

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID TLEMCEM

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Civil

Mémoire pour l'obtention du

Diplôme de Master en Génie Civil

Option **Efficacité Energétique dans les Bâtiments de Construction**

Intitulé

**ETUDE MECANIQUE ET THERMIQUE DE LA BRIQUE EN TERRE
COMPRIMEE, RENFORCEE PAR DES FIBRES VEGETALES**

Présenté par

ANSEUR MANAR et BERRAHAL YUCEF

Soutenu en septembre 2022 devant le jury composé de

GHOMARI Fouad

Professeur

Président

KHELIFI Zakia

Maître de Conférences B

Encadrante

BENACHENHOU Kamila A.

Maître de Conférences B

Encadrante

SAIL Latefa

Professeur

Examinatrice

DEDICACES

Ma raison de vivre Mes très chers parents, que cet humble travail soit l'expression de ma profonde gratitude pour votre immense soutien qui m'a toujours aidé à persévérer. Vos prières et bénédictions m'ont été d'une grande aide dans la conduite de mes études, aucune dédicace ne peut être assez éloquente pour exprimer mon respect, mon amour éternel et ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de consentir depuis l'année de ma naissance, tout au long de mon enfance et même à l'âge adulte. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Que Dieu Tout-Puissant vous garde et vous donne santé, longue vie et bonheur.

A mes adorables petits frères Ahmed et Marwan.

À mes chères sœurs Yasmin et Aya .

À mes très chères amies Nesrin et Halima et je leur souhaite une bonne continuation

A mon binôme Youcef qui était gentil.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la concrétisation de ce travail.

ANSEUR MANAR

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, celle qui a sacrifiée et souffert dans les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussir ma chère mère.

A mon cher père, le plus noble qui par son courage consacré tous ses efforts, et ses moyens pour m'aider à accomplir ce mémoire, et pour me faire réussir.

A mes chers frères A tous les étudiants des années masterzen Génie Civile EEBC (année universitaire 2021/2022).

youcef

REMERCIEMENTS

Toute notre entière gratitude et nos remerciements à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'entreprendre cet humble travail.

On voudrait tout d'abord adresser tout notre respect et notre reconnaissance à nos encadrantes, mademoiselle KHELIFI Zakia et Madame BENACHENHOU Kamila A., pour le temps qu'elles nous ont consacré à nous fournir les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche, pour leur patience, disponibilités, et surtout leurs judicieux conseils. Ceci, nous été d'un soutien particulièrement précieux et indispensable pour mener à bien ce travail. Veuillez trouver toute notre gratitude et notre respect. Sans vous ce travail n'aurait pas été aussi riche et n'aurait pu voir le jour sans votre aide et votre supervision.

On remercie Professeur GHOMARI Fouad, qui nous a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. On remercie aussi Professeur SAIL Latifa qui a bien voulu examiner ce travail. Qu'elle trouve ici mes considérations les plus sincères.

Ma reconnaissance va à tous les enseignants et les équipes des laboratoires du département de Génie Civil de l'université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen.

RÉSUMÉ

La valorisation des matériaux locaux, contribue à la réduction des coûts de construction et de l'énergie consommée. Dans ce cadre, le travail présenté consiste à confectionner un béton en terre comprimé, constitué de matériaux bruts locaux de la région de Tlemcen. Pour cela, nous avons défini un protocole expérimental afin d'identifier les caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour la confection des briques en terre comprimée de dimensions 5 x 10 x 20 cm. deux modes de briques ont étudiés, des briques en terre comprimées non stabilisées et stabilisées avec un ajout de 5% de ciment et autres avec 1% des fibres de paille d'orge. Ensuite, nous avons étudié le comportement mécanique et thermique des briques confectionnées.

Mots clés : terre crue ; brique en terre comprimée, paille d'orge, résistance de compression simple ; conductivité thermique.

ABSTRACT

The upgrading of local materials contributes to the reduction of construction costs and energy consumption. In this context, the work presented consists of making a concrete in compressed earth, made of local raw materials from the Tlemcen region. For this, we have defined an experimental protocol to identify the physical characteristics of the materials used for the manufacture of 5 x 10 x 20 cm compressed earth bricks. Two methods of bricks have been studied, unstabilized and stabilized compressed earth bricks with a 5% cement and other addition with 1% barley straw fibre. We then studied the mechanical and thermal behaviour of the made-up bricks.

Keywords: raw earth; compressed earth brick, barley straw, simple compression resistance; thermal conductivity.

ملخص

يساهم الترويج للمواد المحلية في تقليل تكاليف البناء واستهلاك الطاقة في هذا السياق، يتألف العمل المقدم من صنع خرسانة ترابية مضغوطة، صنوعته من واد أولية حلبة من نطقة تلمسا. لهذا، حددنا بروتوكولاً تجريبياً من أجل تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد المستخدمة في تصنيع الطوب الأرضي المضغوط بأبعاد $5 \times 10 \times 20$ سم. تمت دراسة وعين من الطوب، طوب أرضي مضغوط غير مستقر وضغوط مع إضافة 5% أسمنت والآخر بنسبة 1% ألياف قش الشعير. ثم درسنا السلوك الميكانيكي والحراري للطوب المصنوع.

كلمات مفتاحية: الأرض الخام. طوب أرضي مضغوط، قش الشعير، قوة ضغط بسيطة؛ توصيل حراري.

Table des matières

DEDICACES	III
Remerciements.....	IV
Résumé en français.....	V
Liste des figures	X
Liste des tableaux.....	XII
Introduction générale	1
1. Chapitre 01 Généralité sur la brique en terre crue renforcée en terre végétale.....	3
1. Introduction.....	4
2. La construction en terre	4
2.1. Bref historique	4
2.2. Les principaux modes d'utilisation de la terre.....	6
2.3. Avantages et inconvénients de la construction en terre crue	14
3. Propriétés des constructions en terre.....	15
4. La stabilisation en terre	15
4.1. Les objectifs de la stabilisation.....	15
4.2. Les techniques principales.....	16
5. Les intérêts de la construction en terre.....	18
6. Conclusion.....	19
2. Matériaux et méthodes expérimentales énergétique dans le bâtiment	20
1. Introduction.....	21
2. Terre crue.....	21
2.1. Granulométrie.....	21
2.2. Limites d'Atterberg.....	22

2.3. Essai au bleu de méthylène.....	23
2.4. La masse volumique des grains solides	23
3. Sable	23
3.1. Granulométrie.....	24
3.2. Equivalent du sable.....	24
4. Ciment.....	25
5. Fibres végétales	25
6. Préparation des briques en terre comprimées.....	26
7. Comportement sous l'effet de l'humidité : essai par immersion	27
8. Résistance à la compression simple.....	27
9. Conductivité thermique	28
10. Conclusion.....	29
3. Chapitre 03 : Résultats et discussions énergétique dans le bâtiment.....	30
1. Introduction.....	31
2. Terre crue.....	31
3. Sable	33
4. Etude de la durabilité des briques en terre comprimées	34
5. Résistance à la compression simple.....	36
6. Conductivité thermique des briques en terre comprimées.....	37
7. Conclusion.....	38
Conclusion générale	39
4. Bibliographie	42

