terre silico-magnésienne sans consistance mais qui mélangée à un vingtième environ d'argile plastique produisait des briques aussi résistantes que des briques ordinaires, mais très poreuses, conduisant mal la chaleur ou le froid et flottant sur l'eau.
- La brique cuite creuse, plus légère (et donc moins coûteuse à transporter) et plus isolante, est devenue la plus utilisée. Ses perforations sont parallèles au plan de pose de manière à ne pas diminuer sa résistance à la pression.
- La brique de chanvre, ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique,
- La brique non gélive.
- La brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc.
- Selon le type, elles peuvent connaître différents usages :
- Briques de parement : destinées à rester apparentes et sont purement décoratives.
- Briques pleines : destinées à la construction de murs extérieurs, porteurs.
- Briques plâtrières : servent à construire les cloisons intérieures et les murs de refend ([Herbert, 2003](#)).

1.7.5 Propriétés physico-chimiques de la brique

Les caractéristiques physico-chimiques des briques dépendent essentiellement du type d'argile utilisé lors de leur fabrication. Parmi les principales catégories d'argiles entrant dans la composition des briques cuites, on distingue les argiles illitiques, reconnaissables à leur teinte allant du brun-gris au rouge, les argiles kaoliniques, ainsi que les argiles bravaisitiques, souvent de couleur orange à rose. En

plus des composants argileux, la pâte contient des éléments métalliques dits « réfractaires », c'est-à-dire capables de résister à des températures de fusion bien supérieures à celles atteintes dans les fours à briques (généralement entre 800 °C et 1000 °C). Parmi ces éléments, on retrouve principalement la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3), qui jouent un rôle crucial dans la stabilité thermique du matériau. La couleur finale des briques est largement influencée par la présence d'oxydes métalliques, qui agissent comme des agents colorants. Les principaux oxydes responsables de la coloration sont l'oxyde de fer, l'oxyde de titane et l'oxyde de manganèse. D'autre part, la fusion des composants est facilitée par des agents fondants, classés en deux groupes : les oxydes alcalins (comme les oxydes de sodium et de potassium) et les oxydes alcalino-terreux (tels que la chaux et la magnésie). Par ailleurs, la composition minéralogique des déchets de briques rouges peut être analysée par la méthode de fluorescence X, permettant de déterminer avec précision les éléments présents dans le matériau (France, 2006).

1.7.6 Valorisation des déchets de briques

Les déchets de briques représentent une proportion importante des déchets issus de la démolition et des décombres de chantiers. Toutefois, les informations disponibles sur leur devenir et leur valorisation restent encore limitées.

Sur le plan technique, ces déchets peuvent être recyclés en tant que composants dans la fabrication de matériaux de construction, notamment dans la maçonnerie. Toutefois, leur valorisation reste freinée par l'absence quasi-totale de cadres réglementaires spécifiques encadrant leur traitement, leur transformation et leur réintégration dans le cycle de production (Senisna, 2018).

1.7.7 Réutilisation des briques

Lors des opérations de démolition, les briques encore intactes peuvent être récupérées, nettoyées et réemployées telles quelles dans d'autres projets. Cette réutilisation peut avoir lieu sur le même site ou sur d'autres chantiers, selon les besoins.

Certaines briques anciennes, notamment celles faites à la main ou présentant une patine particulière, sont très recherchées pour des travaux de rénovation ou de restauration de bâtiments historiques.

Leur aspect authentique et leur qualité confèrent une valeur esthétique et patrimoniale importante (Senisna, 2018).

1.7.8 – Recyclage des briques :

Le recyclage des briques concerne principalement les éléments cassés ou trop endommagés pour être réutilisés directement. Ces déchets subissent alors un traitement mécanique, généralement sous forme de concassage, pour être transformés en granulats.

Ces granulats peuvent être intégrés dans la fabrication de bétons non structurels, utilisés en tant que matériaux de remblai, couches de fondation routière, ou encore pour des applications paysagères. Le recyclage, à la différence de la réutilisation, nécessite un traitement préalable du matériau pour lui attribuer une nouvelle fonction. Il contribue ainsi à la réduction de la consommation de matières premières vierges et des volumes de déchets ([Senisna, 2018](#)).

1.8 Approche adoptée pour le recyclage des déchets de briques

1.8.1 L'opération de récupération des déchets de briques

La première étape consiste à récupérer les déchets de briques défectueuses et cassées provenant des usines de fabrication, car il est courant que des rebuts importants soient générés au cours du processus de production. Des briques usagées sont également collectées à partir des gravats issus de la démolition de bâtiments.



Figure1. 16: Remblai de déchets de briques dans une usine

1.8.2 Procédé de fragmentation des briques

Une fois la collecte terminée, les résidus de briques sont introduits dans un concasseur de pierres, permettant d'obtenir des fragments de petite taille. Ensuite, ces fragments sont de nouveau broyés à l'aide d'une machine de type Los Angeles. Pour ce faire, 5 kg de granulés de brique sont mélangés à 12 billes en acier, puis placés dans la machine qui effectue 1500 rotations. Ce traitement permet d'obtenir des granulés encore plus fins que ceux issus du premier concassage. Le dernier processus de fragmentation s'effectue à l'aide d'une machine de type micro-Duval. À cette étape, les dernières



Figure1. 17: Les granulons des briques que nous avons obtenus De la machine concasseur

briques extraites de la machine de Los Angeles sont introduites dans l'appareil, accompagnées de 2 kilogrammes de briques et de 500 grammes de granulés de fer. La machine effectue alors une rotation à 2000 tours. Ce traitement permet finalement d'obtenir une poudre ainsi que des granulés très fins issus de briques d'argile de composition hétérogène.



Figure1. 18 : Les granules des briques que nous avons obtenus De la machine los Anglos



Figure1. 19: Granulés de brique dans le Moule de la machine de Micro Duval avec granulés de fer

1.8.3 Tamisage de la poudre de brique :

Dans cette étape, la poudre de brique ainsi que les granulés de tailles variées sont soumis à un tamisage manuel. Pour ce faire, une série de tamis aux ouvertures progressives a été utilisée, avec les dimensions suivantes (en mm) : 5,0 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,32 – 0,16 – 0,08. Le tamisage est poursuivi jusqu'à l'obtention d'une poudre suffisamment fine pour traverser le tamis de 0,08 mm.



Figure1. 20: Tamisage de la poudre et granulés des briques

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique autour des matériaux de base intervenant dans notre étude, à savoir le sol, l'argile et le mortier argileux. Nous avons mis en évidence les caractéristiques physiques et chimiques de ces matériaux, ainsi que leurs comportements dans différentes conditions. Une attention particulière a été portée aux méthodes de stabilisation, tant physiques que chimiques, utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux à base d'argile.

Cette revue de la littérature constitue une base essentielle pour comprendre les mécanismes d'interaction entre les matériaux et pour orienter notre démarche expérimentale dans les chapitres suivants. Elle permet également de situer notre travail dans le contexte des recherches antérieures et de mieux cerner l'apport potentiel de l'utilisation de déchets de brique rouge dans l'amélioration de la stabilité du mortier argileux.

CHAPITRE 02:

MATERIAUX ET

METHODES

EXPERIMENTALES

CHAPITRE 02: MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1 Introduction

Ce chapitre aborde dans un premier temps les propriétés des matériaux constitutifs, ainsi que les différentes formulations élaborées pour cette étude, accompagnées de leurs protocoles expérimentaux. Par la suite, les méthodes d'évaluation des performances mécaniques et de la durabilité des mortiers de terre sont présentées, permettant d'apprécier leur comportement sous diverses sollicitations.

