

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID TLEMCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Civil

Mémoire pour l'obtention du

Diplôme de Master en Génie Civil

Option **structure**

Intitulé

**CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANIQUES D'UN SOL
REFORCÉ PAR DES FIBRES VEGETALES**

Présenté par

ASKEUR AICHA et KADDOURI MANAL KARIMA

Soutenu en Septembre 2025 devant le jury composé de

BENCHOUK Assia

Professeur

Présidente

KHELIFI Zakia

Maître de Conférences A

Encadrante

AYAD Fatima

Maitre de Conférences B

Examinatrice

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs sacrifices qui m'ont permis d'arriver jusque-là

À mes amis, pour leur présence, leur patience et leur encouragement dans les moments difficiles.

À toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Et tout particulièrement à mon étoile lumineuse, celle qui éclaire mes nuits les plus sombres par sa simple présence, et dont le soutien silencieux m'a portée plus que les mots ne peuvent le dire

KADDOURI MANAL

DEDICACES

Louange à Allah, seigneur de l'univers le tout puissant et miséricordieux qui m'a inspiré et comblé de bienfait, je lui rends grâce.

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie je dédie mon travail :

A ma très chère mère medjahdi Sabah rabbi yarhamha et mon très chère père, source de vie, de bonheur, d'amour.

A mes frère Chihab et Mohamed et mes sœurs Ikram et Ahlem

*A **Mon** beau-frère Abdessamad et amine*

A mon oncle Hassan et sa femme et ses enfants , mon oncle maternel Karim et sa famille ,et mon oncle maternel Ilyes et sa famille .

Mes précieuses amies Mounia et Sara

A mon binôme, a toute ma famille sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, moyen, secondaire ou de l'enseignement supérieur.

À mon encadreur Mme khelifi Zakia qui nous a aidés dans notre profil de fin d'étude

Aicha

REMERCIEMENTS

Nous exprimons avant tout notre profonde gratitude à **Allah Tout-Puissant**, qui nous a accordé la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien nos études et accomplir ce travail de recherche.

Nos sincères remerciements vont à **Madame le Docteur KHELIFI Zakia**, enseignante à l'Université de Tlemcen, pour avoir assuré la direction de ce mémoire. Sa disponibilité, sa rigueur scientifique, sa patience et la qualité de ses conseils ont été d'un grand apport tout au long de ce travail. Grâce à son encadrement attentif, nous avons pu acquérir des connaissances précieuses et développer nos compétences.

Nous tenons également à remercier chaleureusement les **membres du jury** qui ont accepté d'évaluer ce mémoire.

Nos remerciements vont en particulier à **Madame le Professeur BENCHOUK Assia**, Présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous fait en présidant cette soutenance et pour la confiance qu'elle nous a témoignée.

Nos vifs remerciements s'adressent également à **Madame le Docteur AYAD Fatima** pour l'attention portée à l'examen de ce travail et pour ses remarques constructives.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à **Monsieur le Professeur BOUMECHRA Nadir** pour ses précieux conseils et son accompagnement dans la réalisation des essais ultrasoniques.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à la directrice du **laboratoire de recherche EOLE** pour son accord d'accéder au laboratoire et utiliser le matériel nécessaire pour la confection des éprouvettes. Ainsi qu'au **LTPO** pour son appui technique et matériel. Leur collaboration a constitué un cadre idéal pour mener à bien cette étude, et nous sommes sincèrement reconnaissantes.

CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANQUES D'UN SOL REFORCEE PAR DES FIBRES VEGETALES

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à **nos familles** pour leur soutien moral et matériel constant tout au long de notre parcours universitaire, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

RESUME

Cette étude porte sur le comportement mécanique des briques de terre comprimée renforcées par des fibres naturelles d'alfa, sous deux formes : coupées et broyées. Les essais ultrasonores ont montré une diminution du module dynamique avec l'augmentation du taux de fibres, traduisant un matériau plus ductile et moins fragile. Les essais de compression et de traction ont révélé une amélioration significative des résistances pour des teneurs modérées en fibres, notamment autour de 1 %, confirmant l'effet de pontage et de renforcement assuré par les fibres. Dans l'ensemble, l'incorporation de fibres d'alfa améliore la cohésion, la ténacité et la stabilité mécanique des briques de terre comprimée, démontrant son potentiel en tant que solution durable et écologique pour le renforcement des matériaux de construction en terre.

Mots clés : terre crue ; brique en terre comprimée, alfa, résistance de compression.

ABSTRACT

This study investigates the mechanical behavior of compressed earth bricks reinforced with natural Alfa fibers, in both cut and ground forms. Ultrasonic pulse velocity tests revealed a decrease in dynamic modulus with increasing fiber content, indicating a more ductile and less brittle material. Compressive and tensile tests showed significant improvements in strength for moderate fiber contents, particularly around 1%, highlighting the reinforcing and crack-bridging effects of the fibers. Overall, Alfa fiber reinforcement enhances the cohesion, toughness, and mechanical stability of compressed earth bricks, confirming its potential as a sustainable and eco-friendly reinforcement technique for earthen construction materials.

Keywords: raw earth; compressed earth brick, Alfa, compression resistance.

ملخص

تتناول هذه الدراسة السلوك الميكانيكي للطوب الطيني المضغوط المدعم بألياف الحلفاء الطبيعية، بنوعها المقطعة والمطحونة. أظهرت الاختبارات بالموجات فوق الصوتية انخفاضاً في معامل المرونة الديناميكي مع زيادة نسبة الألياف، مما يشير إلى مادة أكثر ليونة وأقل هشاشة. كما بينت اختبارات الضغط والشد تحسناً ملحوظاً في المقاومة عند نسب معتدلة من الألياف، خصوصاً عند نسبة 1%، مما يؤكد دور الألياف في التقوية وربط الشقوق الدقيقة داخل المادة. بوجه عام، ساهم إدماج ألياف الحلفاء في تحسين التماسك والصلابة والاستقرار الميكانيكي للطوب الطيني المضغوط، مما يثبت فعاليتها كحل بيئي ومستدام في تدعيم مواد البناء الطينية.

الكلمات الدالة: الأرض الخام، طوب أرضي مضغوط، الحلفاء، مقاومة.

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 3 |
| 2. Bref historique | 4 |
| 3. Les principaux modes d'utilisation de la terre | 6 |
| 3.1. Le Torchis | 7 |
| 3.2. Briques de terre comprimée | 7 |
| 3.3. L'adobe | 9 |
| 3.4. Le pisé | 10 |
| 4. Propriétés des constructions en terre | 11 |
| 5. La stabilisation en terre | 12 |
| 5.1 Les objectifs de la stabilisation | 12 |
| 5.2. Les techniques principales | 13 |
| 5.2.1 Stabilisation au ciment | 13 |
| 5.2.2 Stabilisation à la chaux | 14 |
| 5.2.3 Stabilisation par fibres | 15 |
| 5.2.3 Concepts et mécanismes de stabilisation par fibres végétales | 15 |
| 5.2.4 Facteurs influençant les performances | 16 |
| 5.2.5 Avantages et limites | 17 |
| Conclusion | 18 |
| 1. Introduction | 21 |
| 2. Terre crue | 21 |
| 3. Granulométrie | 23 |
| 4. Limites d'Atterberg | 23 |
| 5. Essai au bleu de méthylène | 24 |
| 6. Préparation des briques en terre comprimées | 27 |
| 7. Fibres végétales | 28 |
| 8. Essai d'ultrason | 30 |
| 10. Résistance à la traction par fendage : « Essai Brésilien » | 32 |
| 11. Conclusion | 33 |
| 1. Introduction | 35 |

**CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANIQUES D'UN SOL REFORCEE PAR DES FIBRES
VEGETALES**

| | |
|---|-----------|
| 2. Analyse granulométrique..... | 35 |
| 3. Limite d'Atterberg | 35 |
| 4. Essai de bleu méthylène | 36 |
| 5. Résultats de l'essai ultrason | 36 |
| 5. Résultats de l'essai de compression | 38 |
| 6. Résultats de l'essai de traction..... | 41 |
| 7. Conclusion..... | 43 |
| Bibliographie..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 1-1 L'arche de Ctésiphon (Irak) | 5 |
| Figure 1-2 La ziggourat d'Etemenanki à Babylone | 5 |
| Figure 1-3 La cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou | 5 |
| Figure 1-4 L'architecture en terre crue dans le monde [2] | 6 |
| Figure 1-5 Construction en pisé « l'Alhambra », Grenade | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 1-6 Ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc) | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-1 terre crue | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-2 Analyse granulométrique par voie humide du matériau terre | 23 |
| Figure 2-3 Analyse granulométrique par sédimentation | 23 |
| Figure 2-4 Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Casagrande | 24 |
| Figure 2-5 Détermination de la limite de plasticité au rouleau | 24 |
| Figure 2-6 Essai de bleu méthylène | 26 |
| Figure 2-7 Détermination de la valeur de VBS | 26 |
| Figure 2-8 Essai d'ultrason | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-9 Halfa | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-10 Malaxage de halfa avec la terre | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-11 Éprouvettes de briques en terre comprimées | 28 |
| Figure 2-12 Illustration d'un essai de compression simple d'une brique en terre comprimée | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 2-13 Essai de tractin | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 3-1 Courbe granulométrique de la terre crue. | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 3-2 Position de la terre crue sur l'abaque de casa grande | 32 |
| Figure 3-3 Briques en terre a la fin de l'essai de compression | 33 |

INTRODUCTION GENERALE

« La Terre n'est pas que poussière, mais la mémoire de la nature et la source de la vie. C'est d'elle que nous avons commencé, avec elle que nous construisons notre présent et sur elle que nous bâtissons notre avenir. »

Antoine de Saint-Exupéry

INTRODUCTION GENERALE

Au fil des dernières décennies, la nécessité d'améliorer les propriétés mécaniques des sols s'est imposée comme un enjeu majeur dans le domaine du génie civil, en particulier dans les projets de construction et d'infrastructures. En effet, certains sols présentent des caractéristiques défavorables telles qu'une faible capacité portante, une forte compressibilité ou encore une sensibilité accrue à l'eau, constituant ainsi des contraintes importantes pour les ingénieurs géotechniciens.

