

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présentée pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Civil

Spécialité : Structures, Efficacité Energétique dans les Bâtiments de Construction

Thème

**Etude des propriétés mécaniques et de durabilité de
brique de terre comprimée avec la poudre de caroube
comme Eco-liant.**

Présenté, le /06/2024 par :

-Mr. ILYES KHELIFI

-Melle. AHLEM HAMZAoui

Devant le jury composé de :

Pr	BEZZAR.A	Université de Tlemcen	Président
Dr	SMAIL.N	Université de Tlemcen	Examinatrice
Dr	DAHHAoui.H	Université de Tlemcen	Encadrant
Pr	BENCHOUK.A	Université de Tlemcen	Co-Encadrante



DEDICACE

Je souhaite exprimer ma gratitude à ma famille qui a façonné mon éducation et m'a soutenu tout au long de ma vie :

*A mon cher père, **HAMZAOU ABDELKADER**, qui m'a enseigné, soutenu et guidé vers la réussite.*

*A ma mère, **HAMZAOUI KARIMA**, qui m'a entouré de tendresse et d'espoir, et sacrifié pour mon bien-être.*

*A mes chers frères **MOAAD** et **ADEM**, pour leur soutien constant.*

A mes grand-pères, mes oncles et ma tante que dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

*A ma meilleure amie **GHOMARI FATIMA** qui a été toujours là pour moi et qui ne m'a jamais trompé avec ses précieux conseils.*

A tous mes amis depuis mon enfance.

A tous mes enseignants tout au long des cycles de mes études.

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

*Sans oublier mon binôme **ILYES**, merci pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

HAMZAOUI AHLEM

DEDICACE

La raison de mon succès dans cette vie est Dieu, exalté soit-Il. Je tiens à lui exprimer ma gratitude et ma reconnaissance pour avoir rendu ma vie entière bonne et bénie. Je le remercie pour son soutien et sa guidance à chaque étape de ma vie. Il m'a envoyé des messagers et des prophètes pour me guider et m'enseigner à travers eux. Je le remercie également pour chaque situation que je pensais être un mal, mais qui était en réalité un bien en soi. Je le remercie d'avoir béni mes parents, les meilleurs du monde, mon père Khelifi Mohamed et ma mère Khelifi Rahma. Leurs prières et leurs bénédictions ont été d'un grand secours dans ma vie. Je le remercie également pour m'avoir accordé les meilleurs frères et sœurs, ainsi que pour m'avoir enseigné à l'université de Tlemcen, qui a été l'une des plus belles périodes de ma vie. Il m'a réuni avec des professeurs et des amis qui sont des bénédictions d'Allah. Il m'a également réuni à Hamzaoui Ahlem pour collaborer à la rédaction de mon mémoire de fin d'études. Que Dieu vous accorde à tous une bonne santé, une longue vie et le bonheur.

Je suis vraiment reconnaissant envers toi, mon Seigneur, avec sincérité.

KHELIFI ILYES

Remerciements

Nous remercions avant tout, **Allah le Tout-Puissant**, qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif. Nous exprimons également notre gratitude à tous les **enseignants** qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours académique.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadrant Docteur **HACHIMI DAHHAOUI**, pour le temps qu'il nous a consacré, sa prise en charge, ses corrections et son accompagnement tout au long de ce travail. Nous remercions également Professeur **ASSIA BENCHOUK**, en qualité de co-encadrante, pour ses précieux conseils, sa correction, et pour la documentation bibliographique fournie. Nos remerciements vont aussi à Docteur **ABDELMADJID AIT SALEM** pour son aide précieuse au laboratoire, l'élaboration des protocoles expérimentaux, ainsi que pour nous avoir fourni le matériau de terre « le tuf de la région de Béni Saf ».

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Professeur **ABDELILLAH BEZZAR**, président du jury et directeur du laboratoire EOLE, d'avoir accepté de présider ce travail. Nous remercions également Docteur **Nadia Smail**, maître de conférences classe A, pour avoir accepté d'examiner ce projet de fin d'études. Ses remarques contribueront certainement à l'amélioration et à l'enrichissement de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude au Professeur **Bedrane Sumeya** du département de chimie pour son aide précieuse dans la réalisation des essais DRX de nos différents produits.

Nous devons un grand merci à tous nos **amis** et **amies** pour leur soutien moral, ainsi qu'à tous ceux qui nous sont chers.

Nous terminons par remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à la **SARL PRODALEX**, filiale de la **SARL BOUBLENZ**A, leader mondial dans la transformation de la caroube, pour nous avoir fourni la quantité désirée de poudre de caroube nécessaire à la réalisation de notre étude expérimentale.

Résumé

L'étude explore l'usage innovant de la poudre de caroube comme liant écologique dans la fabrication de briques de terre comprimée (BTC), visant à promouvoir des pratiques de construction durables. Un protocole expérimental détaillé a été établi pour évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité des BTC en intégrant différents pourcentages de poudre de caroube.

Les résultats montrent des améliorations significatives dans la résistance à la compression et la durabilité des briques. L'ajout de caroube a permis d'obtenir des briques avec une résistance accrue, notamment avec des pourcentages allant de 2.5% à 5%. Les briques enrichies en faible pourcentage de caroube présentent un certain caractère d'imperméabilité, avec une réduction notable de la perte de masse après immersion. De plus, elles montrent une résistance intéressante à l'abrasion, se classant dans des catégories supérieures de durabilité.

Les tests réalisés incluent des essais de compression, d'immersion dans l'eau, et d'abrasion, ainsi que des analyses par diffraction des rayons X (DRX). Ces analyses ont révélé la formation de nouvelles phases cristallines qui améliorent la cohésion et la solidité des briques.