2.2 Matériaux utilisés

Dans le cadre de cette étude, nous avons envisagé la valorisation du brique rouge broyés en tant qu'ajout aux chaux afin de stabiliser le mortier de terre.

2.2.1 Sol

2.2.1.1 Origine du sol

Le sol utilisé dans cette étude provient de la région de Biskra. Le choix des sites de prélèvement s'est basé sur leur accessibilité et la grande disponibilité du matériau dans cette zone.



Figure2. 1: le sol utilise dans l'étude

2.2.1.2 Propriétés physiques du sol

Avant d'être soumis aux différents essais, le sol est tamisé à 2 mm, conformément aux recommandations de (Houben & Guillaud, 2006). À cet effet, les essais suivants ont été réalisés :

A) Densité (NF P94-054)

La masse volumique de l'échantillon reflète en grande partie ses caractéristiques techniques. Elle est déterminée à l'aide de l'essai au pycnomètre, conformément à la norme (NF, 1991).

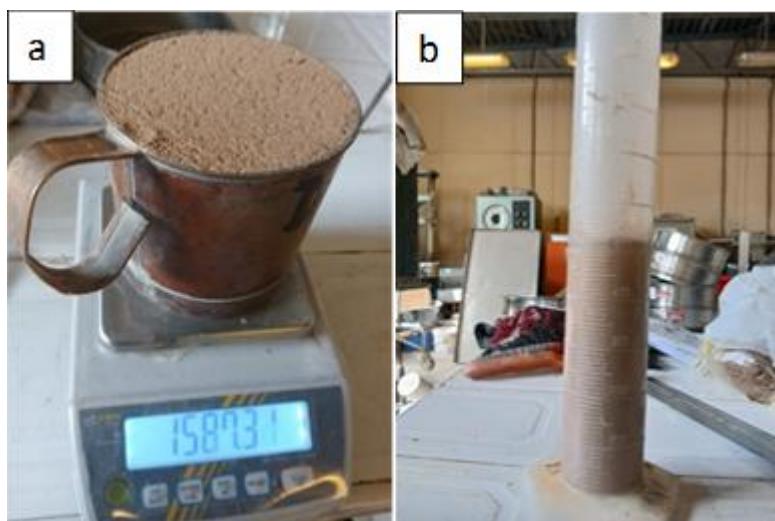


Figure 2. 2 :Mesure de la masse volumique (a) Apparente, (b) Absolue.

Le Tableau 1 montre les masses volumiques apparentes et absolues du sol étudié.

Tableau 2. 1:Les masses volumiques du sol.

Massé volumique apparente de sol $\rho(\text{g/cm}^3)$	Massé volumique absolue de sol $\gamma_s(\text{g/cm}^3)$
1.32	2.54

B) Limites d'Atterberg (NF P 93-051)

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 (NF, 1993). 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 plastiqué (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 :

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



Figure2. 3:Détermination de WL et WP.

Les résultats des essais sont présentés sur le tableau

Tableau2. 2:Limites d'Atterberg de sol.

Limites d'Atterberg du sol		
Limite de liquidité (WL%)	Limite de plasticité (WP %)	Indice de plasticité (IP %)
29	18.85	11

L'évaluation des sols fins se base sur les normes de plasticité établies par les limites d'Atterberg. Le diagramme de plasticité illustré ci-dessous (Figure 2.4) fournit des détails sur ces critères. Dans ce diagramme, la localisation d'un point symbolique est définie par sa valeur horizontale, qui coïncide avec la limite de liquidité, et par sa valeur verticale, qui correspond à l'indice de plasticité.

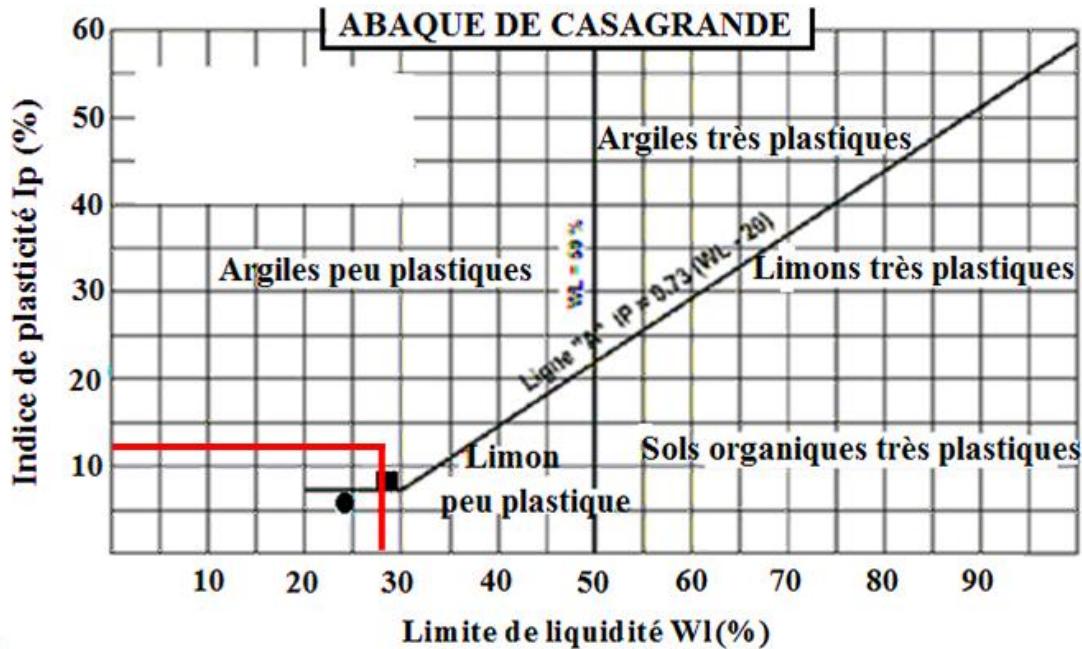


Figure 2.4: Classification du sol étudié sur le diagramme de Casagrande.

Selon le schéma, nous pouvons conclure 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, 1996).
- La sédimentométrie selon les normes (NF, 1992).

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 sédimetométrie est pratiqué. Les résultats sont illustrés dans la figure

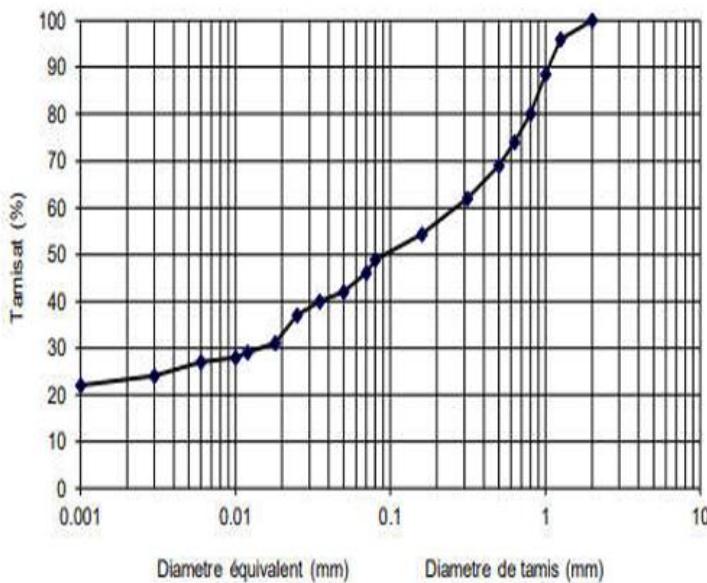


Figure 2.5: Granulométrie du sol.

e) Essai au bleu de méthylène (NF P 94-051, 1994)

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.