Liste des figures

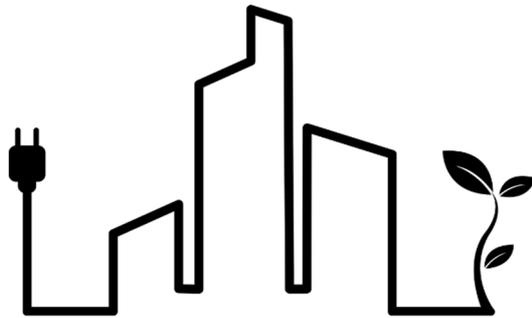
Figure 1-1 L'arche de Ctésiphon (Irak).....	4
Figure 1-2 La ziggourat d'Etemenanki à Babylone	5
Figure 1-3 La cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou	5
Figure 1-4 L'architecture en terre crue dans le monde [2].....	6
Figure 1-5 Construction en pisé « l'Alhambra », Grenade	7
Figure 1-6 Ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc).....	7
Figure 1-7 Séchage des briques crue	8
Figure 1-8 Construction en Adobe, Shibam (Yémen).....	8
Figure 1-9 Construction en Adobe, Ghadamès (Libye).....	9
Figure 1-10 Les tronçons en pisé de la Muraille de Chine.....	10
Figure 1-11 Palais du Potala (Tibet).....	10
Figure 1-12 Les tulous des Hakka.....	10
Figure 1-13 Construction en Torchis, Safranbolu (Turquie).....	11
Figure 1-14 Construction en Torchis, Diamantina (Brésil).....	12
Figure 1-15 Construction en Torchis, Strasbourg (France).....	12
Figure 1-16 Maison en terre-paille, Pyrénées (France)	13
Figure 1-17 Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre [16].....	18
Figure 2-1 terre crue.....	21
Figure 2-2 Analyse granulométrique par voie humide du matériau terre.....	21
Figure 2-3 Analyse granulométrique par sédimentation	22
Figure 2-4 Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Casagrande.....	22
Figure 2-5 Détermination de la limite de plasticité au rouleau.....	22
Figure 2-6 Détermination de la valeur de VBS.....	23
Figure 2-7 Détermination de la masse volumique des grains solides	23
Figure 2-8 Analyse granulométrique du sable.....	24
Figure 2-9 Essai d'équivalent du sable.....	24
Figure 2-10 Paille d'orge	25
Figure 2-11 Malaxage de la paille d'orge avec la terre.....	26
Figure 2-12 Éprouvettes de briques en terre comprimées.....	27

Figure 2-13 Illustration de l'essai d'immersion.....	27
Figure 2-14 Illustration d'un essai de compression simple d'une brique en terre comprimée.	28
Figure 2-15 Appareille de mesure Quickline™ 30 utilisé pour l'essai thermique.....	28
Figure 3.1 Courbe granulométrique de la terre crue.....	31
Figure 3.2 Limite de liquidité de la terre crue.....	32
Figure 3.3 Position de la terre crue sur l'abaque de Casagrande.....	32
Figure 3.4 Courbe granulométrique du sable.....	33
Figure 3.5 Brique en terre comprimée à la fin de l'essai d'immersion.....	34
Figure 3.6 Brique en terre comprimée stabilisée avec la paille	35
Figure 3.7 Briques en terre à la fin de l'essai de compression.....	37
Figure 3.8 Conductivité thermique des brique en terre comprimées.....	37

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Composition du ciment utilisé	25
Tableau 2-2 Résistance mécanique à la compression du ciment utilisé.....	25
Tableau 2-3 Formulations des briques en terre comprimées.....	26
Tableau 3-1 Résultats de l'essai de bleu méthylène	32
Tableau 3-2 Résultats de l'équivalent du sable	33
Tableau 3-3 Les résultats de perte en masse pour l'essai d'immersion	34

INTRODUCTION GENERALE



*« Nous n'héritons pas de la terre de nos
parents, nous l'empruntons à nos enfants. »*

Antoine de Saint-Exupéry

Le contexte de développement durable doit être présent dans toutes les activités exercées par l'être humain afin de préserver l'environnement et encourager la gestion des ressources naturelles. Cependant, le secteur du Génie Civil se trouve face à une revendication de rénover ses pratiques et méthodes de construction, afin de prendre en compte les facteurs environnementaux devenus cruciaux. En effet, une construction respectueuse de l'environnement s'intéresse particulièrement à réduire la pollution par la diminution de la consommation énergétique, à l'utilisation de matériaux « écologiques », elle se présente comme une nécessité de toute urgence pour notre nouvelle ère. En effet, les matériaux issus de matières premières renouvelables comme les fibres végétales peuvent être considérées comme une réponse au problème d'épuisement des ressources naturelles ; les matériaux recyclables comme la terre apportent, en plus, une réponse au problème de déchets en fin de vie du bâtiment. De ce fait, notre présent travail s'intéresse à la valorisation des matériaux locaux, la terre, matériau disponible en quantité et omniprésent, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. En plus de son caractère écologique, sa densité élevée lui confère de précieuses qualités d'inertie thermique pour le stockage de la chaleur solaire et sa lente restitution ainsi que pour le confort d'été. La terre crue est utilisée comme matériau structurel en différents modes à dans le domaine de la construction tels que : la bauge, le pisé, l'adobe, les briques de terre compressée. Elle peut également être utilisée comme matériau de remplissage et d'isolation dans le torchis, la terre-paille et la terre-copeaux bois. Elle permet aussi de formuler des enduits (1).

Ainsi l'objectif principal de notre travail qui s'inscrit dans un cadre expérimental, est de confectionner des briques en terre comprimées non stabilisées et stabilisées avec l'ajout de 5% de ciment et 1% de paille. Étudier la tenue à l'eau, la résistance à la compression simple de ce matériau et mesurer sa conductivité thermique.

Afin de mener à bien ce modeste travail, nous allons le structurer en trois parties essentielles.

Le premier chapitre est consacré au matériau terre, son histoire, son évolution dans le temps, son mode d'utilisation dans la construction, ainsi que ses propriétés.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents matériaux naturels utilisés pour la confection des briques en terre comprimées, le protocole expérimental normalisé

pour l'identification des caractéristiques physiques des matériaux et étudier le comportement mécanique et thermique des briques en terre comprimées.

L'objectif du chapitre trois est de présenter et d'interpréter les résultats du protocole expérimental.

Enfin, nous achèverons notre modeste travail par une conclusion générale qui présente les principaux résultats obtenus et observations constatées.

CHAPITRE 01

**« GENERALITE SUR LA BRIQUE EN TERRE
CRUE RENFORCEE EN TERRE VEGETALE »**

1. Introduction

Depuis près de 10.000 ans que les hommes bâtissent des abris, des villes, « la terre crue » a été et reste, à travers les traditions historiques, l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. C'est ainsi qu'aujourd'hui plus du tiers des habitants de la planète vit dans des habitats en terre.

Dans ce chapitre, nous présenterons le matériau terre, son histoire, son évolution dans le temps, son mode d'utilisation dans la construction, ainsi que ses propriétés. Les techniques de construction en terre crue évoluent encore aujourd'hui grâce aux différents procédés de stabilisation, nous définirons quelques types notamment ceux en rapport avec notre étude. Nous tenterons de faire ressortir les avantages et les inconvénients de la construction en terre ainsi que les intérêts de son existence.