Pour pallier ces limitations, diverses méthodes de renforcement des sols ont été mises au point, incluant notamment l'utilisation de matériaux synthétiques. Cependant, la prise de conscience environnementale croissante et la volonté d'adopter des approches plus durables ont conduit la recherche à s'orienter vers des alternatives écologiques et économiquement viables. Parmi celles-ci, le renforcement des sols à l'aide de fibres naturelles végétales suscite un intérêt particulier.

Ces fibres présentent de nombreux avantages : elles sont biodégradables, disponibles localement, peu coûteuses et contribuent à la réduction de l'empreinte carbone. Leur incorporation dans les sols permet d'améliorer les propriétés mécaniques, notamment la résistance au cisaillement, la capacité portante et la durabilité du matériau.

Dans cette perspective, notre travail s'inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale portant sur l'évaluation des performances mécaniques d'un sol renforcé par des fibres végétales. L'objectif est d'analyser l'influence de ce type de renforcement sur le comportement du sol et d'apprécier la faisabilité de cette technique dans les applications géotechniques.

Afin de mener à bien cette étude, le mémoire est structuré en trois parties principales :

- **Le premier chapitre** est consacré au matériau terre. Il présente son historique, ses principales formes d'utilisation en construction, ses propriétés physiques et mécaniques, ainsi que les différentes méthodes de stabilisation mises en œuvre.
- **Le deuxième chapitre** décrit les matériaux naturels utilisés pour la fabrication des briques en terre comprimée, le protocole expérimental normalisé pour la caractérisation des propriétés physiques, ainsi que l'étude du comportement mécanique de ces briques.
- **Le troisième chapitre** est dédié à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

INTRODUCTION GENERALE

Enfin, une **conclusion générale** vient clore ce travail en synthétisant les principaux résultats, les observations essentielles et les perspectives de recherche futures.

En vue de mieux cerner le cadre scientifique de notre étude, il est essentiel de présenter, dans un premier temps, une revue bibliographique des travaux antérieurs relatifs au renforcement des sols par des fibres naturelles, ainsi qu'aux propriétés mécaniques des matériaux à base de terre.

CHAPITRE 01

**« GENERALITE SUR LA BRIQUE EN TERRE
COMPRIMEE RENFORCEE PAR DES FIBRE VEGETALE »**

1 .Introduction

La brique de terre comprimée BTC est un matériau de construction fabriqué à partir de terre argileuse crue comprimée dans un moule. La BTC ne nécessite que peu ou pas de liants chimiques et selon l'usage, une alternative durable aux blocs de béton ou aux briques de terre cuite classiques. Elle présente des propriétés thermiques et hygrothermiques favorisant le confort dans les bâtiments .sa fabrication locale consommant peu d'Énergie ,la BTC présente des impacts environnementaux réduits et est considérée comme un produit de construction écologique et durable.

2. Bref historique

L'histoire de la construction en terre remonte à des temps anciens, les premières cités bâties en terre (découverte, ou encore perceptible) se trouvent en Mésopotamie et selon les archéologues date du XIV siècles avant JC la construction en terre s'est développée au fil des siècles avec l'apparition de nouvelle forme comme les coupoles ou le besoin de s'élever en hauteur et demander donc des fortifications. Pline en atteste dans son ouvrage Histoire Du Monde : « ...que dirons-nous des murailles de pisé qu'on voit en Barbarie (Carthage), et en Espagne ou elles sont appelées muraille de forme ; il n'y a ni ciment ni mortier qui soient plus dures que cette terre ; les guettes et les lanternes que Hannibal fit construire sont en pisé. »

Mais la construction en terre reste peu étudiée et mal connue, jugée par certain comme « Médiocre et antique », et est souvent préférées au bois et à la pierre matériaux considérés comme « nobles ». Pourtant la terre fut associée aux époques les plus importantes des développements urbains dans le temps, les strates du temps n'ont pu effacer les preuves tout juste dissimulées de ces vestiges.

D'ailleurs au jour d'aujourd'hui, on remarque une accélération des restauration et réhabilitation de ces vestiges, afin de conserver et promouvoir une parcelle de notre humaine et universelle.



Figure 1-1 :L'arche de Ctésiphon (Irak) **Source spécifiée non valide.**



Figure 1-2 :La ziggourat d'Etemenanki à Babylone **Source spécifiée non valide.**



Figure 1-3 : La cité précolombienne de Chanchan au Pérou **Source spécifiée non valide.**

Des études estiment que 30 % de la population mondiale, soit près de 1 500 000 000 d'êtres humains, vit dans un habitat en terre. Pour les seuls pays en voie de développement, il s'agit de 50 % de la population, en majorité rurale, et au moins 20% de la population urbaine et péri-urbaine. Il se peut que ses chiffres soient en deçà des réalités **Source spécifiée non valide.** Les constructions en terre sont majoritairement présentes dans presque tout le monde (figure 1.5). Cela est dû au fait que depuis la nuit

des temps, l'homme à la recherche de s'abriter, il a édifié des constructions avec les matériaux dont il disposait à portée de main en tenant compte des conditions locales, qu'elles soient climatiques, économiques et technologiques. La terre est la ressource la plus facile à trouver, la plus accessible.



Figure 1-4 : L'architecture en terre crue dans le monde Source spécifiée non valide.2

3. Les principaux modes d'utilisation de la terre

La terre est une composition de plusieurs granulés de différents diamètres : il ya l'argile des particules inférieures à 2 micromètres, le limon une particule comprise entre 2 et 50 micromètres, c'est deux granulés servent généralement en tant que liant d'éléments plus gros, Les autres granulés à différencier sont le sable et le gravier tout deux compris entre 0,5 et 10 mm. Il existe beaucoup de technique connue pour la construction en terre qu'on peut regrouper en deux grandes familles :

La terre moulus, mise en forme comme l'adobe, le bauge... La terre comprimée comme le pisé et le bloc de terre comprimés (BTC).

Ces différentes techniques sont associées à trois différentes méthodes d'utilisation : soit elle est utilisée pour fabriquer une structure porteuse, soit elle est monolithique et massive donc autoporteuse, soit elle prend la forme de maçonneries d'éléments qu'il faudra assembler.

Voici quelques illustrations de différentes techniques d'utilisation de la terre, afin de mieux appréhender les outils et savoir-faire de la construction en terre.

3.1. Le Torchis

1/ Une structure est montée généralement en bois



2/ La terre est malaxée avec de l'eau (15%-30%)

3/ Le mélange est ainsi étalé à la main sur la structure



4/ La terre est lissée à la main

5/ Aplanir le mur grâce à une règle

6/ Utilisation d'un enduit en chaud

Le torchis est l'une des plus anciennes techniques, apparues aux environs du 10^e millénaire au Proche-Orient, il a été amélioré par les

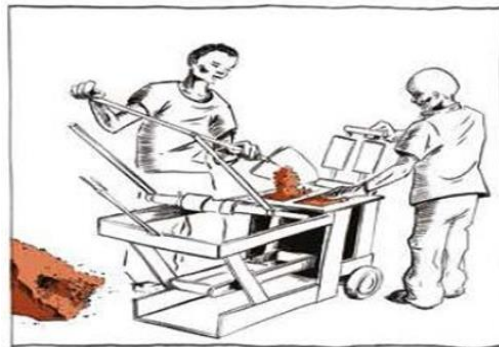
Civilisation néolithique du Danube, avant que la technique de construction se propage dans le monde, quelques sites sont aujourd'hui classés au patrimoine de l'UNESCO, comme la ville de Diamantina au Brésil ou les maisons Ottomanes de Safran Bolu en Turquie et des tombeaux des rois du Buganda en Ouganda.

3.2. Briques de terre comprimée

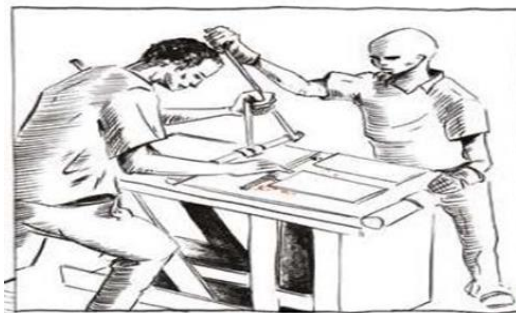
Depuis longtemps, les blocs de terre ont été fabriqués à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un

couvercle très lourd. Par la suite, ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes **Source spécifiée non valide**. La première presse pour fabriquer les briques de terre comprimée (BTC) a été mise au point en 1952 par l'ingénieur Raul Ramirez. Les BTC ont connu un réel succès durant les années 1980 et 1990 pour la réalisation d'habitats économiques en Afrique, en Amérique du Sud et dans le sous-continent indien.

1/ Lors de sa séparation, la terre est broyée et tamisée

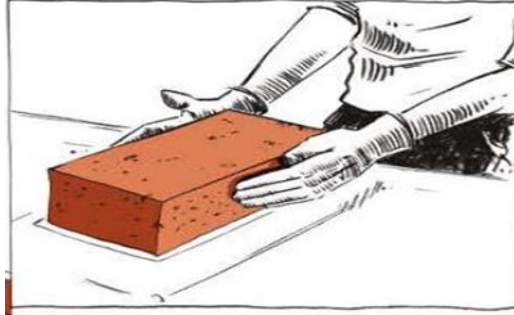


2/ Le mélange est placé dans le moule de la presse

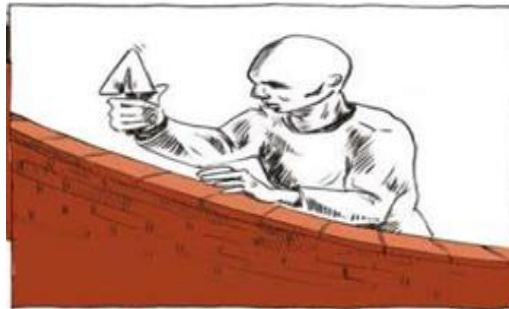


3/ La terre est comprimée par manuellement

4/ Le bloc est sorti de la presse avec précaution.