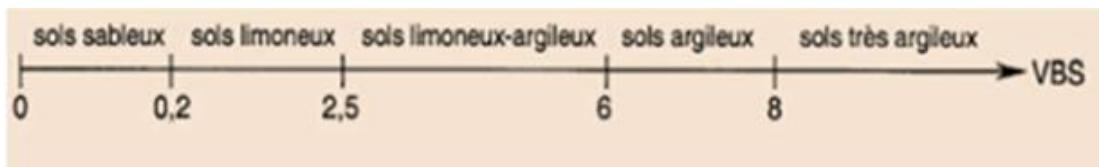


Figure 2.6: Classification du sol selon la valeur de VBS (NF P 94-068).



Figure2. 7:Essai au bleu de méthylène

Le Tableau 2.3 présente les résultats obtenus.

Tableau2. 3:Valeur de Bleu méthylène.

Valeur de bleu VBS de sol	Classification de sol
4.5	Sol limoneux argileux

2.2.2 Sable concassé

2.2.2.1 Propriété physique du sable

Dans tous les mélanges, le sable employé est du sable concassé (0/3), provenant des carrières de la région de Biskra en Algérie. Il a été principalement utilisé pour réaliser des rectifications de précision du sol.

Tableau2. 4: Masses Volumiques du sable concassé.

La masse volumique apparente de sable ρ (g/cm ³)	La masse volumique absolue de sable γ_s (g/cm ³)
1.43	2.58

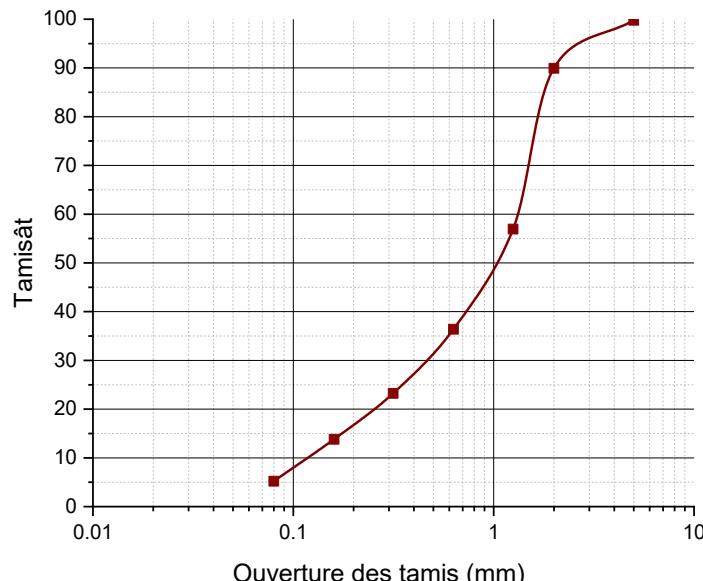


Figure2. 8: Analyse granulométrique du sable concassé.

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 les tableau

Tableau2. 5:Caractéristiques physiques (g/cm³)

Désignation	Masse volumique absolue	Masse volumique absolue
Valeurs	1.89	0.608



Figure2. 9: la chaux vive

Tableau2. 6: Analyse chimique (% massique)

Composant	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Valeurs	82.77	10.63	3.27	1.35	1.88

2.2.4 Le déchet de brique rouge broyés

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

Le broyage de ce brique a été effectué au sein du laboratoire des sciences des matériaux de construction (MDS) de l'université de Annaba, à l'aide d'un broyeur.

**Figure2. 10 :** Déchets de briques broyées**Tableau2. 7:** Masses Volumiques du déchets de brique broyés.

Masses Volumiques apparent g/cm ³	Masses Volumiques absolue g/cm ³
0.951	2.24

2.3 Conduite de l'expérience

2.3.1 Matériel spécifique

Les éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³) employées pour effectuer les divers tests inclus dans notre programme de recherche sont démoulées en déboulonnant le moule prismatique.



Figure2. 11: Moule prismatique.

2.3.2 Composition des mélanges

Cette recherche vise à examiner l'effet de l'association du déchets brique broyé et de la chaux sur la longévité du mortier à base de terre. Dans cette situation, les proportions de sol et de sable ont été conservées stables, tandis que le pourcentage de chaux et le taux de brique rouge broyé ont été ajustés selon le poids du mélange sec.

Le tableau 2.8 présente les proportions des mélanges expérimentaux.

Tableau2. 8 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude.

Sol (%)	Sable (%)	La chaux (%)	Brique rouge broyés
Par rapport au mélange sec (sol + sable)		Par rapport au poids du mélange sec global	Par rapport au poids de la chaux
70	30	11	0
70	30	11	10
70	30	11	20
70	30	11	30
70	30	11	40

2.3.3 Préparation des mélanges

la première étape a consisté à tamiser la terre à l'aide d'un tamis de 2 mm, puis à la faire sécher pendant 24 heures. Après le séchage, les différents matériaux ont été préparés : sable, chaux, terre et poudre de brique rouge. Ces composants ont été mélangés manuellement pendant environ 90 secondes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.

Ensuite, 1400 ml d'eau ont été ajoutés, puis le mélange a été poursuivi à la main pendant 2 minutes afin d'obtenir une pâte plastique bien homogène. Cette pâte a ensuite été versée dans des moules prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm, puis compactée par vibration afin d'éliminer l'air emprisonné à l'intérieur.

Les moules avaient été préalablement lubrifiés à l'intérieur afin de faciliter le démoulage sans endommager les échantillons. Après remplissage, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique et laissés au repos pendant 72 heures. Par la suite, ils ont été placés dans des sacs en plastique hermétiques, puis séchés au four à 65 °C pendant 7 jours. À l'issue de cette période, les échantillons étaient prêts pour les essais



Figure2. 12 : Préparation de la pâte de terre dans les moules.

2.3.4 Mode de cure des mortiers

Une fois démoulées, les éprouvettes de mortier sont manipulées soigneusement pour prévenir tout contact avec les arêtes, compte tenu de leur fragilité. Elles sont par la suite recouvertes d'une pellicule plastique afin d'assurer leur imperméabilité. Pour parfaire l'hydratation du liant, les briques sont gardées au laboratoire à une température de 20 ± 2 °C pendant une journée avant d'entrer dans la phase de cure. Puis, toutes les éprouvettes analysées sont mises dans une étuve à 65 ± 2 °C pour une durée de 10 jours. Une fois que le film plastique est enlevé, les éprouvettes sont séchées dans l'étuve jusqu'à obtenir une masse stable

2.4 Réalisation des essais

2.4.1 Propriétés mécaniques

2.4.1.1) Essai de la durabilité

Des tests de compression et de tension par flexion ont été effectués pour évaluer les résistances mécaniques.

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 :

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

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

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en (mm²).



Figure2. 13 : Essai de compression.

b) Essai de traction par flexion (EN NF 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. 35 La résistance en flexion (en N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$RT = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d_1 \times d_2}$$

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.



Figure2. 14: Essai de flexion.

2.5 Propriétés physique

2.5.1 Mesure de la masse volumique (NFP94-054, 1994) :

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 suivante :

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

M : la masse d'échantillon en (g).

V : volume d'éprouvette en (cm^3).

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 (Cb), représente

le taux d'absorption après 10 minutes. Ce coefficient (Cb) se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$Cb = : \frac{100 \times (Mh - Md)}{s \times \sqrt{t}}$$

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

Md : 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. 15: Essai d'absorption par capillaire.