2. La construction en terre

2.1. Bref historique

La terre est utilisée depuis plus de onze millénaires, c'est sans aucun doute le matériau le plus ancien de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau (Huret). A titre d'exemple, on retrouve l'arche de Ctésiphon en Irak (figure 1.1), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (figure 1.2), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (figure 1.3). On constate alors que les sites archéologiques en terre crue sont présents sur tous les continents habités

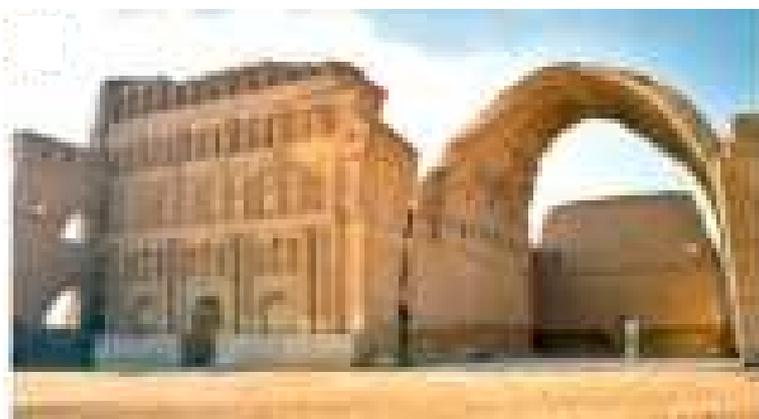


Figure 1-1 L'arche de Ctésiphon (Irak) (2)



Figure 1-2 La ziggourat d'Etemenanki à Babylone (2)



Figure 1-3 La cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (2)

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 (3). 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.

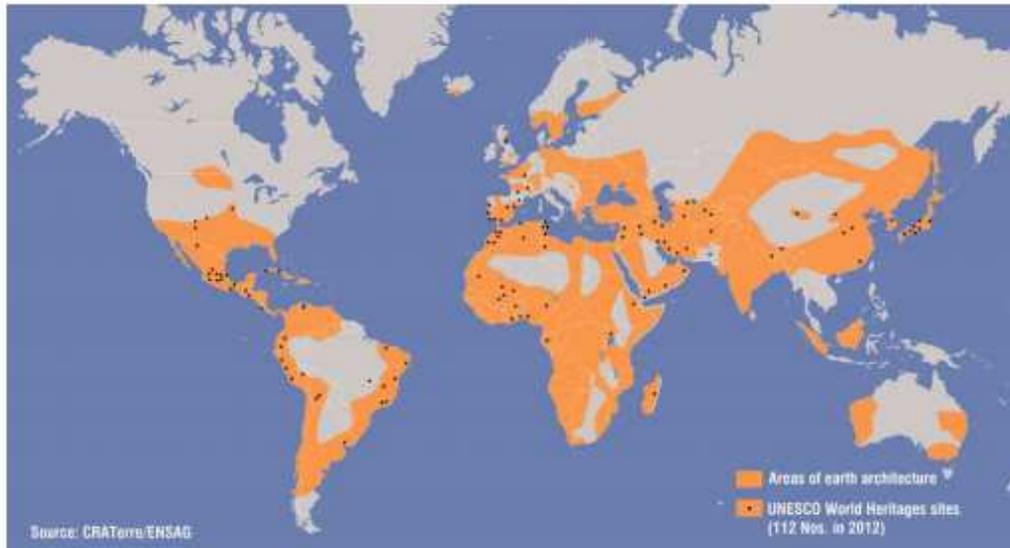


Figure 1-4 L'architecture en terre crue dans le monde (4)

2.2. Les principaux modes d'utilisation de la terre

Il existe plusieurs modes de construction avec une multitudes de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. En effet, les éléments déterminants de la technique utilisées sont nés de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de traditions différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux locaux disponibles. La construction en terre reste un témoignage vivant de l'histoire et de la culture des civilisations. Nous présentant ci-après les techniques les plus utilisées.

2.2.1 Le pisé

Le pisé a été utilisé pour la première fois à Carthage en 814 avant Jésus-Christ (5). C'est un mélange de terre graveleuse, très faiblement amendé d'eau. La terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Ces outils sont en bois. Ce procédé consiste à construire des murs massifs et porteurs de plus de 50 cm d'épaisseur. On dénombre de très nombreux sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. A titre d'exemple, les tronçons de la Grande Muraille de Chine, palais du Potala au Tibet et de l'Alhambra à Grenade (figure 1.5), ksar Aït-Ben-Haddou au Maroc (figure 1.6). Les plus beaux exemples d'architecture en pisé peuvent être observés dans le Maghreb (Algérie, Maroc) et en Espagne, au Portugal (puis dans les colonies hispano-portugaises, Mexique, Pérou, Brésil) (6).



Figure 1-5 Construction en pisé « l'Alhambra », Grenade (2)



Figure 1-6 Ksar Ait-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc) (2)

2.2.2 L'adobe

L'adobe est une brique en terre crue façonnée à la main ou dans un moule en bois à l'état plastique et séchée à l'air libre (figure 1.7), puis, dès qu'elles peuvent être manipulées sans se déformer, on les dresse sur les panneresses afin qu'elles sèchent uniformément sur les faces de pose et d'appui. Une fois sèches, les briques sont stockées puis maçonnées avec un mortier de terre extrêmement collant. Il s'agit de la technique de construction en terre la plus rapide (2). La terre utilisée pour la fabrication des adobes est de granulométrie relativement fine : elle ne doit contenir ni cailloux ni graviers étant donné les petites dimensions des moules et le travail manuel de la terre (2). Elle ne doit pas non plus être

trop argileuse pour éviter les fissurations au séchage. Afin de minimiser ces dernières, on peut également y rajouter du sable ou des fibres végétales.



Figure 1-7 Séchage des briques crue (7)

Cette technique a été pratiquée depuis le Néolithique (12000 à 4000 ans avant notre ère) au Proche Orient. Elle a connu une large évolution depuis le VIII millénaire ACN, époque à laquelle les premières briques de terre crue, de formes coniques, ont été façonnées à la main sans moule. Vers 8000 avant Jésus Christ, des briques de terre en forme de pain, façonnées ont été trouvées à Jéricho en Cisjordanie et Mureybet en Syrie. Les plus anciennes briques rectangulaires, plus récentes que les précédentes, ont été retrouvées en Turquie sur le site de Çatal Höyük et datent quant à elles VI^e millénaire ACN. Une vingtaine de centres historiques en adobe sont classés au patrimoine mondial, dont Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert) (figure 1.8), Ghadamès en Libye (figure 1.9).

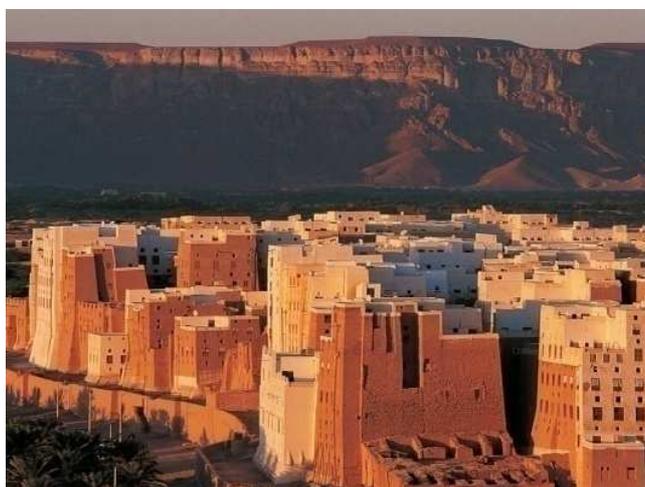


Figure 1-8 Construction en Adobe, Shibam (Yémen) (2)



Figure 1-9 Construction en Adobe, Ghadamès (Libye) (2)

2.2.3 Le Pisé

Le pisé dérivé du mot français apparu à Lyon en 1562 d'origine latine. C'est un mélange de terre graveleuse, très faiblement amendé d'eau. La terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Ces outils sont en bois. Par la suite, la construction en pisé est modernisée par la suite grâce à l'utilisation de marteaux adaptés aux marteaux piqueurs et de branches métalliques modulaires.