5/ Les BTC sont empilés pour un séchage humide sous bâche pendant 28 jours.



6/ Les blocs sont maçonnés avec un mortier en terre.



Les Blocs de Terre Comprimée (BTC) ne sont apparus que très récemment en 1950, la création de la première presse de terre par le colombien Raul Ramirez eu un énorme succès qui s'est vite développé dans l'Amérique Latine et l'Afrique pour des programmes d'habitat économique.

3.3. L'adobe

Est certainement l'un des premiers matériaux de constructions élaboré par l'homme il y a des millénaires. « Adobe », c'est un terme générique utilisé pour toutes les briques de terre crue moulées (manuellement ou mécaniquement) et séchées (au soleil ou artificiellement), peu importe leur taille et leur composition. Aujourd'hui, les adobes sont façonnés dans des moules rectangulaires et sont maçonnées comme n'importe quelle autre brique (cuite, parpaing, ...). Les adobes permettent de construire

des murs, des piliers, des arcs, des voûtes et des coupoles. A la différence de la technique du pisé où la terre est mise en œuvre sur place, l'adobe est façonné à l'avance et stocké, pour une mise en œuvre ultérieure. Le terme « adobe » viendrait de l'égyptien « thobe » (brique), terme qui aurait voyagé jusqu'en Espagne où il est devenu « adobe ». Ce nom a ensuite été repris dans le monde entier. En Afrique de l'ouest, on utilise aussi le mot « banco ». Quel que soit le terme choisi,

Le principe reste commun : mélanger sur le lieu de construction de la terre argileuse, de l'eau, du sable, parfois de paille. Résultat : une brique 100% naturelle, 100% écologique, 100% recyclable, 100% locale, tout ça en consommant peu d'énergie, mais beaucoup de sueur. C'est donc potentiellement la plus écologique des briques crues, à moins que vous ne la fassiez voyager. Dans les pays où l'on ne monnaie pas son temps, dans les pays où les produits industrialisés ne sont pas disponibles ou inabornables, on continue de produire des adobes une à une, à la main. Dans les pays occidentaux, à partir de la seconde moitié du vingtième siècle, la production des adobes a été mécanisée pour faire face à la hausse du coût de la main d'œuvre et pour augmenter la productivité.



3.4. Le pisé

Le pisé à bâtir des murs en terre crue, que l'on dresse et compacte par blocs successifs entre deux panneaux de coffrage appelés « banches ». Cette technique millénaire s'adapte à toutes les formes architecturales, tant modernes que traditionnelles.

Pisé vient du vocable latin « *Pin Sare* » qui signifie battre, piler, tasser... Sa transposition dans la langue française a donné plusieurs formes d'orthographe : pisay, pisey, pisé. Ce mode constructif se pratique partout dans le monde, pour tout type de

bâtiment : de la hutte tribale togolaise au village fortifié (Ksar) marocain, de la mosquée burkinabè (Bani) à l'église états-unienne (*Holy Cross Church* de State burg) ou à certains tronçons de la Grande muraille de chine . En France, le bâti en pisé se rencontre de la Bretagne au Dauphiné en passant par la beau cela et le Massif Central.



Figure 1-1 : Un corps d'habitations en pisé dans les environs de Marsac-en-Livradois, Puy-de-Dôme.



Figure 0-2 : Kesar Aït-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc) **Source spécifiée non valide.**

4. Propriétés des constructions en terre

Les maisons en terre offrent souvent une harmonie particulière, résultant à la fois de l'uniformité du matériau utilisé et de la qualité des espaces et des rythmes architecturaux. Toutefois, le confort procuré par l'architecture en terre ne se limite pas à l'aspect spirituel ; il est également thermique : ces habitations restent fraîches en été et conservent la chaleur en hiver (11). Les principaux avantages écologiques des constructions en terre crue peuvent être résumés ainsi :

- Le sol absorbe et restitue l'humidité.
- La terre assure la régulation thermique grâce à son inertie.
- Elle constitue un excellent isolant phonique.
- Sa transformation nécessite peu d'eau.
- Elle est disponible localement en grande quantité et est renouvelable

5. La stabilisation en terre

La stabilisation d'un sol consiste à modifier les propriétés du système terre-eau-air afin d'obtenir des caractéristiques durables, adaptées à un usage spécifique (12). De nombreuses variétés de terre peuvent voir leurs performances considérablement renforcées grâce à l'ajout de stabilisants. Toutefois, chaque type de terre nécessite un stabilisant spécifique. Il est donc essentiel de connaître :

- Les propriétés de la terre concernée,
- Les améliorations souhaitées,
- Les contraintes économiques du projet,
- Les techniques de mise en œuvre adaptées,
- Ainsi que les exigences en matière d'entretien du projet finalisé.

5.1 Les objectifs de la stabilisation

L'objectif de la stabilisation d'un sol est de fixer durablement l'eau présente dans les sols. Pour ce faire, nous incorporons des matériaux appelés « liants » comme du ciment, de la chaux ou un autre liant hydraulique dans les sols à l'aide d'un épandeur. Choisir une stabilisation de sol au ciment lui permet de gagner en résistance aux vibrations au gel et au dégel ainsi qu'à la pénétration de l'eau, diverses sollicitations ou intempéries pouvant, à terme, endommager fortement le sol et les infrastructures qui y sont construites. Pour éviter cela, ce traitement de sol est envisagé pour un sol humide, boueux, bourbeux ou un sol argileux afin de réduire la teneur en eau à l'intérieur. Nous effectuons les études afin de déterminer la nature du sol et ainsi décider du mélange le plus efficace et les quantités adaptées à sa stabilisation.

5.2. Les techniques principales

Ces mécanismes sont possibles grâce aux techniques de stabilisation. Ces dernières ont été mises au point et améliorées au fil des ans suite à de nombreuses recherches sur le sujet. Il existe plusieurs techniques de stabilisation (4). Nous présentons ci-après, les techniques que nous avons utilisées pour la stabilisation de notre matériau terre.

5.2.1 Stabilisation au ciment

La stabilisation au ciment consiste à ajouter du ciment à une terre pour en améliorer durablement la résistance mécanique, la cohésion et la stabilité face à l'eau. Le ciment, en réagissant avec l'humidité présente dans le sol, forme des liaisons chimiques qui solidifient la structure du matériau. Ce procédé est particulièrement efficace pour transformer des terres friables ou sensibles à l'eau en matériaux robustes, adaptés à la construction de murs, de routes ou de fondations.

L'efficacité de la stabilisation au ciment dépend de plusieurs facteurs :

- La nature du sol (argileux, limoneux, sableux, etc.),
- Le pourcentage de ciment ajouté,
- L'humidité lors du mélange,
- Les conditions de cure (temps et température de séchage).

En général, la dose de ciment varie entre 5 % et 12 % du poids sec de la terre, selon les performances recherchées.

Avantages principaux :

- Augmentation de la résistance à la compression.
- Amélioration de la résistance à l'eau et à l'érosion.
- Durabilité accrue dans le temps.

Cependant, l'utilisation du ciment augmente l'empreinte carbone du projet, ce qui peut être un inconvénient dans des démarches de construction écologique.

5.2.2 Stabilisation à la chaux

La stabilisation à la chaux consiste à incorporer de la chaux (chaux vive ou chaux éteinte) à une terre pour en améliorer les propriétés mécaniques, la plasticité et la résistance à l'eau. Lorsqu'elle est mélangée à l'argile et à l'humidité du sol, la chaux réagit chimiquement : elle floccule les particules fines, réduit leur plasticité et entraîne des réactions de carbonatation et de pozzolanité, renforçant progressivement la solidité du matériau.

Ce procédé est particulièrement adapté aux sols argileux ou limoneux.

Principaux effets de la stabilisation à la chaux :

- Diminution de la plasticité et du gonflement des sols.
- Amélioration de la capacité portante et de la compacité.
- Meilleure résistance à l'eau et aux intempéries.
- Augmentation de la durabilité dans le temps.

Facteurs à considérer :

- Le type de chaux utilisée (hydraulique ou aérienne selon les besoins).
- Le dosage de chaux (souvent entre 3 % et 8 % du poids sec de la terre).
- Les conditions de séchage et de cure, qui influencent le développement des réactions chimiques.

Avantages principaux :

- Compatible avec une approche plus écologique que le ciment.
- Meilleure adaptabilité aux sols très plastiques.
- Réduction de l'énergie nécessaire pour la mise en œuvre (par rapport au ciment).

5.2.3 Stabilisation par fibres

La stabilisation par fibres consiste à intégrer des fibres naturelles ou synthétiques à une terre pour en améliorer la résistance mécanique, la ductilité et la tenue aux fissurations. Les fibres agissent comme des armatures réparties dans toute la masse, permettant au matériau de mieux absorber les déformations et les contraintes.

Types de fibres utilisées

- Fibres naturelles : paille, chanvre, Alfa, coco, sisal, lin, bambou, etc.
- Fibres synthétiques : polypropylène, polyester, fibre de verre, etc.

5.2.3 Concepts et mécanismes de stabilisation par fibres végétales

- Le renforcement de sol par fibres végétales consiste à incorporer des fibres naturelles dans la matrice du sol (terre, sable, limon, argile) pour améliorer ses propriétés mécaniques : résistance au cisaillement, résistance à la compression non confinée, ductilité, réduction des déformations, etc.
- Les fibres agissent comme des éléments de *pontage* ou de *renforcement diffus*. Elles limitent la propagation des fissures, améliorent la cohésion apparente, et dans certains cas retardent ou réduisent les effets de gonflement/sensibilité à l'eau.
- Les performances dépendent fortement de plusieurs paramètres : nature des fibres (type végétal, structure, résistance en traction), longueur, diamètre, taux d'incorporation, uniformité de dispersion, interaction fibre-sol, humidité, etc.