2.6.2 Absorption totale d'eau (NF XP- P 13 901)

L'absorption d'eau par le produit est évaluée selon les critères de la norme expérimentale NF XP 13-901. L'idée est de plonger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (consulter la figure 2.20). Le taux d'absorption après 10 minutes est représenté par le coefficient d'absorption d'eau Cb. On calcule ce coefficient Cb en utilisant la formule ci-dessous :

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

Où :

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

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



Figure 2. 16: Essai d'absorption totale.

2.6.3 Gonflement

La mesure du gonflement des briques d'adobe se fait selon la procédure suivante (XP-P 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 : (L0).
 3. Placer les briques dans un bac d'eau (voir figure 2.14).
 4. Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 minutes, puis mesurer la distance entre les plots : (L1).

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

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

Avec :

L_0 : la distance avant immersion.

L_1 : la distance après immersion.



Figure 2. 17: Essai de gonflement.

2.6.4 Résistances à l'abrasion (NF XP- P 13 901)

Une fois que la brique a été maintenue jusqu'à atteindre une masse stable et qu'elle a été laissée à se stabiliser pendant au moins 24 heures, elle doit être pesée pour déterminer sa masse initiale (m_0) en grammes.

1-Placez la brique sur une surface plane pour le nettoyage. Positionnez la brosse métallique sur la brique, puis frottez la surface de celle-ci en réalisant un mouvement de va-et-vient par seconde pendant une minute (ce qui équivaut à 60 mouvements de va-et-vient), sans exercer de pression verticale sur la brosse pendant le processus.

2- Une fois le brossage terminé, débarrassez-vous des particules de brique qui se sont détachées, puis pesez-la une nouvelle fois pour obtenir son poids final (m_1).

On déduit à partir de cet essai le coefficient d'abrasion (Ca) de la brique, illustrant la déperdition de matière causée par le frottement de la surface abrasive.

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

Avec :

Ca : coefficient d'abrasion de la brique.

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

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

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

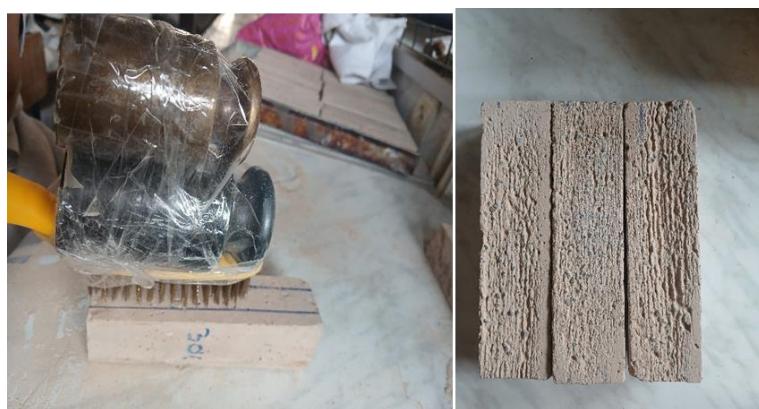


Figure 2. 18 : Essai d'abrasion.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a détaillé les spécificités des différentes matières premières utilisées pour la fabrication des blocs d'adobe développés dans le cadre de cette étude. Ces éléments comprennent le sol ainsi que divers stabilisateurs tels que le sable écrasé, la chaux et le brique broyée finement broyée.

Ce chapitre fournit une explication détaillée de la composition des mélanges et des techniques de production des briques, facilitant ainsi une étude minutieuse des résultats et une meilleure compréhension de l'influence des divers facteurs étudiés sur les caractéristiques de l'adobe.

Les données exposées dans ce chapitre proviennent de la documentation actuelle ainsi que des tests de caractérisation effectués durant cette recherche.

CHAPITRE 03:

RESULTATS ET

DISCUSSION

CHAPITRE 03: RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

L'intégration de déchets dans les matériaux de construction s'inscrit dans une démarche durable visant à optimiser les performances des structures tout en minimisant leur impact environnemental. Parmi ces déchets réutilisables, la brique rouge broyée, associée à la chaux, joue un rôle clé dans le renforcement des mortiers à base de terre, tant sur le plan mécanique que sur celui de leur durabilité.

Le premier chapitre de cette étude propose une analyse détaillée des propriétés physiques et mécaniques de la brique rouge broyée, ainsi que de son influence sur la durabilité globale des mortiers. Dans ce cadre, la réalisation d'essais expérimentaux est essentielle pour mieux cerner les mécanismes d'amélioration apportés par l'incorporation de ce déchet dans la matrice de terre.

L'étude se concentre particulièrement sur plusieurs paramètres déterminants affectant les performances du mortier de terre, notamment :

- La densité, qui permet d'évaluer la compacité du matériau et d'en déduire des informations sur sa porosité, sa masse volumique et son comportement mécanique global ;
- La résistance à la compression, indispensable pour apprécier la capacité du mortier à supporter des charges verticales et à garantir la stabilité des structures ;
- La résistance à la flexion, qui renseigne sur la tenue du mortier face aux efforts de traction et de flexion, fréquemment rencontrés dans des conditions réelles de sollicitation.
- L'absorption totale et capillaire, qui conditionne la résistance du matériau à l'humidité, aux infiltrations, et par conséquent à sa dégradation par l'eau ;
- Le gonflement, un phénomène critique pouvant compromettre la stabilité dimensionnelle des éléments en terre, surtout sous l'effet des variations climatiques ;
- La résistance à l'abrasion, indicateur clé de la durabilité mécanique face aux agressions physiques et à l'usure progressive ;

3.2 Les propriétés physico-mécaniques

3.2.1 l'impact des déchets de brique broyés sur la densité des mortiers :

Un essai de densité sèche a été réalisé afin d'évaluer l'effet de l'ajout de déchets de briques rouges broyées sur la densité globale des mortiers de terre. Après un séchage des éprouvettes au four pendant sept jours, celles-ci ont été pesées, et leur volume a été déterminé à partir des dimensions des moules ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$). La densité sèche a été ensuite calculée en divisant la masse sèche par le volume de l'échantillon.

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure suivante :

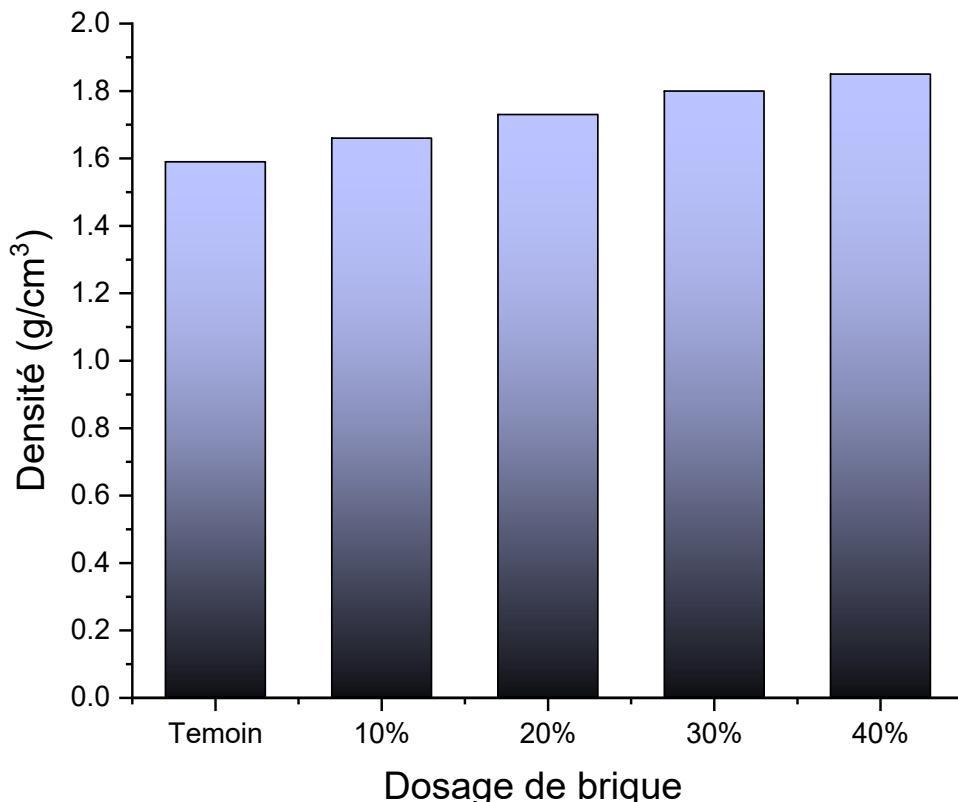


Figure3. 1: Influence du dosage du brique broyés sur la densité des mortiers de terre