La technique du pisé, est apparue pour la première fois à Carthage en Tunisie en 814 avant Jésus-Christ (8). Elle s'est alors répandue autour du bassin méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VIIe siècle. Plusieurs sites à travers le monde sont inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. A titre d'exemple : certaines parties de la Grande Muraille de Chine (figure 1.10), palais du Potala au Tibet (figure 1.11), l'Alhambra à Grenade (voir figure 1.5), ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech au Maroc (voir figure 1.6), les tulous des Hakka (figure 1.12). Ce procédé connu aussi en Algérie avant 1962 est encore employé à ce jour au Maroc (9). La technique du pisé s'est industrialisée à grande échelle dans les années 1980 en Australie avec une normalisation de la construction en

Chapitre 1 : Généralité sur la brique en terre crue renforcée en terre végétale

terre, en imposant que la terre soit aussi solide que le béton, et ceci en la stabilisant avec du ciment ou de la chaux.



Figure 1-10 Les tronçons en pisé de la Muraille de Chine (2)



Figure 1-11 Palais du Potala (Tibet) (7)



Figure 1-12 Les tulous des Hakka (2)

2.2.4 Le Torchis

La technique du torchis est « mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable. Ainsi, elles fissurent facilement au séchage. C'est pourquoi on y ajoute des fibres végétales (généralement de la paille). La technique du torchis, est une des techniques de construction les plus anciennes : développée au Xe millénaire ACN au Proche-Orient, elle s'est ensuite répandue durant l'époque néolithique le long du Danube avant de s'étendre à toute l'Europe continentale boisée au Vie millénaire. Elle disparaît en Catalogne et en France méridionale, en l'an mille (1000) avant notre ère, par contre se maintenant en France septentrionale et dans toute l'Europe tempérée jusqu'à la période romaine (6).

En ce qui concerne le patrimoine architectural en torchis, bien que la liste est moins importante que celle de l'adobe et du pisé, on recense de nombreuses constructions en torchis dans les régions boisées d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, avec comme exemples la ville turque de Safranbolu (figure 1.13) ou la ville brésilienne de Diamantina (figure 1.14). De nombreux centres historiques du Nord de l'Europe sont également à citer en exemple comme les villes de Strasbourg (figure 1.15), Troyes, Tours, Colmar, etc.



Figure 1-13 Construction en Torchis, Safranbolu (Turquie) (2)



Figure 1-14 Construction en Torchis, Diamantina (Brésil) (2)



Figure 1-15 Construction en Torchis, Strasbourg (France) (2)

2.2.5 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 (3). 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.

2.2.6 Terre paille

Elle aussi appelé « terre allégé ». Elle est mise au point en Allemagne dans les années 40 par l'allemand Franz Volhard. Cette technique est un mélange terre-paille non porteur utilisant une ossature bois le plus souvent, la proportion de ses deux composantes avec environ 80% de paille et 20 % de terre (7). Pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille (4). Le terre-paille est principalement banchée et compactée pour rigidifier l'ensemble du bâti, mais peut être aussi réalisée par des panneaux préfabriqués compressés de 15 cm à 20 cm d'épaisseur (figure 1.16). D'une manière générale, la construction en terre-paille est un isolant acoustique et thermique, mais aussi hygrométrique grâce à la « perspirante » des deux matériaux. Des études allemandes et autrichiennes montrent que le terre-paille offre une très bonne résistance au feu (7) . Ce procédé sera l'objet de notre étude expérimentale détaillée dans le chapitre 2.



Figure 1-16 Maison en terre-paille, Pyrénées (France) (7)

2.3. Avantages et inconvénients de la construction en terre crue

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté les modes de construction en terre crue les plus utilisés. Le tableau 1.1 ci-après synthétise les avantages et les inconvénients de chaque procédé.

Tableau 1.1 Les avantages et les inconvénients des différents types de brique en terre crue (10)

Types de brique	Avantages	Inconvénients
Brique d'adobe	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandée et plus adapté pour des cloisons, murs intérieurs. 	<ul style="list-style-type: none"> • La fabrication exige beaucoup de terre et de main d'œuvre
Torchis	<ul style="list-style-type: none"> • Plus solide que la terre crue seule ; • Séchage rapide ; • Plus économique que les autres types de terre crue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le torchis composé en partie de terre crue n'est pas une construction porteuse à elle seule
Pisé	<ul style="list-style-type: none"> • Mur solide et autoporteur ; • Très bon isolant-phonique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Très sensible à la pluie, a l'humidité et au phénomène gel-dégel ; • Formation pratique indispensable pour les autos-constructeurs ; • Mauvais isolant pour les rebords de fenêtre.
Brique de terre comprimée (BTC)	<ul style="list-style-type: none"> • Mur facile à mettre en œuvre ; • Qualités d'inertie thermique et d'assainissement 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication de la brique longue et fatigante • Fragilité, au moindre choc la brique se brise ou s'effrite ; • Se détériore sous l'effet du gel.

3. Propriétés des constructions en terre

Dans les maisons construites en terre règne souvent une singulière harmonie ; elle est due à la fois au même matériau et à la qualité des espaces et des rythmes architecturaux. Mais le confort des architectures de terre n'est pas seulement spirituel ; il est aussi thermique ; Il y fait frais en été et chaud en hiver (11). Ainsi, on peut résumer les avantages écologiques des constructions en terre crue dans les points suivants :

- Le sol absorbe et libère l'humidité.
- La terre régule la température par inertie thermique.
- La terre est un très bon isolant acoustique.
- La terre utilise peu d'eau en phase de transformation
- La terre est une ressource locale abondante et renouvelable.

4. La stabilisation en terre

La stabilisation d'un sol est définie comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière (12). En effet, les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié. Il faut connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (13).

4.1. Les objectifs de la stabilisation

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont (14), (12), (15) :

- L'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- La réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),

- L'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

4.2. 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.

4.2.1 Stabilisation au ciment

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment (4).

La stabilisation au ciment a plusieurs effets (2):

- Elle modifie la masse volumique sèche de la terre (diminution pour les terres se compactant bien et augmentation pour les terres se compactant faiblement) ;
- Elle augmente sa résistance à la compression à l'état sec et humide ainsi que sa résistance à la traction ;
- Elle diminue les variations dimensionnelles (moins de retrait au séchage et de gonflement à l'humidification) ;
- Elle améliore sa résistance à l'érosion. Afin d'obtenir une stabilisation efficace et des résultats satisfaisants, un dosage en ciment de 6 à 12% est recommandé pour la plupart des terres.

4.2.2 Stabilisation à la chaux

L'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols a été développée à partir de 1920, aux USA. La stabilisation à la chaux influence la masse volumique sèche de la terre suite à la floculation. Elle permet également d'augmenter sa résistance à la compression. Lorsque le dosage est optimal, on peut obtenir des résistances allant de 2 à 5 MPa voire même de

20 à 40 MPa dans le cas de procédés industriels. La résistance à la traction varie selon la qualité et la quantité des argiles qui réagiront avec la chaux. Les variations dimensionnelles sont également influencées par l'ajout de chaux à la terre : un ajout de 1 à 2% de chaux peut faire diminuer un retrait de 10% à 1% et supprimer tout gonflement. Afin d'améliorer encore certaines propriétés comme la réactivité de la terre ou la résistance à la compression, l'ajout d'additifs (tels que le ciment Portland ou le sulfate de sodium) en faible quantité peut être envisageable (4).

4.2.3 Stabilisation par fibres

La stabilisation par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille, est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées. En effet, la paille renforce la structure et s'adapte aux différents modes de mise en œuvre de la terre, c'est-à-dire à l'état plastique, visqueux ou encore dans le cas de la compression. On retrouve aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (13).