Cette recherche démontre que l'intégration de la poudre de caroube dans les BTC améliore leurs propriétés mécaniques et de durabilité. Les résultats prometteurs de cette étude ouvrent la voie à des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement et plus efficaces, marquant un progrès significatif dans le domaine du génie civil.

Mots clés : BTC, résistance, caroube, durabilité, brique, propriétés mécaniques.

Abstract

The study explores the innovative use of carob powder as an ecological binder in the manufacture of compressed earth bricks (CEB), aiming to promote sustainable construction practices. A detailed experimental protocol was established to evaluate the mechanical properties and durability of CEB by incorporating different percentages of carob powder.

The results show significant improvements in the compressive strength and durability of the bricks. The addition of carob powder allowed for bricks with increased strength, particularly with percentages ranging from 2.5% to 5%. Bricks enriched with low percentages of carob powder exhibited some impermeability, with a notable reduction in mass loss after immersion. Additionally, they showed interesting resistance to abrasion, ranking in higher durability categories.

The tests conducted included compression tests, water immersion tests, and abrasion tests, as well as X-ray diffraction (XRD) analyses. These analyses revealed the formation of new crystalline phases that enhance the cohesion and solidity of the bricks.

This research demonstrates that integrating carob powder into CEB improves their mechanical properties and durability. The promising results of this study pave the way for more environmentally friendly and efficient construction practices, marking significant progress in the field of civil engineering.

Keywords: BTC, resistance, carob, durability, brick, mechanical properties.

ملخص

تستكشف الدراسة استخدام مسحوق الخروب كمادة رابطة بيئية في تصنيع الطوب الطيني المضغوط ، بهدف تعزيز ممارسات البناء المستدامة. تم وضع بروتوكول تجريبي مفصل لتقييم الخصائص الميكانيكية والمتانة للطوب الطيني المضغوط من خلال دمج نسب مختلفة من مسحوق الخروب.

أظهرت النتائج تحسنات كبيرة في مقاومة الضغط والمتانة للطوب. سمح إضافة الخروب بالحصول على طوب ذو مقاومة متزايدة، خصوصًا بنسب تتراوح من 2.5% إلى 5%. الطوب المدعم بنسبة منخفضة من الخروب أظهر درجة معينة من عدم النفاذية، مع انخفاض ملحوظ في فقدان الكتلة بعد الغمر. بالإضافة إلى ذلك، أظهر مقاومة مثيرة للاهتمام للتآكل، مما يجعله يصنف ضمن الفئات الأعلى في المتانة.

تضمنت الاختبارات التي أجريت اختبارات الضغط، الغمر في الماء، والتآكل، بالإضافة إلى تحليلات ، حيود الأشعة السينية DRX.

كشفت هذه التحليلات عن تكوين مراحل بلورية جديدة تعزز التماسك والصلابة للطوب.

تُظهر هذه الدراسة أن دمج مسحوق الخروب في الطوب الطيني المضغوط يحسن خصائصه الميكانيكية والمتانة. تفتح النتائج الواعدة لهذه الدراسة الطريق لممارسات بناء أكثر صديقة للبيئة وأكثر كفاءة، مما يمثل تقدمًا كبيرًا في مجال الهندسة المدنية.

الكلمات المفتاحية

المقاومة، الخروب، المتانة، الطوب، الخواص الميكانيكية، BTC

NOTATIONS

BTC	:	Brique de terre comprimée
R _c	:	Résistance à la compression
Ca	:	coefficient d'abrasion
CT	:	carob tannin
IS	:	illitic soil
KS	:	kaolinitic soil
SS	:	smectitic soil
CEC	:	cation exchange capacity

Table des matières

Dedicace	III
Dedicace	IV
Remerciement	V
Resume	VI
Abstract	VII
ملخص	VIII
Notations	IX
Table de matieres	X
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XIV
Introduction generale	1
CHAPITER 1 : LES BRIQUES DE TERRE COMPRIMEE	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 FABRICATION ET PROPRIETES	5
1.2.1 PROCESSUS DE FABRICATION	5
1.2.2 PROPRIETES MECANIQUES ET ECOLOGIQUES	10
1.3 AVANTAGES ET LIMITATIONS	13
1.3.1 LES AVANTAGES DE LA CONSTRUCTION EN (B.T.C)	13
1.3.2 LIMITATIONS DE LA CONSTRUCTION EN (B.T.C)	16
1.4 CONCLUSION	18
CHAPITER 2 : LA CAROUBE COMME MATERIAU DURABLE	20
2.1 INTRODUCTION	20
2.2 PROPRIETES DE LA CAROUBE	21
2.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE ET PROPRIETES PHYSIQUES	21
2.2.2 AVANTAGE EN TANT QU'ECO LIANT	22
2.3 UTILISATION DE LA CAROUBE DANS DIVERS DOMAINES	24
2.3.1 ÉTUDES ANTERIEURES SUR L'UTILISATION DE LA CAROUBE DANS LA CONSTRUCTION	25

2.4	CONCLUSION.....	32
CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS.....		34
3.1	INTRODUCTION.....	34
3.2	DESCRIPTION DES MATERIAUX	34
3.3	PROCESSUS DE FABRICATION.....	39
3.4	RESULTATS ET DISCUSSIONS	43
3.4.1	LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	43
3.4.2	L'IMMERSION.....	47
3.4.3	L'ABRASION.....	50
3.4.4	DIFFRACTOGRAMMES DRX.....	53
3.5	CONCLUSION	56
CONCLUSION GENERALE.....		57
BIBLIOGRAPHIE		59
WEBOGRAPHIE		64