La densité sèche reflète la compacité et la masse volumique du matériau sec. L'échantillon témoin présente une densité relativement faible. L'augmentation des pourcentages de brique broyée entraîne une densification notable du mortier. L'échantillon à 40 % enregistre la densité sèche la plus élevée, avec une augmentation de **16,35 %** par rapport à l'échantillon témoin, confirmant un meilleur remplissage des vides et une structure plus compacte.

Dans l'étude menée par Issam Aalil et al., [2019](#), la densité sèche des mélanges à base de brique rouge broyée a été mesurée afin d'évaluer leur compacité. Les auteurs rapportent que la densité du mélange sec contenant de la brique est de 1.58 g/cm^3 , tandis que celle du sable utilisé à titre de référence est de 1.54 g/cm^3 . Cette différence relativement faible indique que la brique broyée ne contribue pas à alléger le mortier, mais au contraire, participe à une légère augmentation de la densité, liée à sa texture plus compacte et à sa capacité à mieux occuper les vides dans la matrice.

3.2.2 La résistance à la flexion :

L'essai de flexion est utilisé pour mesurer la capacité des échantillons à résister aux forces de flexion, ce qui reflète leur résistance à la traction et leur ductilité. L'essai a été réalisé à l'aide d'une machine de flexion à trois points, où l'échantillon est posé sur deux appuis, et une charge progressive est appliquée au centre jusqu'à la rupture ou la déformation visible.

.Nous avons les résultats dans la courbe suivante :

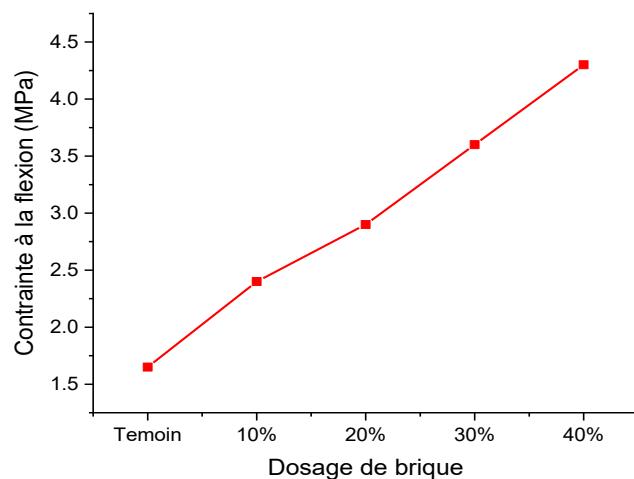


Figure3. 2: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à la flexion des mortiers de terre

L'échantillon témoin montre une faible résistance initiale. L'ajout progressif de brique broyée conduit à une amélioration continue de cette propriété. L'échantillon contenant 40 % de brique broyée enregistre la meilleure performance en flexion, confirmant l'effet structurant et la meilleure cohésion du mélange. L'augmentation de résistance observée à 40 % représente un **gain de 160,6 %** par rapport à l'échantillon témoin, ce qui traduit une amélioration considérable de la ductilité du matériau. Ces résultats sont en accord avec ceux de l'étude menée par (Aalil et al., 2019). Les résultats confirment que l'augmentation de la teneur en déchet de brique broyé améliore directement la résistance à la compression en raison de ses propriétés pouzzolaniques,

3.2.3 La résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques essentielles pour évaluer la durabilité des matériaux de construction. Dans cet essai, une machine de compression a été utilisée sur des échantillons coupés en deux avec des dimensions de $4 \times 4 \times 8$ cm. Une charge progressive a été appliquée jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Des échantillons contenant différents pourcentages de brique rouge broyée (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) ont été testés, avec les résultats suivants :

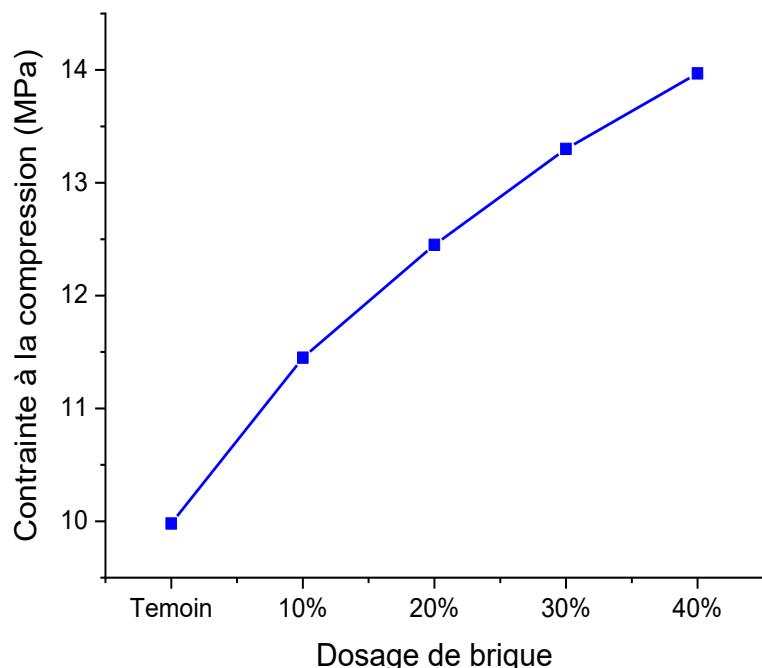


Figure3. 3: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à la compression des mortiers de terre

Cet essai mesure la résistance du mortier sous une charge verticale. L'échantillon témoin présente une faible résistance de 9,98 MPa. De manière générale, l'augmentation des pourcentages de déchets de brique broyée entraîne une amélioration notable de la résistance mécanique. La meilleure performance est enregistrée à 40 %, avec une résistance maximale de 13,97 MPa. Ces résultats confirment que l'ajout progressif de brique broyée améliore la cohésion et la portance du mortier par rapport à l'échantillon témoin, avec un gain de résistance particulièrement marqué à **40 %**, ce qui reflète un renforcement significatif de la structure.

D'après (Aalil et al., 2019), l'augmentation de la teneur en brique broyée améliore la résistance à la compression grâce à son effet pouzzolanique et à la densification de la matrice.