Les fibres jouent plusieurs rôles : elles permettent (4):

- D'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- D'accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau ;
- D'alléger le matériau : le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation ;
- D'augmenter la résistance à la traction.

5. Les intérêts de la construction en terre

Un des intérêts de mener un projet de construction en terre est de pouvoir utiliser le gisement local de proximité et de limiter ainsi l'énergie grise liée à la construction (réduction des distances parcourues). Présent sur le territoire depuis des siècles, la construction en terre a prouvé sa durabilité et sa bonne intégration dans le paysage. L'exploitation du matériau préserve les ressources et limite l'atteinte à l'environnement. De son extraction et sa mise en œuvre, il ne subit aucune transformation polluante. En cas de destruction, il peut être réutilisé pour ériger d'autres murs ou rendu à la terre sans qu'aucune décontamination ne soit nécessaire. « Il est recyclable à l'infini » (16). Construire en terre aujourd'hui, c'est repenser l'emploi des ressources naturelles et sociales, et préparer un avenir véritablement éco-responsable (17). La figure 1.17 ci-dessous, schématise le cycle de vie du matériau terre, de la carrière au recyclage.



Figure 1-17 Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre (16)

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, en faisant ressortir les avantages et les inconvénients de ce type de construction. 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, durable, 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 comprimée. Ce procédé fera l'objet de notre étude expérimentale détaillée dans le chapitre 2.

CHAPITRE 02

**«Matériaux et méthodes
expérimentales»**

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 mécaniques et thermiques des briques en terre comprimées.

2. Terre crue

2.1. Granulométrie

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



Figure 2-1 terre crue

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la granulométrie de la terre crue (fig.2.2 ; 2.3) : le tamisage à voie humide XP P94-041, 1995 (18) et sédimentométrie NF P 94-057 (19).



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



Figure 2-3 Analyse granulométrique par sédimentation

2.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg du matériau ont été déterminées selon la norme NF P 94-051 (20). Cet essai a été réalisé en deux phases :

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



Figure 2-4 Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Casagrande

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



Figure 2-5 Détermination de la limite de plasticité au rouleau

2.3. Essai au bleu de méthylène

L'essai de bleu méthylène a été réalisé selon la norme NF P 94-068 (21) (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}).

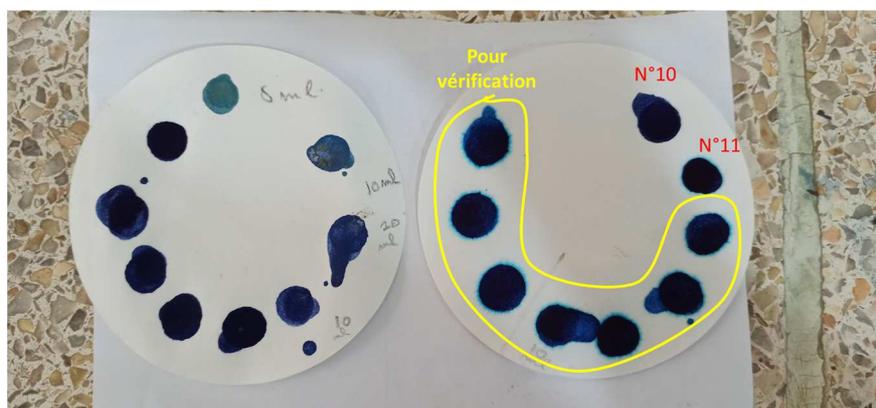


Figure 2-6 Détermination de la valeur de VBS

2.4. La masse volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides a été déterminée en utilisant un pycnomètre et un liquide non réactif avec le matériau sol qui est le toluène (fig2.7).



Figure 2-7 Détermination de la masse volumique des grains solides

3. Sable

Le sable utilisé provient de la carrière de l'entreprise nationale des granulats (E.N.G) (SIDI EL ABDELI), Tlemcen.

3.1. Granulométrie

La granulométrie du matériau sable a été déterminée conformément à la norme NF EN 933-1 (fig2.8) (22).



Figure 2-8 Analyse granulométrique du sable

3.2. Equivalent du sable

L'analyse de la nature du sable (fig2.9) a été déterminée selon un essai d'équivalent du sable conformément à la norme NF P 18-598 (23).



Figure 2-9 Essai d'équivalent du sable

4. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé (CPJ-CEMII/A 42.5 N) provient de la cimenterie de Béni-Saf, Aïn Témouchent. Le ciment composé répond aux exigences de la norme Algérienne NA 442-2013 (24). Sa composition est résumée dans le tableau 2.1.

Tableau 2-1 Composition du ciment utilisé

	Clinker	Ajout calcaire	Constituants secondaires
Taux (%)	80-94	06-20	0-5

Sa résistance mécanique simple est donnée par le tableau 2.2.

Tableau 2-2 Résistance mécanique à la compression du ciment utilisé

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)		Temps de début de prise (min)
	A 2 jours	A 28 jours	
42,5 N	≥ 10	≥ 42.5 & ≤ 62,5	≥ 60

5. Fibres végétales

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



Figure 2-10 Paille d'orge

La paille d'orge a été utilisée à l'état naturel sans aucun traitement chimique. Elle est introduite dans la matrice du matériau sous forme de fibres coupées en 2 cm de longueur. Ces fibres ont été mélangées à la terre à hauteur de 1% massique.

6. Préparation des briques en terre comprimées

Afin de réaliser notre protocole expérimental nous avons choisis les formulations montrées dans le tableau 2.3 pour la confection des briques en terre comprimées.

Tableau 2-3 Formulations des briques en terre comprimées

Formulations	Pourcentage des constituions de chaque mélange (%)				
	Argile	Sable	Ciment	paille	eau
Argile+ sable	70	30	0	0	15.5
Argile+ sable + ciment	65	30	5	0	15.5
Argile + sable + paille	70	30	0	1	15.5

Les briques en terre ont été préparées selon trois phases.

- **La première phase : 70 % de terre avec 30 % du sable**
 - Mixer les éléments secs (terre + sable) pendant 1 minute à l'aide d'un malaxeur électrique, puis ajouter la quantité d'eau nécessaire et continuer le malaxage jusqu'à obtenir un mélange homogène (l'homogénéité est vérifiée visuellement).
- **La deuxième phase : 70 % de terre + 30 % du sable + 5 % du ciment**
 - Mixer les éléments secs (terre + sable + ciment) pendant 1 minute à l'aide d'un malaxeur électrique, puis ajouter la quantité d'eau nécessaire au fur et à mesure du malaxage jusqu'à l'homogénéisation du mélange.
- **La troisième phase : 70 % de terre + 30 % du sable + 1 % de paille**
 - Dans ce cas le mixage des composants secs se fait avec le malaxeur, une fois l'eau est ajoutée au mélange le malaxage s'est fait manuellement pour assurer l'homogénéité du mélange (fig.2.11).



Figure 2-11 Malaxage de la paille d'orge avec la terre.

La confection des éprouvettes des briques en terre a été réalisée à l'aide d'un moule de dimensions de 5×10×20 cm. Après le remplissage du moule avec le matériau un compactage statique a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique sous une force de 5 tonnes.

Les éprouvettes après le démoulage ont été couvertes avec un papier film pendant 48 heures. Ensuite, le film couvert a été enlevé et les éprouvettes ont été conditionnées pour le séchage à l'air libre dans une salle de 28°C de température et de 80 % d'humidité relative (2.12).



Figure 2-12 Éprouvettes de briques en terre comprimées.