Le tableau suivant récapitule quelques exemples récents, pertinents :

| Étude | Type de sol / terre utilisée | Fibre végétale employée / traitement | Résultats clés |
|--|--|--|--|
| <i>Incorporating vegetal fibers for sustainable sandy soil</i> (Adda Berkane et al., Algérie) | Sable de Chlef (densité relative $D_r \approx 40-75\%$) | Fibres d'Alfa & de Sisal, réparties aléatoirement, taux variant pour Alfa de 1-4 %, pour Sisal ~0,1-0,7 % (revistadelaconstruccion.uc.cl) | Amélioration de la résistance au cisaillement (pic et résiduelle). Le taux optimal pour Alfa était ~3 %, pour Sisal ~0,7 % (revistadelaconstruccion.uc.cl) |
| <i>Effect of natural fibers on the soil compaction characteristics</i> | Sol argileux mélangé avec fibres végétales (banane, kenaf, coir) | Taux d'incorporation environ 0,5 % (autres essais à différents taux) (iopscience.iop.org) | Changement dans la densité sèche maximale (augmentation) et dans la teneur en eau optimale. Les fibres végétales modifient les caractéristiques de compactage, ce qui peut influencer la performance future du sol stabilisé. (iopscience.iop.org) |
| <i>Experimental Study on the Effect of Hemp Fiber on Mechanical Properties of Stabilized Clayey Soil</i> (Turquie) | Sol argileux stabilisé | Fibre de chanvre (Hemp) incorporée à différents taux (tandfonline.com) | Amélioration significative de la résistance mécanique (compression, etc.), selon le taux de fibre et temps de cure. (tandfonline.com) |
| <i>Effect of treated palm fibers on the mechanical properties of compressed earth bricks stabilized by alkali-activated binder</i> | Briques de terre comprimée avec liant géopolymère / activateur alcalin | Fibres de palmier traitées, incorporées dans les briques stabilisées par liant géopolymère naturel ou activé alcalinement (ceramics.onlinelibrary.wiley.com) | Les briques stabilisées avec ces fibres montrent de bonnes performances mécaniques, comparables dans certains cas à celles stabilisées par liant alcalin seul. Le traitement des fibres augmente leur efficacité. (ceramics.onlinelibrary.wiley.com) |

5.2.4 Facteurs influençant les performances

D'après les études, voici les principaux facteurs qui conditionnent l'efficacité de la stabilisation par fibres végétales :

- **Taux de fibre** : Il existe un « optimum » après lequel trop de fibres peut nuire (par exemple réduire la cohésion ou créer des vides ou des faiblesses). Par exemple, dans l'étude sur sable de Chlef, ~3 % d'Alfa était optimal.
- **Longueur / aspect (longueur / diamètre)** : Des fibres plus longues permettent un meilleur pontage, mais peuvent être plus difficiles à disperser uniformément et peuvent créer des amas.

- **Traitement des fibres** : Certaines études montrent que le traitement des fibres (lavage, séchage, éventuellement traitement chimique) améliore l'adhésion fibre-terre et augmente la durabilité, mais cela n'est pas toujours nécessaire selon les cas.
- **Humidité / état du sol** : La teneur en eau du sol au moment de l'essai influence fortement la performance ; les sols humides montrent souvent une amélioration plus marquée avec fibres qu'à l'état sec.
- **Type de sol / texture** : Sable, limon, argile, ou sol expansif répondent différemment aux fibres. Les sols fins (argile, limon) peuvent bénéficier de fibres dans la réduction de la plasticité et des mouvements de gonflement, alors que les sols grossiers (sable) voient surtout des gains en résistance au cisaillement.
- **Méthode de stabilisation combinée** : Combiner fibres naturelles avec d'autres stabilisants (chaux, ciment, liants géopolymères, activateurs alcalins) peut produire de meilleurs résultats qu'un seul stabilisant. (Ex : liant alcalin + fibres de palmier pour les briques de terre comprimée).

5.2.5 Avantages et limites

a. Avantages

- Solutions plus **écologiques** : réduction des émissions et de l'impact environnemental comparé aux fibres synthétiques ou aux stabilisants très énergivores.
- **Disponibilité locale** : dans les régions où les fibres végétales comme l'alfa, le sisal, le chanvre, etc. sont produites, les coûts de transport et d'approvisionnement peuvent être faibles.
- **Amélioration multi-propriété** : non seulement résistance, mais aussi réduction de la déformation, résistance à l'eau, amélioration de la ductilité dans certains cas.

b. Limites

- **Durabilité** : les fibres végétales, sauf traitement spécial, peuvent se détériorer (attaque microbienne, humidité, etc.), ce qui peut réduire les gains à long terme.
- **Uniformité et dispersion** : obtenir une distribution homogène des fibres dans le sol est souvent difficile, surtout à des taux relativement élevés.

- **Variabilité naturelle** : les fibres naturelles ont une grande variabilité de qualité (longueur, diamètre, résistance, teneur en humidité), ce qui rend les résultats moins prévisibles.

6. Conclusion

Après avoir présenter un bref historique de l'évolution de la construction en terre, on définit les principaux modes d'utilisation de la terre crue. Par la suite on a présenté, les propriétés et les intérêts de la construction en terre et les différentes méthodes de stabilisation du matériau terre afin d'augmenter ses performances. Ainsi la terre crue est un matériau de construction de qualité avec de nombreux atouts : recyclable, économique, hygrothermique, de forte inertie, biodégradable. La terre peut être aussi combinée avec d'autres matériaux. Une des technologies développer est la technique de la brique en terre comprimé.

CHAPITRE 02

**«MATERIAUX ET METHODES
EXPERIMENTALES»**

Chapitre 1 : Généralité sur la brique en terre comprimée renforcée par des fibres végétales

1. Introduction

On se propose dans ce chapitre de présenter les différents matériaux naturels utilisés pour la confection des briques en terre comprimées. Pour cela, un protocole expérimental normalisé a été défini afin d'identifier les caractéristiques physiques des matériaux et d'étudier le comportement mécanique des briques en terre comprimées.

2. Terre crue

La terre crue testée dans cette étude est un matériau local, de la région de Remich (Tlemcen, Algérie) (figure 2.1).



Figure2-1 : terre crue

3. Granulométrie

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la granulométrie de la terre crue, le tamisage à voie humide XP P94-041, 1995 **Source spécifiée non valide.** et sédimentométrie NF P 94-057 **Source spécifiée non valide.**



Figure 2-2 : Analyse granulométrique par voie humide du matériau terre



Figure 2-3 : Analyse granulométrique par sédimentation

4. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg du matériau ont été déterminées selon la norme NF P 94-051 **Source spécifiée non valide.** . Cet essai a été réalisé en deux phases :

1. La première phase : est pour déterminée la limite de liquidité à l'aide de la boîte de Casa grande (fig.2.4).



Figure 2-4 : Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Cassagnarde

2 -La deuxième phase : est pour déterminée la limite de plasticité au rouleau (fig.2.5).

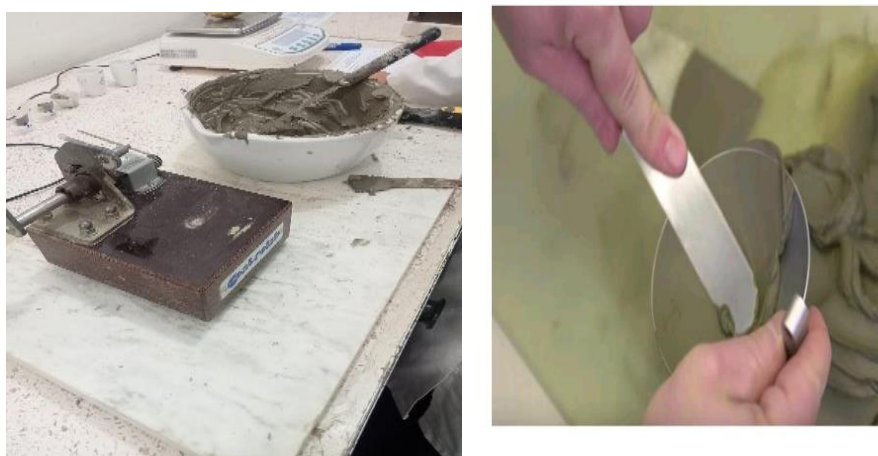


Figure2-5: Détermination de la limite de plasticité au rouleau

5. Essai au bleu de méthylène

L'essai de bleu méthylène a été réalisé selon la norme NF P 94-068 **Source spécifiée non valide.** (fig2.6). Cet essai permet de déterminer la valeur de bleu du sol (VBS) et à partir de cette valeur on peut déduire la surface spécifique des particules constituant le sol (S_{ST}).