3.3 Essais de la durabilité

3.3.1 L'influence des déchets de brique broyés sur le comportement capillaire du mortier

Dans le cadre de l'étude du comportement des mortiers de terre face à l'eau, un essai d'absorption capillaire a été réalisé.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

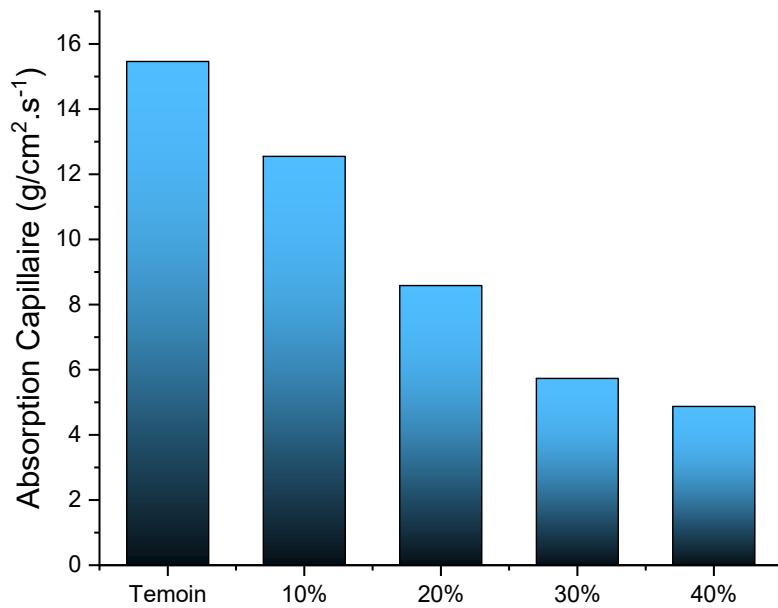


Figure 3. 4: Influence du dosage du brique broyée sur l'absorption capillaire

Analyse des résultats :

Ce test permet de mesurer la capacité du mortier à absorber l'eau par capillarité. L'échantillon témoin présente une absorption capillaire très élevée, traduisant une structure poreuse et vulnérable à l'humidité. Avec l'augmentation des pourcentages de brique broyée, l'absorption capillaire diminue sensiblement. Le meilleur comportement est obtenu à 40 %, indiquant une forte réduction de la migration de l'eau à travers les pores. À cette teneur, on enregistre une diminution de **68,5 %** par rapport à l'échantillon témoin, ce qui met en évidence une réduction importante de la porosité capillaire. Selon (Aalil et al., 2019) bien que les résultats soient exprimés en expansion hydrique plutôt qu'en absorption directe, ils constatent également une augmentation de l'expansion hydrique avec la brique, mais cela est associé à une micro-porosité accrue. Il en ressort que la capillarité peut varier selon la finesse de la brique et la distribution des pores.

3.3.2 L'influence des déchet de brique broyés sur l'absorption totale du mortier

Les résultats obtenus en fonction du pourcentage de brique rouge broyée ajoutée sont présentés dans l'histogramme suivant :

L'échantillon témoin absorbe une quantité d'eau importante, révélant une porosité ouverte élevée. L'ajout de brique broyée permet de limiter cette absorption de manière progressive.

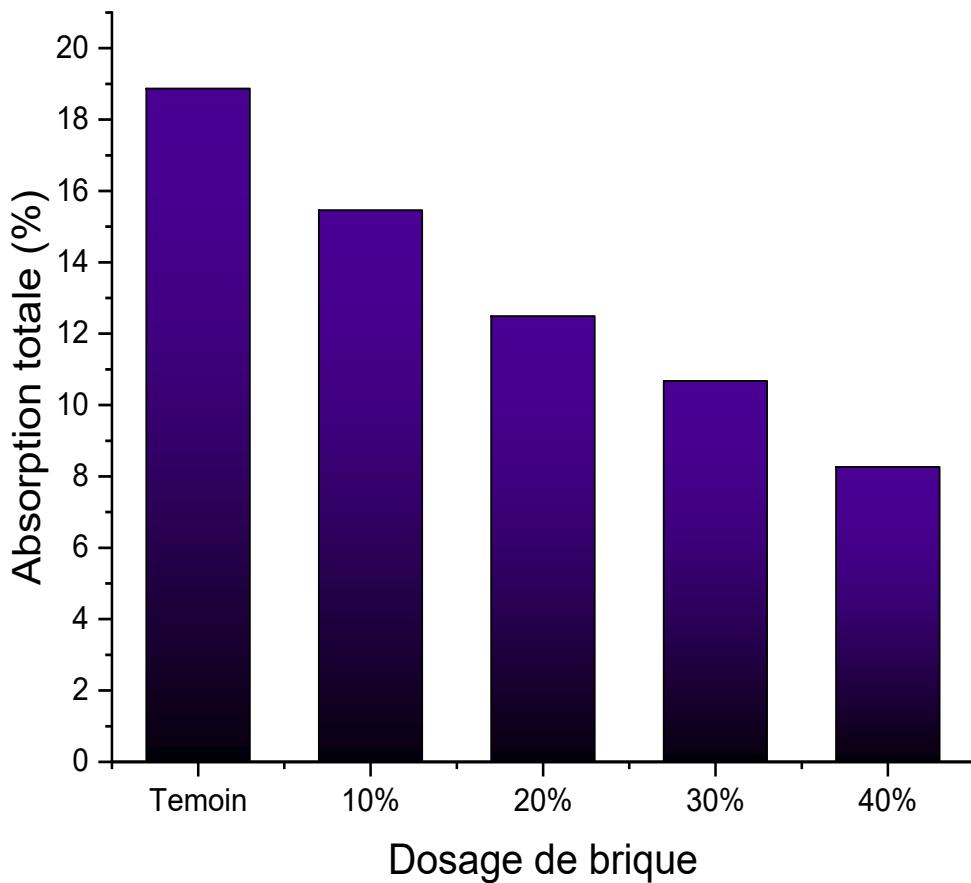


Figure3. 5: Influence du dosage du brique broyés totale des mortiers de terre

L'échantillon à 40 % de brique broyée présente la plus faible absorption totale, ce qui traduit une structure plus compacte et imperméable. Une **réduction de 56,2 %** est observée à cette proportion,

ce qui reflète une nette amélioration de la durabilité. Dans notre étude, l'absorption totale diminue de 18.87 % à 8.26 % avec l'ajout des déchets de brique cuite. Selon Aalil et al., la teneur en eau à saturation (absorption maximale) diminue également dans les mélanges contenant de la poudre de brique, ce qui confirme que l'ajout de brique, grâce à son effet pouzzolanique, contribue à réduire la porosité ouverte et, par conséquent, améliore la durabilité hydraulique du mortier.

3.3.3 La variation de la résistance à l'abrasion des mortiers en fonction de l'ajout de déchets de brique broyés

L'essai de résistance à l'abrasion a été utilisé pour évaluer la capacité des échantillons à résister à l'usure due au frottement, un facteur clé pour déterminer la durabilité des matériaux en conditions réelles d'utilisation. Lors de cet essai, les échantillons ont été soumis à un dispositif spécifique appliquant un mouvement de frottement sur la surface pendant 25 cycles. La masse des échantillons a été mesurée avant et après l'essai afin de calculer la perte de poids, reflétant ainsi l'usure subie.