Liste des Figures

FIGURE 1.1: L'ADOBE, LA BRIQUE DE TERRE CRUE [11]	6
FIGURE 1.2: CONSTRUCTION EN ADOBE, SHIBAM (YEMEN) [12].....	6
FIGURE 1.3: LA TECHNIQUE DU PISE [13].....	6
FIGURE 1.4: FRANCE EN NORMANDIE.[14]	6
FIGURE 1.5: CONSTRUCTION EN TORCHIS, EN NORMANDIE. (FRANCE)[15]	6
FIGURE 1.6 : ÉVALUATION DES METHODES DE STABILISATION DES BTC	7
FIGURE 1.7 : PROCESSUS DE FABRICATION DE LA TERRE AUX BRIQUES.....	9
FIGURE 1.8 : CYCLE DE VIE DU MATERIAU TERRE [22]	9
FIGURE 1.9: LA REDUCTION DES VIDES DANS LE SOL PAR LE COMPACTAGE [23].....	11
FIGURE 1.10 : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU B.T.C VARIE EN FONCTION DE SA DENSITE SECHE .[26].....	11
FIGURE 1.11: MUR NON PORTEUR EPAIS APRES 360 MINUTES D'EXPOSITION AU FEU (A) ON OBSERVE UNE EPAISSEUR ACCRUE SUR LA SURFACE EXPOSEE. (B) LA TERRE CUITE SE DEFORME COMME DU "CHOCOLAT" A HAUTE TEMPERATURE (OBSERVATION EFFECTUEE APRES 180 MINUTES DE TEST A L'INTERIEUR DU FOUR) [34].	13
FIGURE 1.12 : LES VALEURS DE LA TEMPERATURE DANS LA BRIQUE APRES 180 MINUTES, ET SON GRADIENT DANS L'ÉPAISSEUR [34]	14
FIGURE 1.13 : MAISON EN BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE	15
FIGURE 1.14 : UN EXEMPLE DE KSAR DANS LE SAHARA ALGERIEN (TIMIMOUNE) LA SENSIBILITE DE LA BRIQUE EN TERRE CRUE A L'EAU	15
FIGURE 2.1: L'ÁIRE DE REPARTITION DE CAROUBIER[41]	20
FIGURE 2.2 : AVANTAGES DE CAROUBE COMME ECO-LIANT	23
FIGURE 2.3 : SERUM DE PULPE DE CAROUBE[57]	24
FIGURE 2.4 : POUDRE DE CAROUBE SUBSTITUT DU CACAO[58]	24
FIGURE 2.5: MELASSE DE CAROUBE BIOLOGIQUE[59]	25
FIGURE 2.6 : ECHANTILLON DE GOUSSE DE CAROUBE. PARTICULES DE 1 CM[63]	26
FIGURE 2.7: GRILLE DE TEST DE COHERENCE POUR DETERMINER LE % CT OPTIMAL.[63]..	27
FIGURE 2.8: TYPES DE DISPERSION[63]	28
FIGURE 2.9 : TABLEAU DE REACTION[63].....	29

FIGURE 2.10: A GAUCHE : STRUCTURE DISPERSEE. MORTIER KS SEC AVEC CT. A DROITE : STRUCTURE FLOCULEE.[63]	30
FIGURE 2.11: RESULTATS DES TESTS DE RESISTANCE A LA FLEXION ET A LA COMPRESSION.[63]	30
FIGURE 2.12 : RESULTATS DU TEST SAET DU TEST D'EXPANSION DU DISQUE LARGE.[63].	31
FIGURE 3.1: DRX DU TUF DE BENI-SAF[3]	35
FIGURE 3.2: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE ET LE DOMAINE RECOMMANDE PAR LA NORME XP P13-901 ET HOUBEN AND GUILLAUD, 1994	35
FIGURE 3.3: POUDRE DE CAROUBE EN DOYPACK DE 250G [66]	37
FIGURE 3.4: DIFFRACTOGRAMME DRX DE LA POUDRE DE CAROUBE [66]	39
FIGURE 3.5: TAMISAGE DE TUF AVEC UN TAMIS DE 2MM.....	40
FIGURE 3.6: METTRE DE TUF DANS L'ETUVE (105°).....	40
FIGURE 3.7: PESER LA QUANTITE DE TUF APRES AJOUTER LA QUANTITE DE CAROUBE APPROPRIEE	41
FIGURE 3.9 : MELANGEZ LES INGREDIENTS.	41
FIGURE 3.8: DIVISER LE MELANGE SUR DES SACHETS	41
FIGURE 3.10: LE MOULE UTILISE POUR CONFECTION DES BRIQUES.....	41
FIGURE 3.11 : STABILISATION MECANIQUE	42
FIGURE 3.12: APERÇU SUR QUELQUES BRIQUES REALISES	42
FIGURE 3.13: STABILISATION DE MASSE DES BTC A DIFFERENTS % DE CAROUBE	43
FIGURE 3.14: ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE D'UNE BRIQUE EN TERRE COMPRIMEE.....	44
FIGURE 3.15: RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU POURCENTAGE DE CAROUBE.....	45
FIGURE 3.16: LA FORCE DE COMPRESSION EN FONCTION DE DEPLACEMENT.....	46
FIGURE 3.17 : AVANT ET APRES L'ESSAI DE COMPRESSION	47
FIGURE 3.18: ILLUSTRATION DE L'ESSAI D'IMMERSION	48
FIGURE 3.19: POURCENTAGE DE LA PERTE DE MASSE EN FONCTION DU POURCENTAGE DE CAROUBE.....	49
FIGURE 3.20: ETAT DES BRIQUES APRES L'ESSAI DE TENUE A L'EAU PAR IMMERSION.	50
FIGURE 3.21: ESSAI D'ABRASION.....	51
FIGURE 3.22 : COEFFICIENT DE L'ABRASION EN FONCTION DU POURCENTAGE DE CAROUBE	52
FIGURE 3.23: ETAT DES BRIQUES APRES L'ESSAI D'ABRASION	53