Figure 0-6 : essai de bleu méthylène

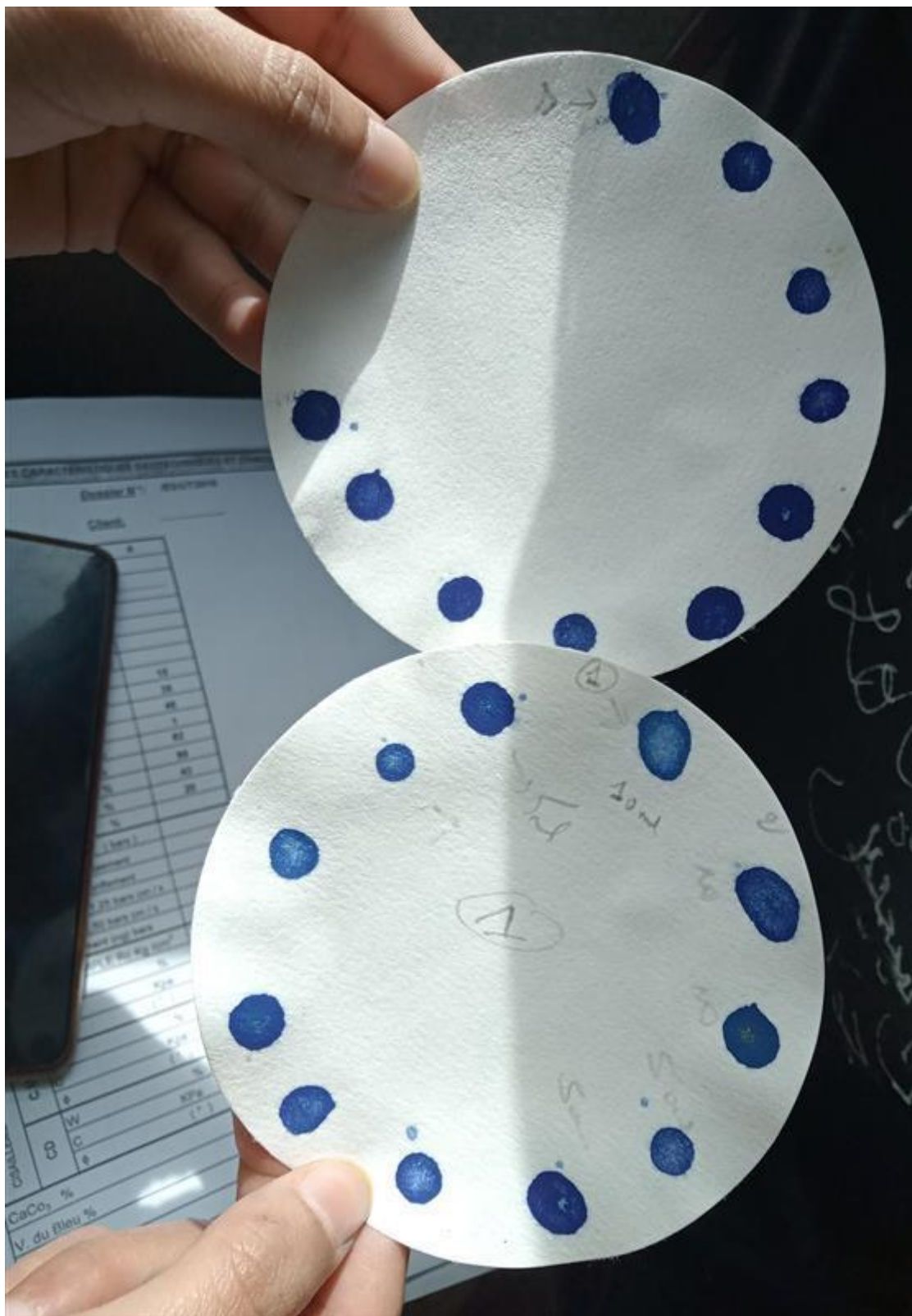


Figure 0-7 : Détermination de la valeur de VBS

6. Préparation des briques en terre comprimées

Afin de réaliser notre protocole expérimental, nous avons préparé des échantillons sous forme d'éprouvettes de sol compacté, de dimensions : diamètre = 50 mm et hauteur = 100 mm. La teneur en eau est fixée à $w = 10\%$, et la densité à 2 g/cm^3 (soit 2000 kg/m^3). De l'alfa, sous deux formes (coupée et broyée), a été incorporée au sol avec des pourcentages de 0,5 %, 1 % et 1,5 %.



Figure 0-10 : Malaxage d'alfa avec la terre.

La confection des éprouvettes des briques en terre a été réalisée à l'aide d'un moule de dimensions de $5 \times 10 \text{ cm}$. Après le remplissage du moule avec le matériau un compactage statique a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique.

Les éprouvettes après le démoulage ont été couvertes avec un papier film et papier aluminium et autre éprouvette dans l'étuve.



Figure 0-11 : Éprouvettes de briques en terre comprimées.

7. Fibres végétales

Il s'agit de la fibre végétale alfa récoltée dans la région de la ville de Tlemcen (Fig2.10).



Figure 0-9 : Alfa

L'alfa a été utilisé à l'état naturel sans aucun traitement chimique. Elle est introduite dans la matrice du matériau sous forme de fibres coupées en 1 cm de longueur et sous forme broyée. Ces fibres ont été mélangées à la terre.

8. Essai d'ultrason

La méthode ultrasonore permet d'évaluer les propriétés mécaniques d'un matériau sans l'endommager, en mesurant la vitesse de propagation des ondes élastiques à travers celui-ci. Dans le cas des briques en terre comprimée, cette approche permet d'estimer le **module de Young dynamique (E_{dyn})**, paramètre essentiel pour apprécier la rigidité du matériau. La vitesse des ondes ultrasonores dépend de la masse volumique du matériau et de ses constantes élastiques, notamment le coefficient de Poisson (ν).



Figure 0-8 : Essai d'ultrason

Lorsque la vitesse des ondes longitudinales (V_l) est connue, le module de Young dynamique peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$E_{dyn} = \rho V_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Où :

- E_{dyn} : module de Young dynamique (Pa),
- ρ : masse volumique du matériau (kg/m^3),
- V_l : vitesse des ondes longitudinales (m/s),
- ν : coefficient de Poisson (sans dimension).

Cette expression relie directement les propriétés mécaniques du matériau à la mesure ultrasonore. Ainsi, plus la vitesse de propagation est élevée, plus le matériau est rigide et homogène. Dans le cas des briques de terre comprimée, cette méthode non destructive permet non seulement d'évaluer la qualité de la compaction et la cohésion interne, mais aussi de corréler le module dynamique avec la **résistance à la compression** issue des essais classiques.

9. Résistance à la compression simple

L'essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes en béton de terre comprimées sèches et humide conformément à la norme XP P13-901 **Source spécifiée non valide**. Le dispositif expérimental est composé d'une presse didactique de capacité maximale de 160 kN semi-automatisée. Le principe de l'essai est de soumettre l'échantillon à une vitesse de chargement constante provoquée par le déplacement du vérin de la presse, et de mesurer la force axiale qui sera affichée à la fin de l'essai sur le cadran (fig.2.14).



Figure 0-1 : Illustration d'un essai de compression simple d'une brique en terre comprimée.

La résistance en compression R_c est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R_c = F/S$$

Où F est la force appliquée sur l'éprouvette et S la section transversale de l'éprouvette.

10. Résistance à la traction par fendage : « Essai Brésilien »

L'essai de traction indirecte, dit essai brésilien, permet d'évaluer la résistance à la traction d'un matériau fragilisant par une sollicitation de compression appliquée diamétralement sur un cylindre. La charge appliquée génère un champ de contraintes qui provoque une rupture par traction perpendiculaire à la ligne de charge. Le test est apprécié parce qu'il est simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'accrochages complexes à l'éprouvette comme pour un essai de traction directe.

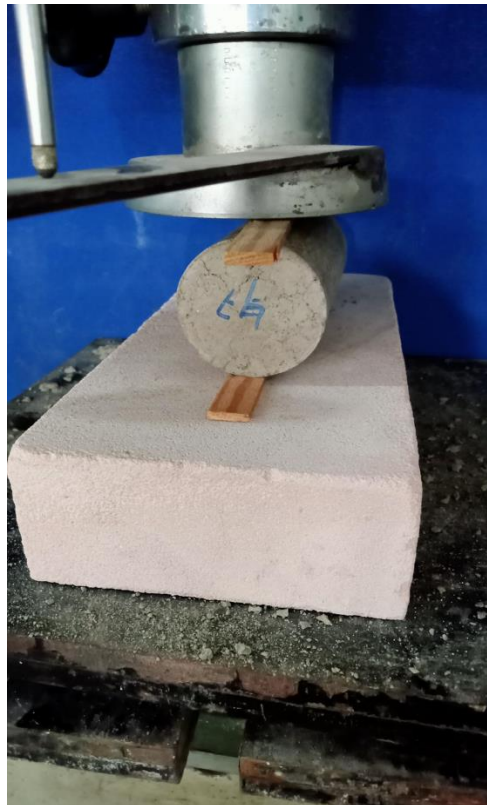


Figure2-1 : Essai de traction

Pour une éprouvette cylindrique, la **résistance à la traction par l'essai brésilien R_t** est calculée par :

$$R_{tj} = \frac{2P}{\pi DL}$$

P : est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical.

D et L : respectivement diamètre et longueur de l'éprouvette de forme cylindrique.

11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux nécessaires pour notre démarche expérimentale. Par la suite, nous avons présenté les différents essais normalisés utilisés pour identifier chaque matériau.

Ensuite nous avons défini le protocole expérimental adapté pour notre étude en donnant les différentes formulations choisies afin de confectionner les briques en terre comprimée. A la fin, nous avons présenté les essais normalisés utilisés pour étudier le comportement mécanique des briques en terre comprimées.

Les résultats des essais d'identifications des matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes BTC ainsi que les résultats des essais mécaniques seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 03

«RESULTATS ET DISCUSSIONS»

4. Essai de bleu méthylène

Le résultat de l'essai de bleu méthylène est donné par le tableau 3.1.