Les résultats présentés dans la figure suivante :

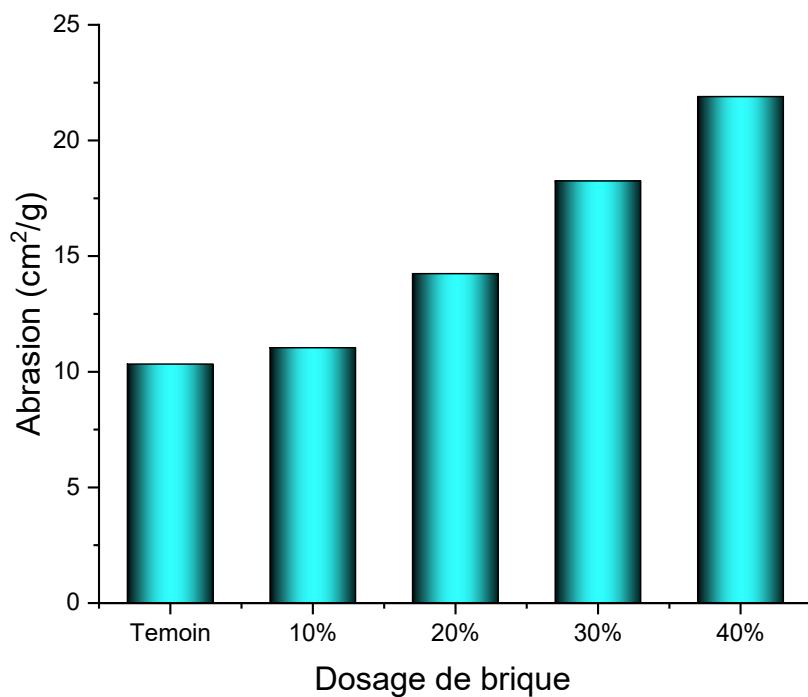


Figure3. 6: Influence du dosage du brique broyés sur la résistance à l'abrasion des mortiers de terre

L'essai d'abrasion permet de mesurer la résistance du mortier à l'usure de surface. L'échantillon témoin perd une quantité importante de matière après frottement, indiquant une faible tenue mécanique superficielle. Avec l'augmentation des teneurs en brique broyée, la résistance à l'abrasion s'améliore progressivement. Le meilleur résultat est obtenu à 40 %, avec une masse résiduelle maximale. Cela représente un **gain de 112 %** par rapport à l'échantillon témoin, traduisant une surface plus dure et plus résistante à l'usure.

3.3.4 L'impact des déchets de brique broyés sur le gonflement des mortiers

Le test de gonflement vise à évaluer la stabilité dimensionnelle du mortier en présence d'eau. L'échantillon témoin subit une déformation importante due à l'absorption d'humidité. L'introduction de brique broyée réduit cette déformation de manière progressive. À 40 %, le gonflement est le plus faible observé, avec une **réduction de 55,17 %** par rapport au témoin, traduisant une meilleure stabilité et une moindre sensibilité à l'humidité.

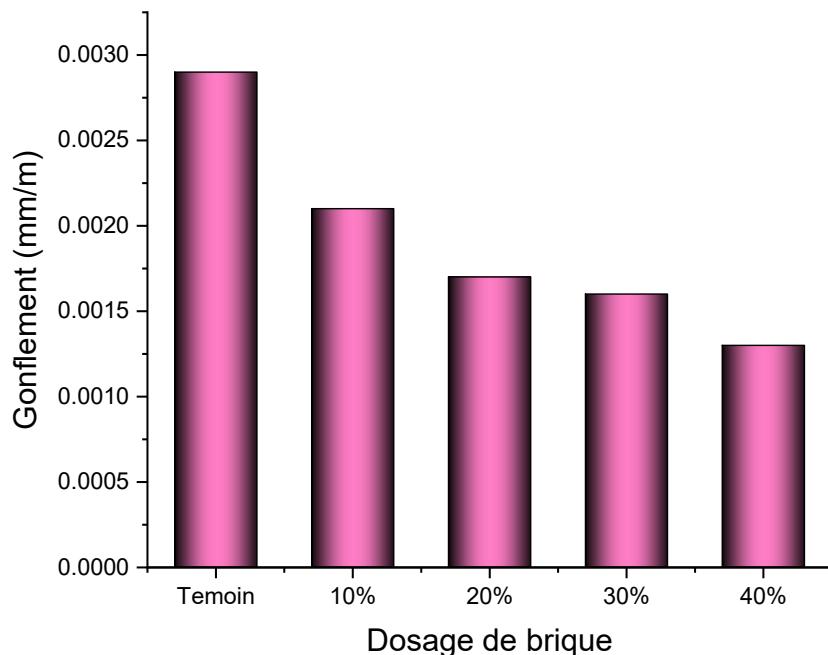


Figure3. 7: Influence du dosage du brique broyés sur le gonflement des mortiers de terre

3.4 Conclusion

Au terme de ce travail, une étude expérimentale rigoureuse a été conduite afin d'évaluer l'impact de l'incorporation de déchets de brique rouge broyée sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers de terre stabilisés. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'efficacité de cet ajout, qui peut être résumée comme suit :

- L'intégration progressive de la brique broyée a entraîné une augmentation de la densité sèche, traduisant une meilleure compacité du matériau et une diminution de la porosité interne, grâce au remplissage des vides par les particules fines.
- Une amélioration notable des résistances à la compression et à la flexion a été observée avec l'augmentation du taux de brique. À 40 %, les gains atteignent environ 40 % en compression et 160,6 % en flexion par rapport à l'échantillon témoin, ce qui reflète un renforcement significatif de la structure du mortier.
- Sur le plan hydrique, une réduction marquée de l'absorption totale et capillaire a été enregistrée pour la formulation à 40 %, indiquant une structure moins perméable à l'eau. De plus, le gonflement a également diminué de manière significative, avec une réduction atteignant 55,17 %, ce qui met en évidence une meilleure stabilité dimensionnelle.
- Concernant la résistance à l'abrasion, les résultats ont montré une amélioration substantielle, avec un gain de +112 % en masse résiduelle, traduisant une surface plus résistante à l'usure mécanique.
- Enfin, il convient de noter qu'aucun effet négatif manifeste n'a été observé sur le plan chimique en conditions normales, ce qui laisse supposer une bonne stabilité physique et chimique du matériau, bien qu'un approfondissement à ce niveau soit recommandé dans des études ultérieures.

En somme, la valorisation des déchets de brique rouge broyée apparaît comme une solution efficace, durable et économiquement avantageuse pour l'amélioration des performances des mortiers de terre, tout en contribuant à la réduction de l'impact environnemental dans le domaine du bâtiment.

CONCLUSION GENERALE

En tant que matériau de liaison entre les unités de maçonnerie, le mortier joue un rôle fondamental. Il assure la cohésion monolithique de la maçonnerie, compense les irrégularités géométriques des blocs et répartit uniformément les contraintes de compression pour éviter leur concentration. Bien que sa contribution à la résistance à la compression globale soit modérée, la résistance à la traction et au cisaillement dépend largement de la qualité du mortier. Dans les murs en maçonnerie irrégulière, la dégradation ou l'effondrement local sont souvent fortement influencés par la performance du mortier.

La caractérisation des propriétés mécaniques et de la durabilité des mortiers est donc essentielle, notamment dans le cas des constructions en terre, qui présentent une grande variabilité dans leur composition, leur mise en œuvre et leur comportement face aux conditions environnementales. Cette complexité est encore plus marquée pour les mortiers à base de terre, en raison des variations de la teneur et de la nature des argiles, de leur sensibilité à l'humidité et de leur fréquence élevée de détérioration. Les briques rouges broyées, matériau localement abondant mais peu valorisé, présentent des propriétés pouzzolaniques intéressantes et une granulométrie favorable, ce qui en fait un bon candidat comme additif dans les mortiers à base de terre. Ce travail a donc porté sur l'étude de l'effet de l'ajout de briques rouges broyées sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité d'un mortier de terre stabilisé à la chaux.

Dans cette étude, le pourcentage de chaux a été fixé à 11 %, et les éprouvettes ont été traitées à l'étuve pendant 7 jours, conformément à des travaux antérieurs menés sur un sol similaire.