FIGURE 3.24: DRX COMPARATIFS DE BRIQUE DE TERRE COMPRIMEE (TUF + 2,5 % ET TUF + 15 % DE POUDRE DE CAROUBE)	55
---	----

Liste des Tableaux

TABLEAU 1.1 : TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE.....	5
TABLEAU 1.2: LE NOM DE TYPE DE PRESSE AVEC DESCRIPTION	8
TABLEAU 1.3: PRESENTE LES CARACTERISTIQUES THERMIQUES DE CERTAINS MATERIAUX, SELON [32].	12
TABLEAU 1.4 : D'ENERGIE NECESSAIRE A LA PRODUCTION D'UN METRE CUBE DE CERTAINS MATERIAUX.....	15
TABLEAU 1.5: COMPARAISON DES CYCLES DE VIE D'UN MUR EN BTC A UN MUR EN PARPAING ET UN MUR EN BETON ARME. [37].....	16
TABLEAU 1.6: DEFIS ET CONSIDERATIONS DE LA CONSTRUCTION EN BRIQUES DE TERRE COMPRIMEE (B.T.C)	17
TABLEAU 2.1: VALEURS MOYENNES DE LA COMPOSITION CHIMIQUE GLOBALE ET DE LA VALEUR CALORIQUE DE LA CAROUBE [46]	21
TABLEAU 2.2 : VALEURS MOYENNES DE LA TENEUR EN MINERAUX DE LA POUDRE DE CAROUBE (MG/KG) [46].....	22
TABLEAU 2.3: ANALYSE MINERALOGIQUE FOURNIE PAR LES FOURNISSEURS[63].....	27
TABLEAU 2.4: LES VALEURS DE L'HYDRATATION POUR CHAQUE MORTIER POUR UNE VALEUR DE FLUIDITE DE 160MM +-5MM [63]	28
TABLEAU 2.5: LES POURCENTAGES DES REACTIONS OPTIMALES .[63]	29

Introduction Générale

Dans un monde en constante évolution, la recherche de solutions de construction durables est devenue une priorité essentielle pour répondre aux défis environnementaux actuels. Les matériaux de construction traditionnels, tels que le béton, présentent des inconvénients significatifs en termes d'impact environnemental, notamment en raison de leurs émissions élevées de dioxyde de carbone. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, qui explore l'utilisation de la poudre de caroube comme éco-liant dans les briques de terre comprimée (BTC).

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'extension de l'utilisation de la poudre de caroube dans l'industrie de la construction, en explorant un domaine autre que ses applications courantes. En effet, l'idée audacieuse d'intégrer la poudre de caroube dans les BTC constitue une première dans la littérature scientifique, offrant une opportunité unique d'améliorer les propriétés mécaniques et environnementales de ces matériaux.

Ce projet se distingue par son approche innovante, visant à évaluer l'intégrité structurelle, la résistance et la durabilité des BTC stabilisées avec de la poudre de caroube. Cette tentative inédite de substitution des liants minéraux par un éco-liant naturel comme la caroube pourrait ouvrir de nouvelles perspectives dans le domaine de la construction durable.

Chapitre 1 : Nous explorons le matériau terre, ses propriétés mécaniques et écologiques, et son rôle dans la construction durable. Ce chapitre traite également des techniques de fabrication des BTC et des avantages comparatifs par rapport aux autres matériaux de construction.

Chapitre 2 : Ce chapitre est dédié à la poudre de caroube, en mettant en avant ses propriétés chimiques et physiques, ainsi que son potentiel en tant qu'éco-liant. Nous y discutons également de ses diverses applications dans d'autres domaines.

Chapitre 3 : Nous présentons les résultats de notre étude expérimentale, en détaillant les méthodes de fabrication des BTC, les différents pourcentages de poudre de caroube utilisés, et les résultats des tests de résistance à la compression, à l'humidité et à l'abrasion.

Cette étude vise à démontrer les avantages potentiels de l'utilisation de la poudre de caroube dans les BTC, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone de l'industrie de la construction et à l'amélioration de la durabilité des matériaux utilisés.

CHAPITRE 1
LES BRIQUES DE TERRE COMPRIMEE

CHAPITER 1 : LES BRIQUES DE TERRE COMPRIMEE

1.1 Introduction

La terre est un matériau de construction utilisé depuis la période néolithique, encore largement employé aujourd'hui grâce aux avancées technologiques qui ont amélioré son efficacité de fabrication [1]. Les bâtiments en terre réduisent la pollution et les émissions de gaz à effet de serre, tout en consommant peu d'énergie lors de la construction [2].

Historiquement, divers procédés de construction en terre ont été développés selon les conditions locales et la disponibilité des matériaux. L'ajout de substances minérales, végétales ou animales a permis d'améliorer ces procédés [3]. Des études récentes confirment que les matériaux terrestres non cuits économisent de l'énergie et des ressources naturelles [4]. Pour améliorer les propriétés mécaniques de la terre, des stabilisateurs comme le ciment ou la chaux sont souvent utilisés, mais leur impact sur les propriétés de transport de l'eau reste peu étudié [5].