7. Comportement sous l'effet de l'humidité : essai par immersion

L'étude la tenue à l'eau a été effectuée selon la norme XP P13-901 (25). Le principe de cet essai consiste à immerger les briques verticalement individuellement dans un récipient d'eau pendant 10 min et mesurer par la suite la perte de masse des briques (fig2.13).



Figure 2-13 Illustration de l'essai d'immersion

8. Résistance à la compression simple

L'essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes en béton de terre comprimées sèches conformément à la norme XP P13-901 (25). 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 2-14 Illustration d'un essai de compression simple d'une brique en terre comprimée.

9. Conductivité thermique

Le comportement thermique des éprouvettes des briques en terre comprimées a été effectué en mesurant la conductivité thermique de ces éprouvettes selon la norme ASTM : D5334. Les essais thermiques ont été réalisés à l'aide de l'appareil Quickline-30 (ANTAR CORPORATION PITTSBURG, PA (USA)) (fig2.15). Il utilise le principe de la méthode de la ligne de chaleur transitoire qui permet de réduire le temps de test. La conductivité thermique de l'échantillon est mesurée à l'aide d'une sonde équipée d'un serpentin chauffant. Le temps de mesure de l'appareil Quickline-30 se situe entre 16 et 20 min (26).



Figure 2-15 Appareil de mesure Quickline TM 30 utilisé pour l'essai thermique.

10. 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 et thermique des briques en terre comprimées.

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

CHAPITRE 03

«Résultats et discussions»

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'expliquer les résultats du protocole expérimental que nous avons effectué au laboratoire et qui nous a permis d'étudier le comportement physique, mécanique et thermique des briques en terre comprimées stabilisées et non stabilisées.

2. Terre crue

La courbe granulométrique obtenue de la terre utilisée est présentée sur la fig.3.1. Le résultat met en avant le caractère argileux du matériau puisque la majorité de ses particules ont un diamètre inférieur à $80\ \mu\text{m}$ ($\sim 92\%$).

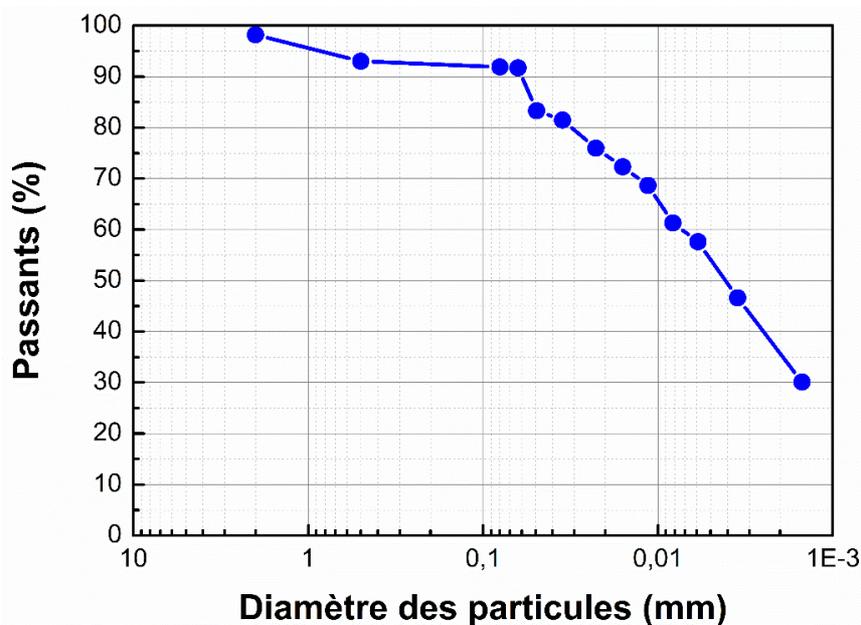


Figure 3.1 Courbe granulométrique de la terre crue.

En effet, pour connaître la nature de cette argile, nous allons utiliser la classification de Casagrande basée sur les limites d'Atterberg déterminées par l'essai effectué et cité dans le chapitre 2. La figure 3.3 montre le résultat de la limite de liquidité W_L déterminée à l'aide de la coupelle de Casagrande.

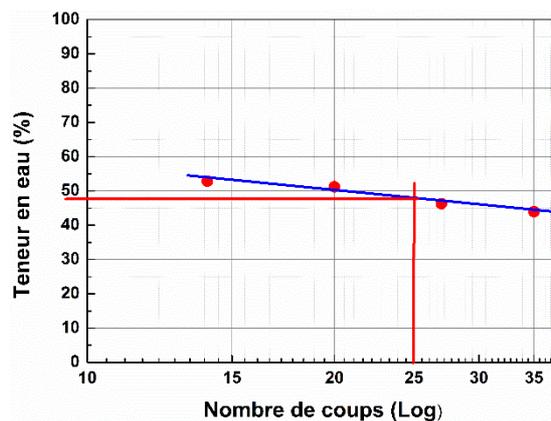


Figure 3.2 Limite de liquidité de la terre crue.

D'après la fig3.2, nous avons trouvé que $W_L = 47,87 \%$. La limite de plasticité W_P déterminé avec l'essai à rouleau a donné une valeur de $W_P = 25,5 \%$. L'indice de plasticité déduit est de l'ordre de $I_P = 22,37 \%$.

En se basant sur la valeur de W_L et de I_P , la classification de notre terre crue d'après l'abaque de Casagrande (fig3.3), montre que c'est une argile peu plastique.

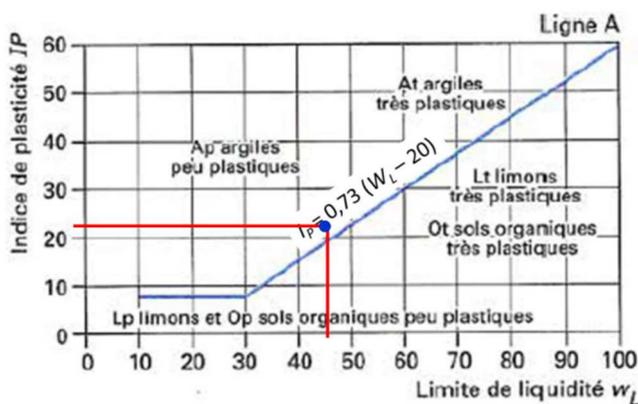


Figure 3.3 Position de la terre crue sur l'abaque de Casagrande.

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

Tableau 3-1 Résultats de l'essai de bleu méthylène

Valeur de VBS	La surface spécifique S_{st} (m^2/g)
3,5	73,5

D'après les valeurs de la surface spécifique notre terre est une argile Kaolinite. Sa densité déterminée est de l'ordre de 2,7.

3. Sable

La courbe granulométrique du sable utilisé est montrée sur la fig.3.4.

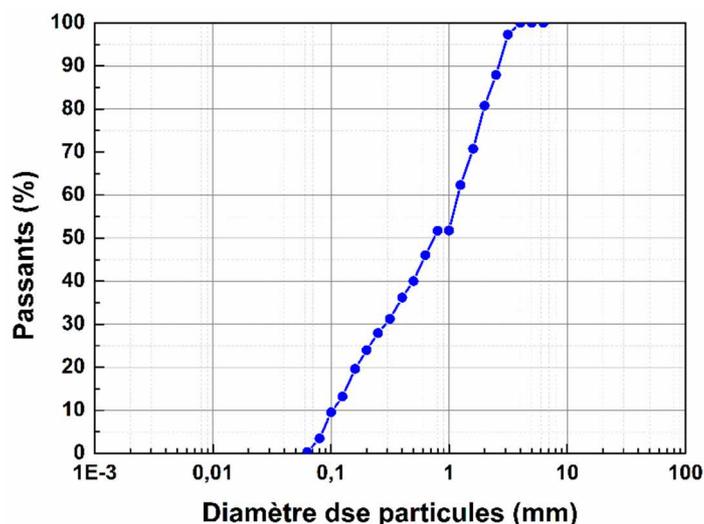


Figure 3.4 Courbe granulométrique du sable.