Les principales conclusions tirées de cette étude expérimentale sont les suivantes :

- La résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'ajout de briques rouges broyées jusqu'à 40 %, grâce à la formation d'hydrates supplémentaires qui densifient le mortier. Au-delà de ce seuil, l'insuffisance de chaux limite la réaction pouzzolanique, rendant l'ajout essentiellement inerte.
- L'ajout de briques rouges broyées améliore l'absorption totale, l'absorption capillaire, limite le gonflement et augmente la résistance à l'abrasion, ce qui traduit une meilleure durabilité globale.

- Le mortier contenant 40 % de briques rouges broyées a présenté la meilleure performance mécanique et la plus grande durabilité, confirmant l'efficacité de cet ajout comme stabilisant et améliorant.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Aalil, I., Badreddine, D., Beck, K., Brunetaud, X., Cherkaoui, K., Chaaba, A., & Al-Mukhtar, M. (2019). Valorization of crushed bricks in lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 226, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.265>
- Afès, M., & Didier, G. (2000). Stabilisation des sols gonflants: Cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(1), 75–83. <https://doi.org/10.1007/s100649900022>
- Ahmed, B. (2010). *CARACTÉRISATION ET EXPLOITATION DE L'ARGILE DE BENAZZOUZ DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE Option*. Université d'Annaba.
- Al-Ani, & Sarapaa.T. (2008). *Clay and Clay Mineralogy* (Report on). Kaolinite Books, Litmanen.
- Almeasar, K. S., Taallah, B., Ouarda, I., Atiki, E., Guettala, A., Almeasar, K. S., & Taallah, B. (2021). Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and Hygroscopicity Behavior of Earth Mortars Effect of Addition Date Palm Ash on Physical and Mechanical Properties and. *International Journal of Architectural Heritage*, 00(00), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1950235>
- Azzouz, F. Z. (2006). *Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen*. Université Abou Bekr Belkaid.
- Baroghel-Bouny, V., Arnaud, S., & Henry, D. (2002). *Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI e siècle III-Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire ABSTRACT AGING OF CONCRETES UNDER FIELD EXPOSURE: A PROJECT FOR THE 21 st CEN*. 13–59.
- Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation*. <https://vernaculaire.com/immeubles-antiques-de-shibam/>
- Darshita, T., & Anoop, P. (2014). *Study of Strength and Workability of Different Grades of*

Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregate by Crushed Brick and Recycled Glass Powder. 3(6), 141–145.

EN NF 12390-5. (n.d.). *Essai de traction par flexion.*

Fabbri, A., Morel, J. C., & Gallipoli, D. (2018). Assessing the performance of earth building materials: A review of recent developments. *RILEM Technical Letters*, 3, 46–58.
<https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.71>

Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1).
<https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>

France. (2006). *Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie. Ministère de la culture et de la communication, Direction de l'architecture et du patrimoine, Département Communication et documentation.* (Sous-direc).

Garcia-Romero, E., Lorenzo, A., Garcia-Vicente, A., Morales, J., Garcia-Rivas, J., & Suarez, M. (2021). On the structural formula of smectites: A review and new data on the influence of exchangeable cations. *Journal of Applied Crystallography*, 54, 251–262.
<https://doi.org/10.1107/S1600576720016040>

Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of Clay and Clay Mineral : Joint R E P O R T of T H E a I P E a a N D C M S N O M E N C L a T U R E Committees. *Clay Minerals*, 30, 257–259.

Herbert, T. (2003). *Brick a World History.* (Constructi).

Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). Introduction à la géotechnique. *Presses Inter Polytechnique*, 1991–1808.

Houben, H., & Guillaud, H. (2006). Traité de construction en terre. CRATerre. *Edition Parenthèse, Marseille, France*, 355 p.

Hu, F., Li, H., Liu, X., Li, S., Ding, W., Xu, C., Li, Y., & Zhu, L. (2015). Quantitative characterization of non-classic polarization of cations on clay aggregate stability. *PLoS ONE*, 10(4), 3–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122460>

- Izemouren, O. (2016). *Effet des Ajouts Minéraux sur la Durabilité des Briques de Terre Comprimée*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Izemouren, O., & Guettala., A. (2014). *Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate*.
- Izemouren, O., Guettala, A., & Guettala, S. (2015). Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks. *Geotechnical and Geological Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9904-6>
- Julien, J. L., Bourrié, G., Bruand, A., Feller, C., Morlon, P., van Oort, F., & Tessier, D. (2023). Histoire de trois concepts du sol mal maîtrisés : Le pH du sol, les cations échangeables et la capacité d'échange cationique. *Etude et Gestion Des Sols*, 30, 365–381.
- Little, D. N. (1987). *Fundamentals of the stabilization of soil with lime*. *Bulletin of National Lime Association*. 322(17), 20.
- Manzoor, S. O., & Yousuf, A. (2020). *Stabilisation of Soils with Lime : A Review* *Stabilisation of Soils with Lime : A Review* Shahzada Omer Manzoor * and Aadil Yousuf. September.
- MEUKAM, P. (2004). *VALORISATION DES BRIQUES DE TERRE STABILISEES EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS* par. Université de Cergy Pontoise.
- Negi, A. S., Faizan, M., & Siddharth, D. P. (2013). *Soil stabilization using lime*. 2(2), 448–453.
- NF, P. (1991). *Sols: reconnaissance et essais—Détermination de la masse volumique des particules solides des sols—Méthode du pycnomètre à eau*.
- NF, P. (1996). *Analyse granulométrique—Méthode par tamisage à sec après lavage*.
- NF, P. 057. (1992). *Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation* (p. 20).
- NF, P. 94-051. (1993). *Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle—Limite de plasticité au rouleau* (p. 16). AFNOR.
- NF P 94-051. (1994). *Essai au bleu de méthylène NF EN*.
- NF XP- P 13 901. (n.d.-a). *Essais d'absorption*.
- NF XP- P 13 901. (n.d.-b). *Essais de la compression simple*.

- NFP94-054. (1994). *la densité*.
- Ouchet, A., Meunier, A., & Sardini, P. (2000). inéraux argileux : structure cristalline, identification par diffraction de rayons X = Clay minerals. In *crystal structure, x-ray diffraction identification* (Elf Explor).
- Qin, X., Han, D., & Zhao, L. (2019). *Elastic characteristics of overpressure due to smectite-to-illite transition based on micromechanism analysis*. 84(4). <https://doi.org/10.1190/geo2018-0338.1>
- Savadogo, N., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., & Agbodjan, W. P. (2015). Durability of composite cement with Tefereyre (NIGER) coal bottom ash: Capillary absorption, porosity to water and acid attack. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2, 213–223.
- Senisna, Z. (2018). *Contribution et l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques du corps de chaussée par l'ajout des déchets de brique en zone saharienne*. université de Ouargla.
- Solihu, H. (2020). Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.37421/jcde.2020.10.344>
- Venkatarama Reddy, B. V., & Gupta, A. (2005). Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 38(280), 651–658. <https://doi.org/10.1617/14265>
- Walker, P. J. (1995). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, 17(4), 301–310. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9)
- Wetshondo, D. (2012). *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)*. 0–340.
- XP-P 13 901. (n.d.). *Essais de gonflement*.
- Yan, K., Xu, H., Shen, G., & Liu, P. (2013). Prediction of splitting tensile strength from cylinder compressive strength of concrete by support vector machine. *Advances in Materials Science*

- and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/597257>
- Yang, M., Han, L., Xu, Y., Ke, H., Zhou, N., Dong, H., Liu, S., & Qiao, G. (2019). *Near Infrared Spectroscopic Study of Trioctahedral Chlorites and Its Remote Sensing Application*. 815–828.
- Zhao, H., Ge, L., Petry, T. M., & Sun, Y. Z. (2014). Effects of chemical stabilizers on an expansive clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1009–1017.
<https://doi.org/10.1007/s12205-013-1014-5>