L'intérêt croissant pour des bâtiments sains et respectueux de l'environnement met en lumière les avantages de la construction en terre. Les technologies de fabrication numérique et d'impression 3D pourraient exploiter le potentiel de ce matériau en combinant ses performances naturelles avec des systèmes de construction innovants [6].

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail le matériau terre, sa fabrication, ses propriétés et son utilisation dans la construction. Nous décrirons les techniques traditionnelles et modernes, ainsi que leurs avantages respectifs. Nous explorerons les propriétés mécaniques et écologiques, notamment la résistance à la compression et l'inertie thermique. Nous discuterons des méthodes de stabilisation et de compactage des briques de terre, ainsi que des innovations récentes dans la préparation et la fabrication de la terre. Enfin, nous aborderons les avantages et les limitations de la construction en terre, soulignant son impact environnemental et ses défis spécifiques.

1.2 Fabrication et propriétés

1.2.1 Processus de fabrication

Le Tableau 1.1 illustre les techniques qui ont non seulement une importance historique mais restent pertinentes dans les projets modernes. Utilisées pour édifier des structures solides et durables adaptées à divers environnements géographiques. Ces méthodes, évolutives et adaptatives, répondent efficacement aux exigences structurelles et environnementales [7].

Tableau 1.1 : Techniques de construction en terre

Technique	Description	Avantages	Epaisseur typique
Adobe	Terre mélangée à de l'eau et à un peu de paille, façonnée en briques séchées au soleil [9].	Idéal pour les cloisons et les murs internes, écologique.	30-50 cm
Bauge	Parois monolithiques en terre mélangée avec des fibres végétales [9].	Bonne isolation thermique, adaptée aux constructions à plusieurs étages.	50-80 cm
Pisé	Terre compactée couche par couche entre des moules de bois pour former des murs [9].	Murs autoportants, excellente isolation phonique.	50-70 cm
Torchis	Mélange plastique de terre, eau et paille appliqué sur une charpente en bois [9].	Bonne résistance aux séismes, économique et rapide à sécher.	8-15 cm
BTC	Terre mélangée avec des matériaux de renforcement, comprimée et séchée [10].	Durable, écologique, et résistant aux éléments.	Variable selon l'usage.

Les Blocs de Terre Comprimée (BTC), en particulier, représentent une évolution notable dans la construction en terre, adaptée aux exigences contemporaines de durabilité et d'efficacité énergétique [8].



figure 1.1: L'adobe, la brique de terre crue [11]



figure 1.2: Construction en Adobe, Shibam (Yemen) [12]

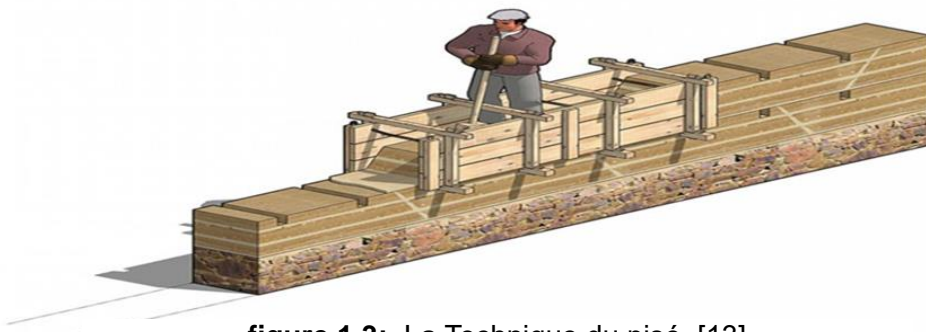


figure 1.3: La Technique du pisé [13]



figure 1.4: France en Normandie.[14]



figure 1.5:Construction en Torchis, en Normandie. (France)[15]

La stabilisation des briques de terre comprimée est une étape cruciale qui assure leur solidité et leur durabilité, rendant ces matériaux compatibles avec les exigences contemporaines de construction et de respect de l'environnement. Pour mieux comprendre les différentes techniques de stabilisation des briques de terre comprimée, nous nous référons à la Figure ci-dessous (**figure 1.6**). Cette représentation schématique illustre les principales méthodes de stabilisation, et aide à saisir l'efficacité relative de chaque technique et son impact sur la qualité des constructions en BTC [16] [17] [18].