Tableau 0-1 Résultats de l'essai de bleu méthylène

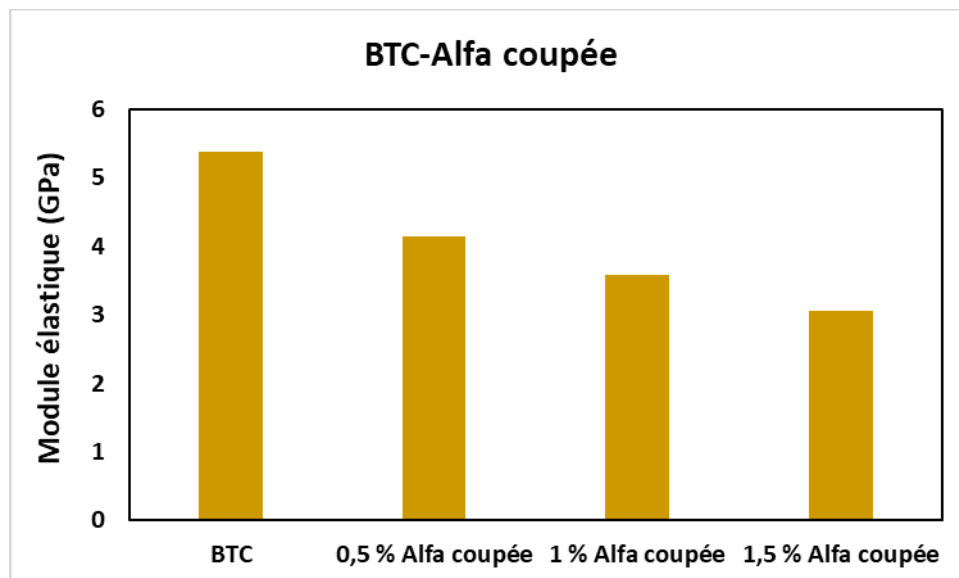
| Valeur de VBS | La surface spécifique Sst (m ² /g) |
|---------------|---|
| 1,6 | 35 |

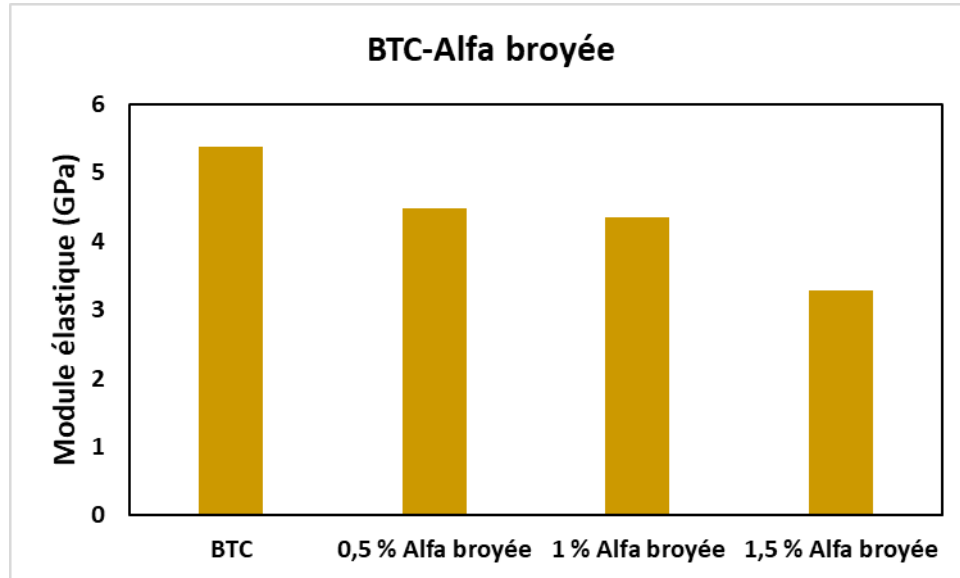
D'après les valeurs de la surface spécifique notre terre est une argile Kaolinite.

5. Résultats de l'essai ultrason

Le module initial déterminé à l'aide de l'appareil Pundit correspond au module de Young dynamique, calculé à partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ce module reflète la rigidité élastique du matériau sous de très faibles déformations et peut être corrélé au module statique obtenu par essai mécanique de compression.

Les résultats des mesures du module élastique sont présentés dans les figures ci-dessous, pour les deux cas des fibres Alfa coupée et broyée.





L'évolution du module élastique moyen en fonction du pourcentage et du type de fibres d'alfa incorporées montre une tendance générale à la diminution de la rigidité des briques de terre comprimée (BTC). Pour les BTC sans fibres, le module atteint une valeur élevée et stable, de l'ordre de 5,3 GPa, traduisant une bonne cohésion et une compacité optimale de la matrice.

L'ajout de fibres d'alfa broyées entraîne une réduction progressive du module élastique : il passe de 4,45 GPa à 4,3 GPa pour des teneurs respectives de 0,5 % et 1 %, puis chute plus nettement à environ 3,3 GPa pour 1,5 % de fibres. Cette diminution traduit le rôle assouplissant des fibres broyées, moins rigides que la matrice minérale, et responsables d'une légère perte de compacité.

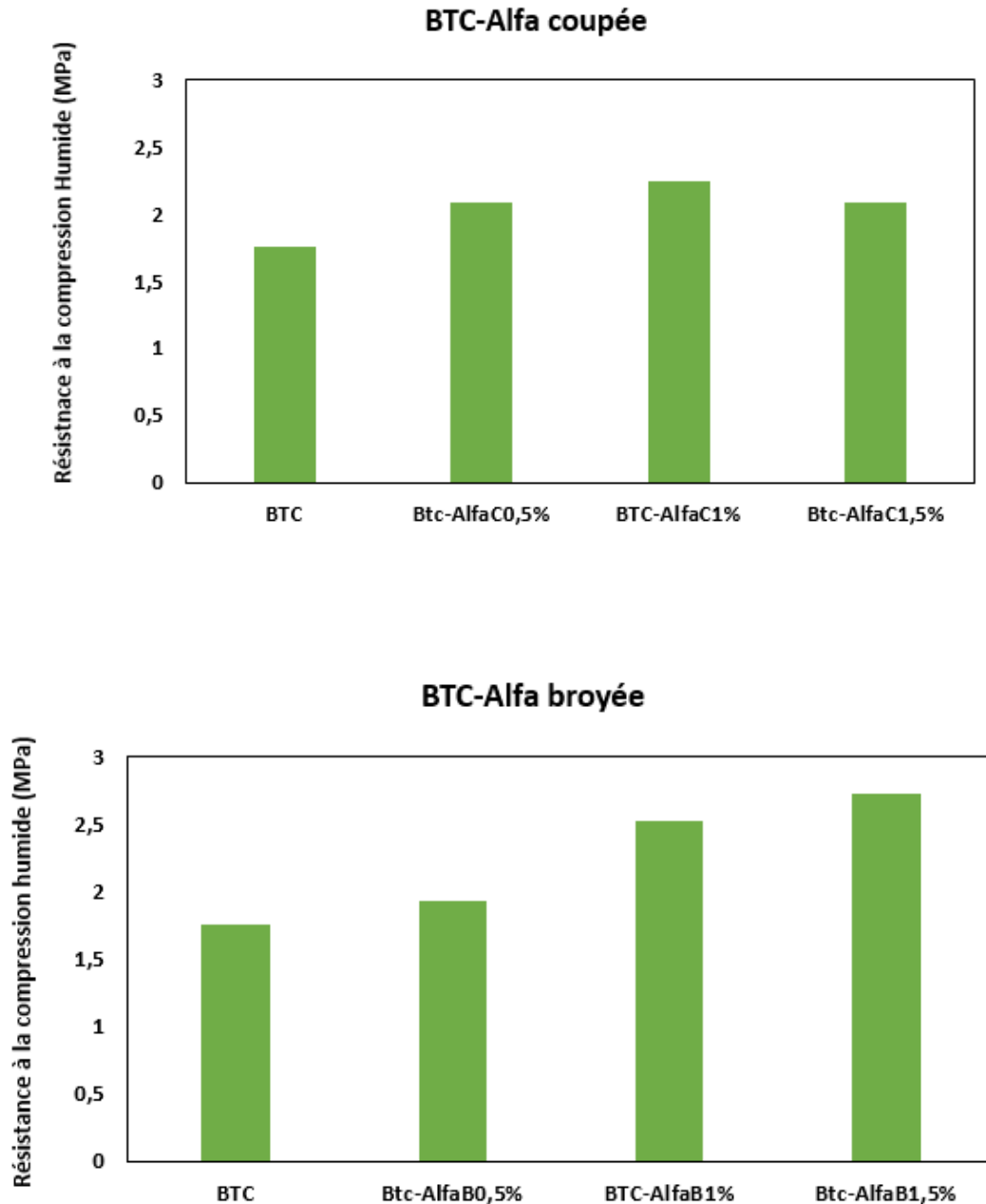
De manière similaire, pour les fibres d'alfa coupées, l'histogramme met en évidence une baisse graduelle du module d'élasticité moyen, passant d'environ 5,38 GPa pour la BTC non renforcée à 4,48 GPa puis 3,28 GPa lorsque la teneur en fibres augmente de 0,5 % à 1,5 %.

Dans les deux cas, cette tendance confirme que l'incorporation de fibres végétales réduit la rigidité globale du matériau, tout en améliorant sa ductilité et sa résistance post-fissuration. Ainsi, l'ajout de fibres d'alfa, qu'elles soient broyées ou coupées, constitue un compromis entre rigidité et ténacité : une teneur plus élevée diminue le module élastique mais renforce la capacité du matériau à dissiper l'énergie et à limiter la propagation des fissures.

5. Résultats de l'essai de compression

a. Cas humide

Les résultats de l'essai de compression sur les éprouvettes dans l'état humide sont représentés ci-dessous.



L'analyse de la résistance à la compression en milieu humide révèle une amélioration significative des performances mécaniques des briques de terre comprimée (BTC) suite à l'incorporation de fibres d'alfa. Toutefois, cette évolution dépend fortement du type de fibres et de leur teneur dans la matrice.

Dans le cas des fibres d'alfa coupées, on observe une nette progression de la résistance à la compression par rapport au témoin non renforcé. Ce dernier présente une résistance moyenne de 1,75 MPa, tandis que l'ajout de 0,5 % de fibres augmente la valeur à environ 2,1 MPa. La résistance maximale est atteinte pour une teneur de 1 %, avoisinant 2,25 MPa, traduisant un effet de renforcement optimal. Au-delà de ce seuil, une légère diminution est observée à 1,5 %, bien que les valeurs restent supérieures à celles du BTC de référence. Cette évolution suggère qu'une teneur modérée en fibres (autour de 1 %) améliore la cohésion du matériau et limite la fissuration en milieu humide, tandis qu'un excès de fibres peut engendrer des discontinuités internes réduisant l'efficacité du renforcement.