D'après l'analyse granulométrique, ses coefficients d'uniformité et de courbure sont de l'ordre de 12 et 0,75, respectivement, dont la teneur en fine est de l'ordre $\sim 3,15\%$. En se basant sur ces résultats, sa classification selon LCPC-USCS montre que c'est un sable propre mal gradué Sm (SP).

Les valeurs de l'équivalent du sable sont données par le tableau 3.2. Les résultats trouvés montrent que c'est un sable propre à faible pourcentage de fines argileux.

Tableau 3-2 Résultats de l'équivalent du sable

	ESV	ESP
Valeurs (%)	76,75	65,41

4. Etude de la durabilité des briques en terre comprimées

Après la confection des briques en terre comprimée non stabilisée et stabilisée, nous avons étudié leur comportement sous l'effet de l'humidité par immersion. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau 3.3.

La perte de masse des briques après immersion a été calculée par la formule suivante (27) :

$$P = \frac{M_1 \times 100}{M_0}$$

P : est la perte de masse en %

M_0 : est la masse de la brique séchée à 105 °C avant essai

M_1 : est la différence entre la masse de la brique sèche avant l'essai et après l'essai

Tableau 3-3 Les résultats de perte en masse pour l'essai d'immersion

Formulation	La perte de masse en %
Argile + Sable	6,28
Argile + Sable + 5%Ciment	6,93
Argile + Sable + 1%Paille	4,39

Pendant l'essai d'immersion, nous avons observé que pour les deux formulations des briques en terre comprimée non stabilisées et stabilisées avec 5 % de ciment, que la vitesse de désagrégement est rapide et commence dès les premières secondes de leur contact avec l'eau (fig3.5).



Figure 3.5 Brique en terre comprimée à la fin de l'essai d'immersion

Les valeurs de la perte de masse mesurées à la fin de l'essai pour ces briques sont 6,28 et 6,93%, respectivement. Ces valeurs montrent que leur résistance à l'eau est un peu faible en les comparant avec les valeurs exigées par la norme qui est de l'ordre de 5% (27). Mais elles restent des valeurs acceptables vu que l'écart est très faible environ de 0,25%. Cette résistance considérée acceptable est probablement due à la nature de la terre argileuse de type Kaolinite qui constitue 70% de la formulation puisque sont des argiles de forte cohésion (28). L'ajout de 5% de ciment à la formulation n'a pas amélioré la résistance des briques en terre comprimées à l'eau. Cependant pour augmenter cette résistance il faut augmenter le dosage du ciment.

En ce qui concerne la formulation argile+sable+1% de paille, nous avons remarqué durant l'essai que la vitesse de désagrégement est lente, même la surface de la brique reste plus intacte en comparaison avec les autres briques des deux autres formulations (fig3.6). La valeur de la perte de masse mesurée est de l'ordre de 4,39 % ce qui indique que les briques stabilisées avec la paille résistent parfaitement à l'eau. Ceci est dû à la forte capacité des fibres de paille d'absorber l'eau à cause de leur caractère hydrophile.

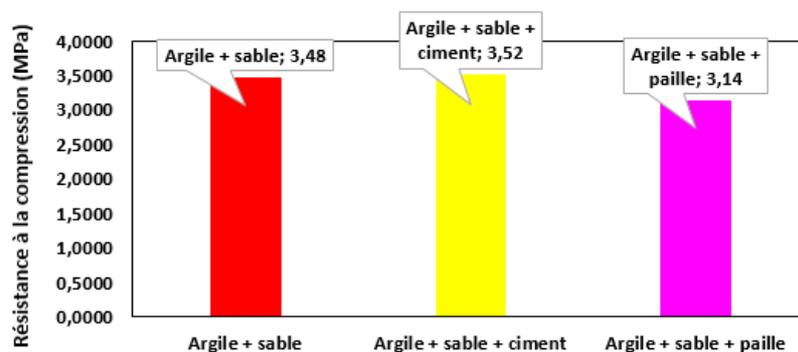


Figure 3.6 Brique en terre comprimée stabilisée avec la paille

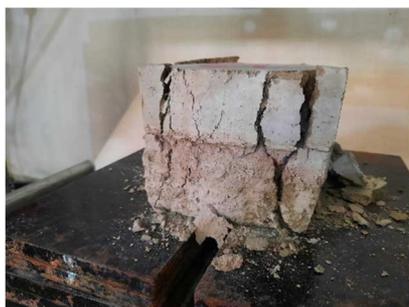
En revanche, dans la littérature plusieurs chercheurs ont utilisé l'essai de capillarité pour étudier la durabilité des briques en terre sous l'effet de l'eau en le considérant l'essai le moins discriminant (28) (29) (30) . La méthode par immersion a été critiquée pour une raison qu'elle est trop sévère (28) et peut être utilisée que dans le cas des briques stabilisées.

5. Résistance à la compression simple

La résistance à la compression est mesurée lorsque la masse des briques est stabilisée. La stabilisation de la masse a été vérifiée par la pesée des briques quotidiennement. En effet, l'essai de compression a été réalisé après 30 jours de cure. Les résultats des essais de compression simple réalisés sur les briques de terre comprimées sont illustrés sur la figure 3.7.



La résistance des briques non stabilisée est de l'ordre de 3,48 MPa. La stabilisation des briques avec 5 % de ciment augmente légèrement la résistance à la compression qui est de l'ordre de 3,52 %. Le dosage choisi n'est pas suffisant pour améliorer cette résistance d'une façon significative. En effet, il est considéré que le dosage du ciment dépend de la texture et la structure de la terre utilisée ; étant trouvé qu'un pourcentage de 6 à 12 % donnent de bons résultats (1). Par contre, la stabilisation en utilisant 1 % de paille d'orge a diminué légèrement la résistance à la compression. Ceci peut être expliqué que 1% de paille utilisée allège la masse volumique ce qui induit à une faible zone de contact entre les fibres et la terre ce qui a diminué la résistance.



Brique en terre comprimée non stabilisée



Brique en terre comprimée stabilisée avec 1% de paille

Figure 3.7 Briques en terre à la fin de l'essai de compression

D'après la figure 3.8, nous pouvons remarquer que l'ajout des fibres a une influence sur le comportement de rupture des briques. A la rupture, les briques non stabilisées se brisent en morceaux alors que les briques stabilisées restent d'une pièce avec des fines fissures sur la surface.

6. Conductivité thermique des briques en terre comprimées

Les résultats de l'essai thermiques sont montrés sur la figure 3.8.

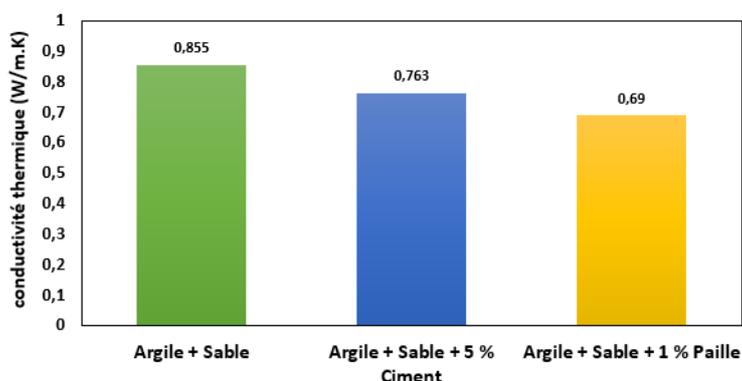


Figure 3.8 Conductivité thermique des briques en terre comprimées.