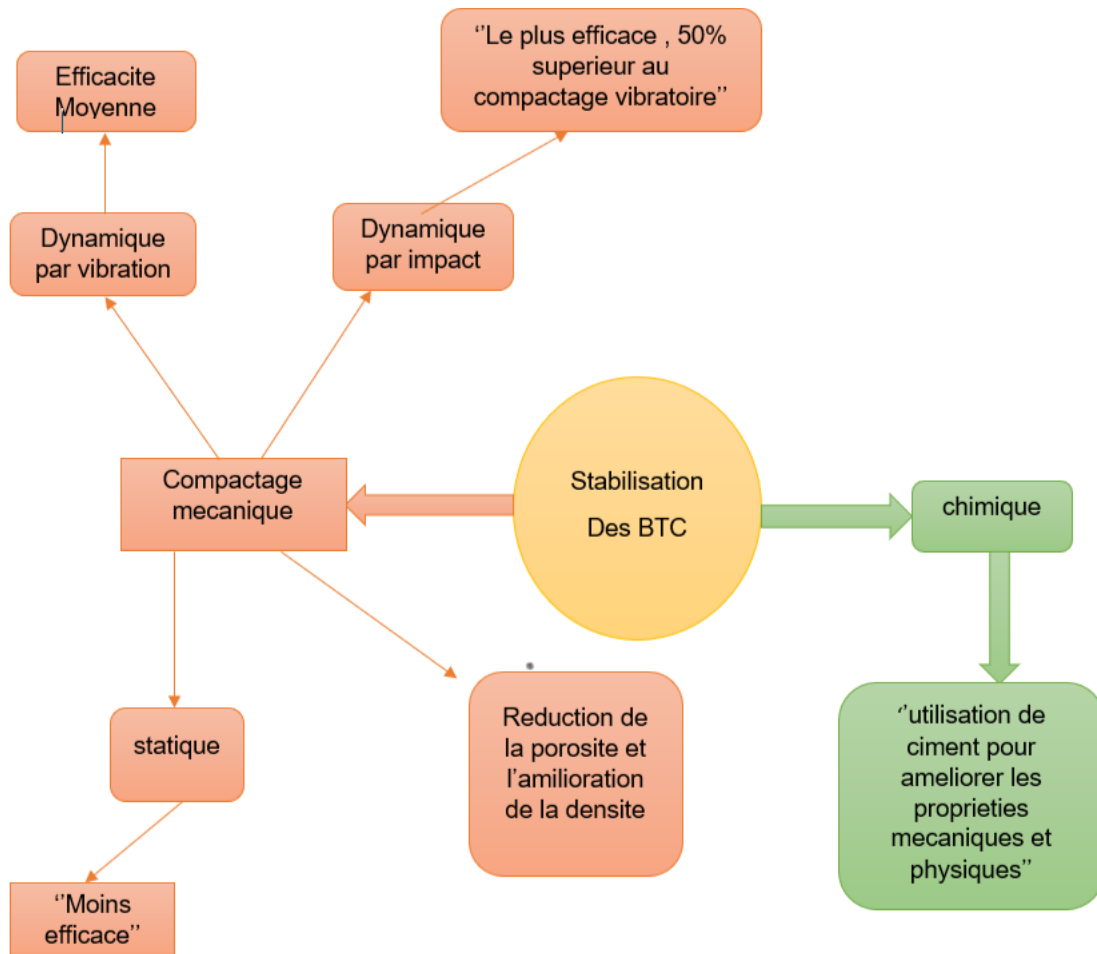


figure 1.6 : Évaluation des Méthodes de Stabilisation des BTC

Le processus de compactage influe directement la résistance mécanique et l'homogénéité des briques. Le Tableau 1.2 récapitule les différents types de presses avec une description de leurs caractéristiques et de leurs avantages :

Tableau 1.2: le nom de type de presse avec description

Le type de presse	Description
Mécanique	Cette presse permet de compresser des briques de terre crue par le déplacement d'un piston sur une course imposée. Cependant, la plupart de ces presses ont des contraintes appliquées qui ne sont pas connues, ce qui influe sur l'homogénéité des briques confectionnées.[3]
Manuel	Les pressions théoriques appliquées pendant la pression par les presses manuelles ne dépassent pas 2 MPa et sont largement disponibles dans les pays en développement car elles sont faciles à transporter et elles ne coûtent pas cher [19]
Hydraulique	Est la plus couramment utilisée dans la fabrication de briques de terre car elle donne un bon résultat en termes de forme et de résistance, de sorte qu'il existe des presses hydrauliques qui peuvent donner une force allant jusqu'à 100 MPa. [20]

Avant de passer à la construction des briques elles-mêmes, il est essentiel de comprendre et de maîtriser chaque étape du processus de préparation de la terre. Cette préparation implique une sélection minutieuse des matériaux et une série de traitements spécifiques pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des briques. Le diagramme ci-dessous (**figure 1.7**) décrit en détail les phases critiques de ce processus, de la sélection de la terre jusqu'au séchage final des briques, illustrant l'importance de chaque étape pour garantir la durabilité et la résistance du matériau fini.