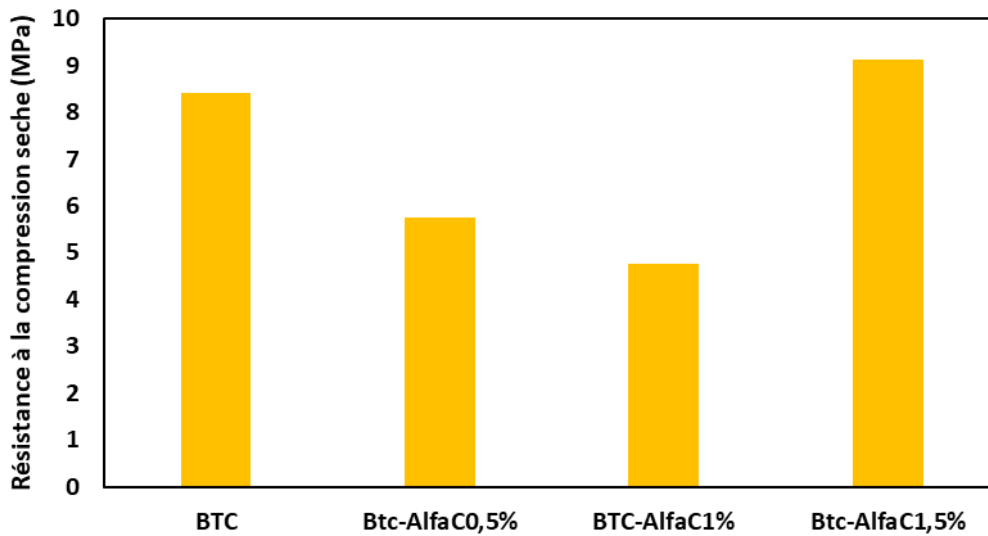
À l'inverse, l'ajout de fibres d'alfa broyées conduit à une amélioration continue de la résistance à la compression. Le BTC témoin conserve une résistance initiale de 1,75 MPa, mais l'incorporation de 0,5 % de fibres produit une légère augmentation, suivie d'un gain notable au-delà de 1 %. La résistance atteint environ 2,5 MPa pour 1 % de fibres et culmine à 2,7 MPa pour 1,5 %. Cette progression traduit une meilleure dispersion des fibres broyées au sein de la matrice terreuse, favorisant la cohésion interne et la réduction des zones de faiblesse.

Ainsi, il apparaît que les fibres d'alfa broyées présentent un effet de renforcement plus homogène et progressif que les fibres coupées, grâce à leur granulométrie fine et à leur meilleure interaction avec la matrice. Tandis que les fibres coupées offrent un optimum de résistance à 1 %, les fibres broyées maintiennent une amélioration croissante jusqu'à 1,5 %, traduisant leur efficacité accrue en milieu humide.

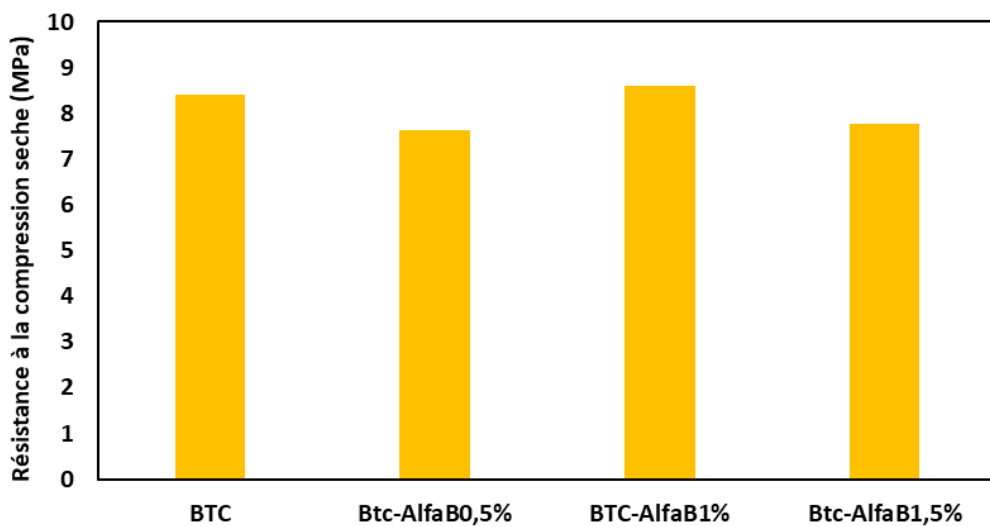
b. Cas sec

Les résultats de l'essai de compression sur les éprouvettes dans l'état humide sont représentés ci-dessous.

BTC-Alfa Coupée(Etat sec)



BTC-Alfa broyée (Etat sec)



L'incorporation de fibres d'alfa coupées exerce une influence notable sur la résistance à la compression des briques de terre comprimée (BTC). À faible teneur 0,5), la résistance à la compression s'améliore légèrement par rapport à celle obtenue avec 1 % de fibres, mais c'est à 1,5 % que la valeur maximale est enregistrée, atteignant environ 9,2 MPa. Cette évolution suggère qu'un dosage adéquat en fibres favorise la cohésion et la rigidité du matériau. Cependant, le BTC non renforcé présente une résistance de 8,4 MPa, très proche de celle observée à 1,5 %, indiquant que l'effet bénéfique des fibres dépend étroitement de leur

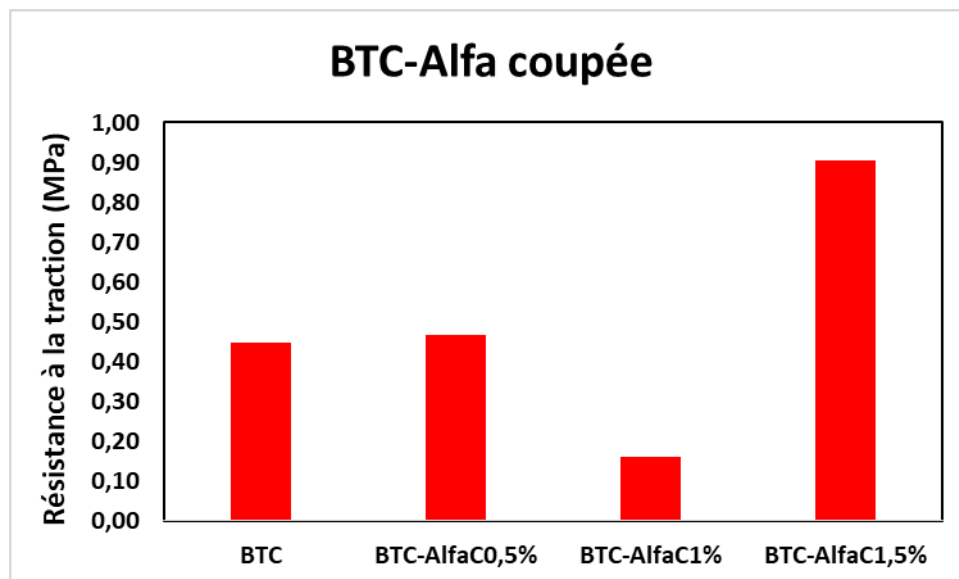
proportion et de leur répartition homogène dans la matrice. Une teneur insuffisante, notamment 1 %, pourrait au contraire induire une hétérogénéité locale, susceptible de fragiliser le matériau.

En ce qui concerne les fibres d'alfa broyées, la tendance diffère légèrement. Le dosage optimal est observé à 1 %, avec une résistance moyenne d'environ 8,6 MPa, suivie de près par le témoin sans fibres $\approx 8,4$ MPa. En revanche, l'ajout de 0,5 % de fibres conduit à la résistance la plus faible $\approx 7,6$ MPa, indiquant qu'une faible proportion n'apporte pas de contribution significative à la résistance mécanique. À 1,5 %, une légère diminution est également notée $\approx 7,8$ MPa, probablement liée à un excès de fibres pouvant générer des zones de discontinuité ou des défauts d'adhérence dans la matrice terreuse.

Ainsi, ces résultats montrent que l'effet de renforcement dépend non seulement de la teneur en fibres, mais aussi de leur état physique. Les fibres coupées semblent plus efficaces à forte teneur, tandis que les fibres broyées offrent une résistance optimale à un dosage intermédiaire, traduisant un équilibre entre cohésion, dispersion et rigidité du composite terre-fibres.

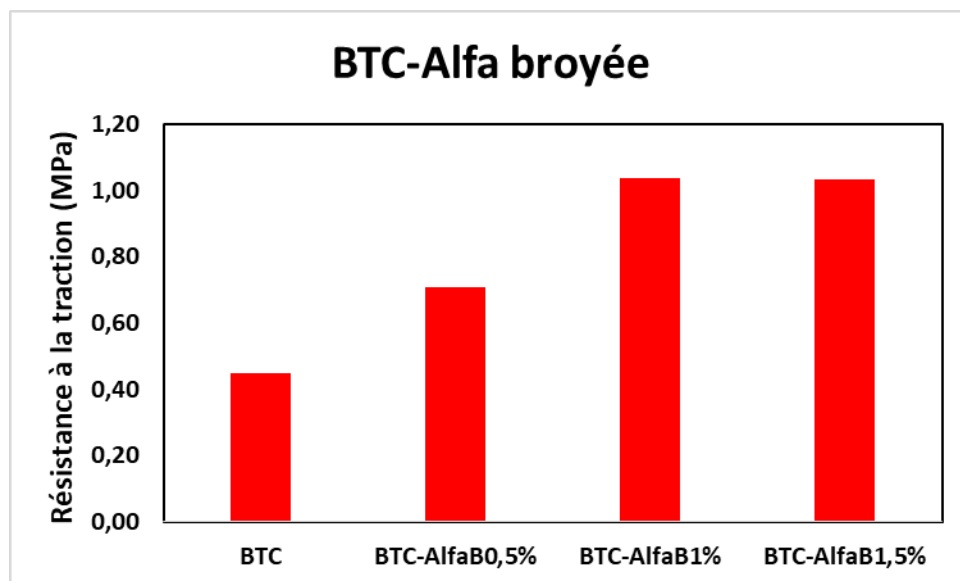
6. Résultats de l'essai de traction

Les résultats de l'essai de traction par l'essai brésilien sur les éprouvettes dans l'état sec sont représentés ci-dessous.