Les résultats montrent que la stabilisation des briques en terre comprimées a amélioré leur conductivité thermique d'une manière significative. La stabilisation avec 1% de paille d'orge a donné la conductivité la plus faible ceci dû à la porosité et la faible densité de ces fibres.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté les résultats des essais réalisés sur les briques en terre comprimées. Nous avons aussi examiné l'effet de la stabilisation par l'ajout de 5% de ciment et 1% de paille d'orge sur le comportement physique et mécanique des briques en terre. Nous avons trouvé que la stabilisation avec la paille a augmenté la résistance à l'eau des briques. En ce qui concerne la résistance à la compression une légère augmentation a été obtenue avec une stabilisation de 5% de ciment. Le comportement thermique est aussi analysé par la mesure de la conductivité thermique, la stabilisation avec 1% de paille présente une meilleure propriété thermique ce qui signifie que c'est un bon isolant thermique.

Conclusion générale

Utilisée depuis les temps les plus reculés pour la construction, la terre crue demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes. Plus d'un tiers des habitants de la planète vit aujourd'hui dans des habitas en terre, vu sa disponibilité, sa facilité d'utilisation et son avantage économique. En effet, dès l'antiquité, on fait un usage très abondant de ce matériau en Mésopotamie ou dans l'Égypte des Pharaons. En Afrique, en Asie, en Europe, et aux Amériques, les civilisations, qu'elles soient égyptiennes, perses, grecques, berbères, romaines, musulmanes, ibériques, françaises, indiennes, toltèques, bouddhistes ou impériales de Chine - en antiquité au moyen-âge, ou encore aujourd'hui - ont bâti ou bâtissent encore en terre, en apportant chaque fois des améliorations à cet usage naturel (9). Aujourd'hui, on recense des réalisations exemplaires en terre, notamment aux Etats Unis (Arizona, Nevada et New Mexique). On retrouve aussi la même initiative dans le pays du tiers monde à titre d'exemple, des milliers de Ksours Algériens se tentent à sauvegarder, la moindre trace de leurs racines de constructions en terre.

On a vu aussi qu'il existe de très nombreux techniques de construction utilisant la terre crue telles que : le pisé, l'adobe, le torchis et les briques comprimées stabilisées et non ; dont ces dernières font l'objet de notre étude expérimentale.

Notre étude expérimentale constituait à :

- Identification des matériaux utilisés ;
- Confectionner les briques en terre comprimées non stabilisées et stabilisées avec 5% de ciment et 1% de paille ;
- Etudier la résistance à l'eau par essai d'immersion
- Etudier la résistance à la compression simple des briques comprimées et l'effet de la stabilisation sur cette résistance ;
- Mesurer la conductivité thermique des briques en terre comprimées stabilisées et non.

Les résultats montrent que :

- la stabilisation avec la paille a augmenté la résistance à l'eau des briques ;
- une légère augmentation de la résistance à la compression a été obtenue avec une stabilisation de 5% de ciment ;
- la stabilisation avec 1% de paille présente une meilleure conductivité thermique.

Bibliographie

Bibliographie

1. **Hibouche Akli.** Sols traités aux liants, Performances hydro-mécaniques et hygrothermiques. Applications en BTP. Havre, France : Université du Havre, 2013.
2. **Paulus, Jehanne.** *CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES, Application à un cas pratique : Ouagadougou.* Université de LIEGE. LIEGE : s.n., 2015.
3. **Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG.** *Blocs de terre comprimée. Volumell. Manuel de conception et de construction.* s.l. : Eschborn, GTZ, 1995.
4. **Guillaud, H., & Houben, H.** *Traité de construction en terre (2ème édition).* Marseille : Parenthèses, 1995.
5. **Delahousse, Solène.** *L'architecture de terre crue en mouvement en France et au Mali, Bâti Ancien et Technologies Innovantes de restauration (Batir).* Université de Nantes. Nantes : s.n., 2011.
6. **Harbit, Yazid Mohammed.** *Patrimoine en Pisé : Etude et Modelisation.* Université de Tlemcen. Tlemcen : s.n., 2005.
7. **Huret, Jordan.** *Quel avenir pour les constructions en terre crue dans les campagnes d'aujourd'hui ?* Université de Normandie. Caen : s.n., 2019. Mémoire de Master en Géographie.
8. **Delahousse, Solène .** *L'architecture de terre en mouvement en France et au Mali, Bati ancien et technologie innovantes de restauration (Batir).* Université de Nantes. Nantes : s.n., 2011.
9. **Agguerabi, Bachir.** *Architecture : de la terre à la terre - L'avenir salubre.* 2009.
10. **Koadri Z, Benyahia A, Deghfel N, Belmokre K, Nouibat B, Redjem A.** *Étude de l'effet du temps de traitement alcalin de fibres palmier sur le comportement mécanique des matériaux à base d'argile rouge de la région de M'sila.* 2019. pp. 107-404.

11. **Giboulet, Jessica.** *Les perception de la matiere Terre comme matière à vivre et à construire dans l'architecture.* Ecole nationale supérieure d'Architecture. Montpellier : s.n., 2017.
12. **UNITED NATIONS.** *Earth construction Technology.* United Nations Centre For Human, Settlements. Nairobi, Kenya : s.n., 1992.
13. **Houben H, Guillaud H.** *Traité de construction en terre. CRATerre,* Marseille : Parenthèse,, 2006.
14. **HF., Winterkorn.** *Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook".* s.l. : Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
15. **WG., Symons.** *Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group,* University of South Australia, The Levels, South Australia. South Australia : s.n., 1999.
16. **Sébastien Moriset et Arnaud Misse, CRATerre-Ensag.** *Rénover et construire en pisé dans le parc naturel régional Livradois-Forez.* 2011.
17. **Mesli, Houda.** *Construire une architecture Bioclimatque par le retour aux origines traditionnelles (cas de Taghit).* 2017.
18. **Norme AFNOR XP P 94-041.** *Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage.* 1995.
19. **Norme AFNOR : NF P 94-057.** *Analyse granulométrique des sols : Méthode par sédimentation.* 1992.
20. **Norme AFNOR : NF P 94-051.** Détermination des limites d'Atterberg : Limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau. 19 juin 1993.
21. **Norme AFNOR : NF P 94-068.** Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche. 1998. 51.
22. **NF EN 933-1.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. 2012.
23. **P18-598.** Granulats - Équivalent de sable. 10 juin 1991.

24. **GIGA**. Groupe industriel des ciments d'Algérie. Casablanca : s.n., 2019.
25. **AFNOR**. XP P13-901, Briques et blocs de terre crue pour murs et cloisons. 2022.
26. **Amel Aattache, Abdelkader Mahi , Rabah Soltani , Mohamed Mouli , Ahmed Soufiane Benosman**. *Experimental study on thermo-mechanical properties of Polymer*. 2013. pp. 459–469.
27. **AFNOR**. XP P13-901. Briques et Blocs de terre crue pour murs et cloisons - Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception. 2022.
28. **Aubert, Jean-Emmanuel** . *Caractérisation des briques de terre. Rapport final du projet TERCRUSO*. 2013.
29. **Lavie Arsène Mango Itulamy**. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication. s.l. : Université de Liège, 2019.
30. **Ghomari, Fouad**. *Matériau en terre crue compactée: Amélioration de sa durabilité à l'eau*. France : INSA Lyon, 1989.