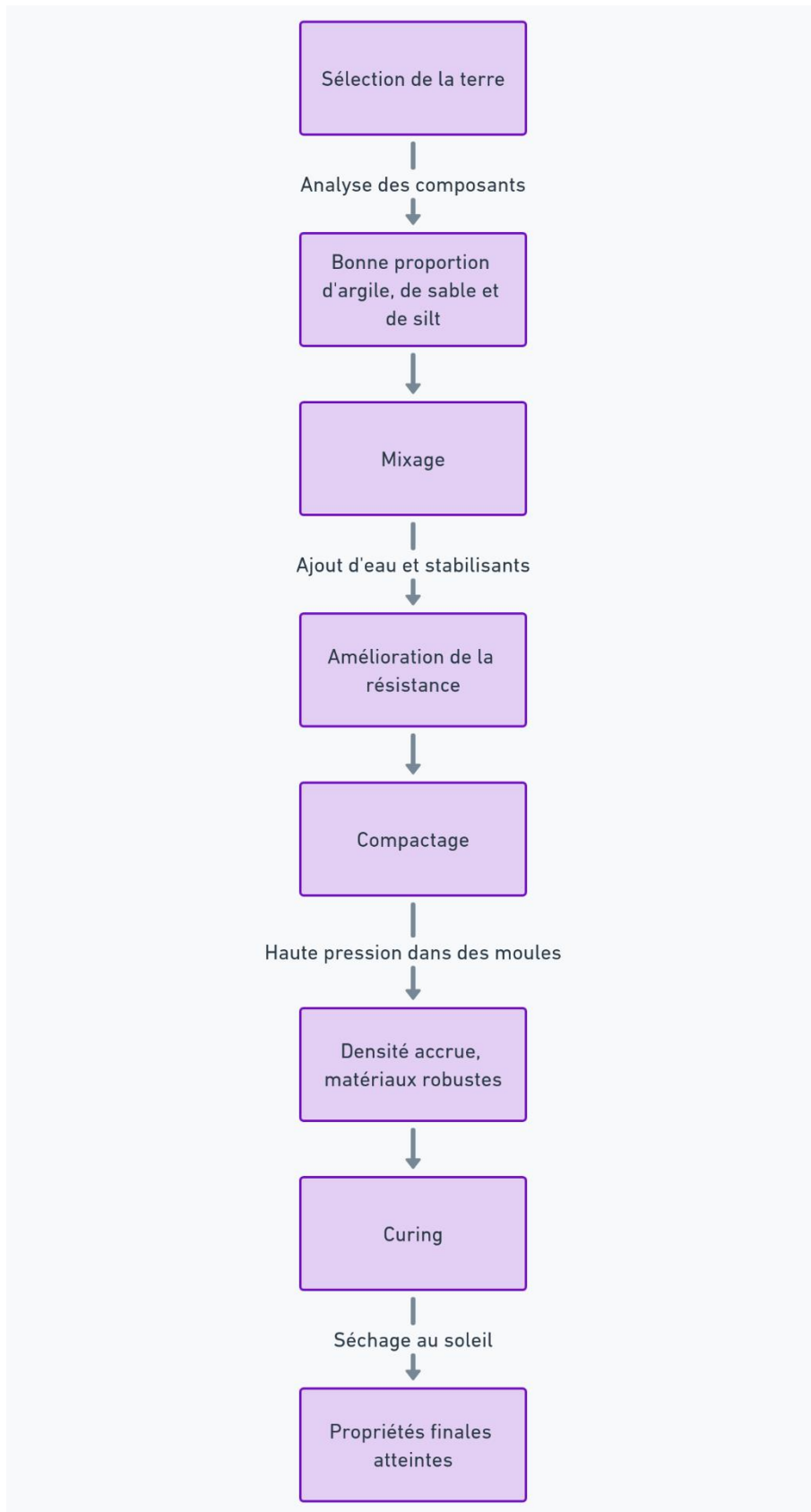


figure 1.7 : Processus de Fabrication de la Terre aux Briques

1.2.2 Propriétés mécaniques et écologiques

De point de vue écologie et ressources, la terre est abondante localement dans de nombreuses régions du monde. Utiliser la terre pour fabriquer des BTC réduit l'empreinte écologique liée au transport et promeut une utilisation durable des ressources locales. Cela permet également de minimiser les déchets et de réduire la nécessité de décharges pour les matériaux de construction (**figure 1.8**) [21].

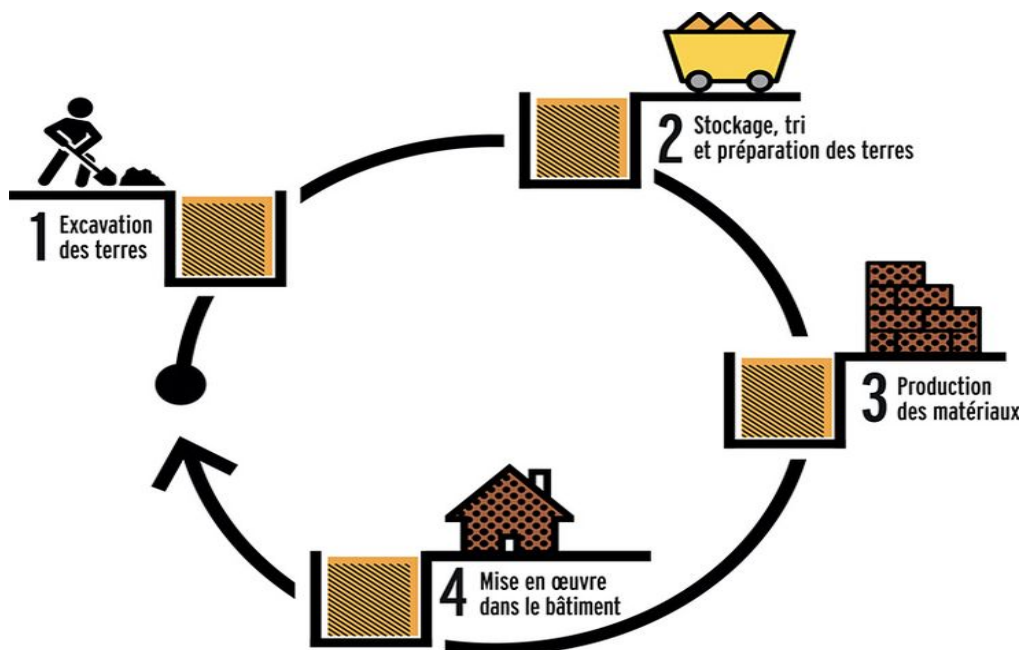


figure 1.8 : Cycle de vie du matériau terre [22]

Quant aux propriétés mécaniques, la terre crue est compressible, ce qui permet de diminuer le volume des vides dans le sol sous haute pression. Cette compression, lorsqu'elle est réalisée avec une grande énergie, augmente la densité sèche et réduit la teneur en eau optimale du matériau (**figure 1.9**), améliorant ainsi ses propriétés mécaniques [23].