L'analyse des valeurs de résistance à la traction indique une évolution non linéaire du comportement mécanique des briques de terre comprimée (BTC) renforcées par des fibres

d'alfa coupées. Le matériau témoin, sans fibres, présente une résistance moyenne de 0,45 MPa, valeur caractéristique d'une BTC non stabilisée. L'ajout de 0,5 % de fibres n'induit qu'une amélioration marginale, la résistance atteignant 0,46 MPa, soit une progression négligeable. Cela suggère que cette faible teneur en fibres ne suffit pas à créer un réseau interne efficace de renforcement dans la matrice terreuse. En revanche, une teneur de 1 % provoque une chute importante de la résistance, jusqu'à 0,16 MPa. Ce résultat traduit probablement une mauvaise homogénéité du mélange ou une dispersion insuffisante des fibres, créant des zones de faiblesse et des vides qui diminuent la cohésion globale. À l'opposé, l'échantillon contenant 1,5 % de fibres atteint la valeur maximale de 0,90 MPa, soit le double de la résistance initiale. Cette amélioration notable peut être attribuée à la formation d'un maillage interne plus dense, où les fibres d'alfa bien réparties assurent une meilleure répartition des contraintes et limitent la propagation des fissures. Ainsi, ces résultats montrent que l'effet des fibres dépend fortement de leur teneur et de leur dispersion. Une faible proportion ne permet pas d'assurer un renforcement efficace, tandis qu'un dosage optimal (environ 1,5 %) améliore nettement la cohésion interne et la résistance mécanique du matériau.



Les résultats de l'essai brésilien montrent une nette amélioration de la résistance à la traction des briques de terre comprimée (BTC) avec l'incorporation de fibres d'alfa broyée. Le BTC témoin présente une résistance de 0,45 MPa, tandis que les échantillons renforcés atteignent respectivement 0,71 MPa, 1,04 MPa et 1,03 MPa pour des teneurs de 0,5 %, 1 % et 1,5 %. L'évolution croissante jusqu'à 1 % traduit un effet de renforcement optimal lié à une bonne dispersion et à l'action de pontage des fibres. Au-

delà de cette teneur, la résistance tend à se stabiliser, suggérant un seuil de saturation au-delà duquel l'ajout de fibres n'apporte plus de bénéfice significatif, voire pourrait légèrement réduire la compacité du matériau. Ces résultats confirment que les fibres d'alfa broyée améliorent sensiblement le comportement en traction des BTC, rendant le matériau plus ductile et moins fragile.

7. Conclusion

L'ensemble des essais mécaniques met en évidence l'influence notable de l'incorporation de fibres d'alfa sur le comportement des briques de terre comprimée.

Les mesures ultrasonores ont montré une diminution progressive du module d'élasticité dynamique avec l'augmentation de la teneur en fibres, traduisant un assouplissement du matériau. Ce comportement s'explique par la moindre rigidité des fibres par rapport à la matrice terreuse et par une légère réduction de la compacité. Cependant, cette baisse de module n'est pas nécessairement défavorable, car elle s'accompagne d'une amélioration de la ductilité et d'une meilleure capacité d'absorption d'énergie. Concernant la résistance à la compression, les résultats indiquent une amélioration notable pour des teneurs modérées en fibres (autour de 1 %), confirmant l'effet de renforcement dû à l'ancrage des fibres dans la matrice. Au-delà de cette teneur, les performances tendent à se stabiliser ou à légèrement diminuer, probablement en raison d'une dispersion irrégulière des fibres et d'une perte de compacité du mélange. Enfin, les essais de traction indirecte (essai brésilien) ont révélé une augmentation significative de la résistance à la traction, particulièrement avec les fibres d'alfa broyée, dont la granulométrie fine favorise une meilleure homogénéité et un effet de pontage plus efficace. Le matériau renforcé devient ainsi moins fragile et plus tenace, ce qui améliore sa résistance post-fissuration. Dans l'ensemble, le renforcement par fibres d'alfa permet d'améliorer la cohésion interne, de réduire la fragilité et d'optimiser le comportement mécanique global des BTC, à condition de respecter un dosage optimal (autour de 1 %) garantissant un bon équilibre entre rigidité, résistance et ductilité. Ces résultats confirment la pertinence de l'utilisation des fibres végétales locales comme alternative écologique et économique aux renforcements conventionnels.

CONCLUSION GENERALE

L'étude menée dans ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser des fibres végétales comme matériau de renforcement des sols. L'intégration de ces fibres a montré des effets positifs sur les propriétés mécaniques du sol, en particulier en termes de résistance et de stabilité. Les performances observées confirment le potentiel de cette technique dans le domaine de la géotechnique, notamment pour les applications nécessitant une amélioration des caractéristiques du sol à moindre coût et avec un faible impact environnemental. Toutefois, des recherches supplémentaires restent nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les fibres et le sol, ainsi que pour optimiser les paramètres de renforcement en fonction des types de fibres et des sols étudiés. Enfin, le recours aux matériaux naturels dans les solutions d'ingénierie s'inscrit pleinement dans une démarche de développement durable, une perspective incontournable face aux enjeux environnementaux actuels

Notre étude expérimentale constituait à :

3. Identification des matériaux utilisés ;
4. Confectionner les briques en terre comprimées sans alfa ,avec alfa coupée et broyée
5. Etudier la résistance à la compression simple des briques comprimées
6. Etudier la résistance à la traction des briques comprimées

Les résultats montrent que l'ajout progressif des fibres végétales a eu un impact sur la cohésion du sol, avec une optimisation observée à 1,5 %.

Les échantillons renforcés avec des fibres ont montré un comportement plus ductile par rapport aux échantillons non renforcés.

La présence de fibres végétales a contribué à la réduction des fissures et à une meilleure répartition des contraintes.

Dans l'ensemble, le renforcement par fibres d'alfa permet d'améliorer la cohésion interne, de réduire la fragilité et d'optimiser le comportement mécanique global des BTC, à condition de respecter un dosage optimal (autour de 1 %) garantissant un bon équilibre entre rigidité, résistance et ductilité. Ces résultats confirment la pertinence de l'utilisation des fibres végétales locales comme alternative écologique et économique aux renforcements conventionnels.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- AFNOR. (1992). *NF P 94-057 : Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation.*
- AFNOR. (1993, juin 19). *NF P 94-051 : Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle, limite de plasticité au rouleau.*
- AFNOR. (1995). *XP P 94-041 : Sols – Reconnaissance et essais – Identification granulométrique – Méthode de tamisage.*
- AFNOR. (1998). *NF P 94-068 : Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.*
- AFNOR. (2022). *XP P13-901 : Briques et blocs de terre crue pour murs et cloisons – Définitions, spécifications, méthodes d'essais et conditions de réception.*
- Agguerabi, B. (2009). *Architecture : de la terre à la terre – L'avenir salubre.*
- Aattache, A., Mahi, A., Soltani, R., Mouli, M., & Benosman, A. S. (2013). Experimental study on thermo-mechanical properties of polymer (pp. 459–469).
- Aubert, J.-E. (2013). *Caractérisation des briques de terre. Rapport final du projet TERCRUSO.*
- Delahousse, S. (2011). *L'architecture de terre crue en mouvement en France et au Mali : Bâti ancien et technologies innovantes de restauration (Batir).* Université de Nantes.
- Ghomari, F. (1989). *Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau.* INSA Lyon.
- Giboulet, J. (2017). *Les perceptions de la matière terre comme matière à vivre et à construire dans l'architecture.* École nationale supérieure d'architecture, Montpellier.
- GIGA (Groupe industriel des ciments d'Algérie). (2019). *Rapport industriel.* Casablanca : s.n.
- Guillaud, H., & Houben, H. (1995). *Traité de construction en terre (2^e éd.).* Marseille : Parenthèses.
- Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG. (1995). *Blocs de terre comprimée. Volume II : Manuel de conception et de construction.* Eschborn : GTZ.
- Harbit, Y. M. (2005). *Patrimoine en pisé : Étude et modélisation.* Université de Tlemcen.
- Houben, H., & Guillaud, H. (2006). *Traité de construction en terre.* CRATerre / Parenthèses.
- Huret, J. (2019). *Quel avenir pour les constructions en terre crue dans les campagnes d'aujourd'hui ?* Mémoire de master en géographie, Université de Normandie, Caen.

Koadri, Z., Benyahia, A., Deghfel, N., Belmokre, K., Nouibat, B., & Redjem, A. (2019). Étude de l'effet du temps de traitement alcalin de fibres de palmier sur le comportement mécanique des matériaux à base d'argile rouge de la région de M'sila (pp. 107–404).

Lavie Arsène Mango Itulamy. (2019). *Valorisation des gisements argileux pour la fabrication*. Université de Liège.

Mesli, H. (2017). *Construire une architecture bioclimatique par le retour aux origines traditionnelles : Cas de Taghit*.

NF EN 933-1. (2012). *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage*.

P 18-598. (1991, juin 10). *Granulats – Équivalent de sable*.

Paulus, J. (2015). *Construction en terre crue : Dispositions qualitatives, constructives et architecturales. Application à un cas pratique : Ouagadougou*. Université de Liège.

Sébastien Moriset, & Misse, A. (2011). *Rénover et construire en pisé dans le parc naturel régional Livradois-Forez*. CRAterre-ENSAG.

Symons, W. G. (1999). *Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders*. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia.

United Nations. (1992). *Earth construction technology*. United Nations Centre for Human Settlements, Nairobi, Kenya.

Winterkorn, H. F. (1975). *Soil stabilisation*. In *Foundation Engineering Handbook* (Chap. 8). Van Nostrand Reinhold Company.