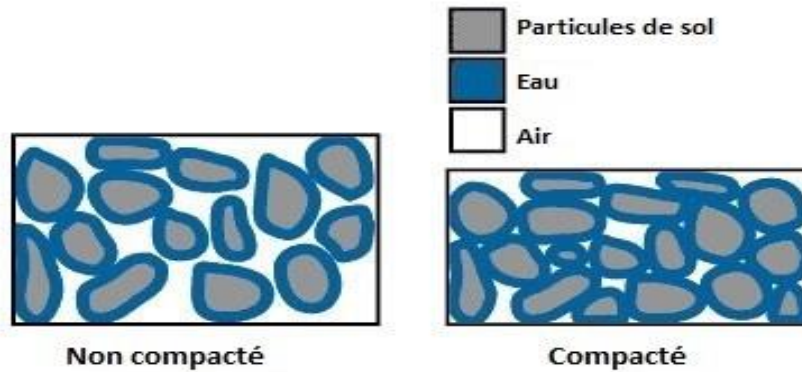


figure 1.9: la réduction des vides dans le sol par le compactage [23].

Comparée à des matériaux comme le béton, la terre crue nécessite moins d'eau et renforce sa résistance mécanique. La résistance à la compression est influencée par le type de sol, la teneur en eau initiale et la pression de compactage [24]. Elle est définie comme la contrainte qui entraîne la rupture du matériau sous l'effet d'une force appliquée verticalement sur la section chargée et est directement liée à la densité sèche et apparente du matériau [25] (**figure 1 .10**).

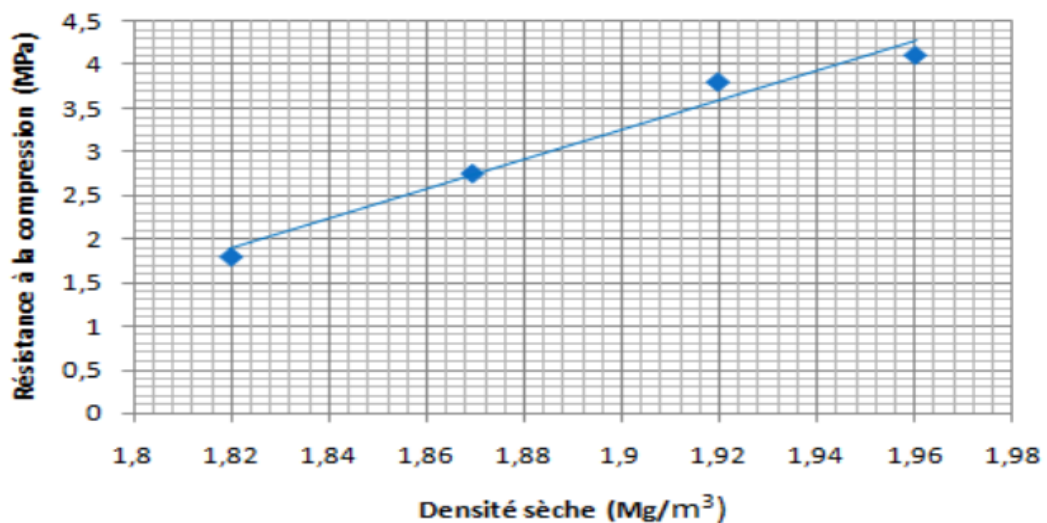


figure 1.10 : La résistance à la compression du B.T.C varie en fonction de sa densité sèche .[26]

Les murs en BTC possèdent également une grande inertie thermique, ce qui leur permet de réguler la température intérieure. Ils emmagasinent la chaleur et la libèrent lentement, maintenant ainsi une température stable et réduisant la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation artificiels.

Les bâtiments utilisant des BTC doivent respecter des réglementations thermiques telles que le DTR-C.3.2 (Algérie) et la RT 2012 (France). La terre compactée présente des valeurs de conductivité thermique inférieures à celles du béton et d'autres matériaux, offrant de meilleures performances en isolation thermique [27],[28],[29],[30],[31] ,montrent des valeurs de la conductivité thermique ne dépassant pas 0,8 (W. m⁻¹.K⁻¹) .

Le tableau I.3 ci-dessous présente les caractéristiques thermiques de divers matériaux de construction, y compris la BTC :

Tableau 1.3: présente les caractéristiques thermiques de certains matériaux, selon [32].

Matériaux	ρ (Kg/m ³)	Porosité	Cp (J/Kg. K)	λ (W/m. K)	D (m ² /s)
Cuivre	8900	-	390	400	1.2 E-04
Contre-plaqué	700	-	1500	0.12	1.1 E-07
Béton hydraulique	2330	8%	1050	1.8 20	7.4 8.2 E-07
Béton d'argile expansé	1600	36%	900	0.46	3.2 E-07
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82%	880	0.16 à 0.33	5.2 5.8 E-07
Béton de bois	600 à 900	52%	1200	0.09 à 0.3	1.2 2.8 E-07
Brique de terre cuite	1800	-	860	1.15	7.40E-07
Terre compactée	1600 à 2200	-	960 à 2200	0.5 à 1.7	3.4 E-07

Ces caractéristiques montrent que la BTC, par exemple, a une conductivité thermique inférieure à celle du béton, ce qui en fait un matériau performant pour l'isolation thermique.

1.3 Avantages Et Limitations

1.3.1 Les Avantages de la construction en (B.T.C)

La construction en brique de terre compressée (BTC) présente de nombreux avantages, expliquant sa popularité croissante dans le secteur de la construction, que ce soit pour les habitations collectives ou les maisons individuelles. Voici quelques-uns des avantages les plus notables de ce matériau :

La BTC offre une meilleure résistance à la compression, ce qui augmente sa densité et améliore l'isolation phonique. Cela réduit la transmission du son d'une pièce à l'autre, créant ainsi un environnement intérieur calme et paisible [33].

La BTC possède également une excellente rigidité thermique, capable de maintenir une température constante à l'intérieur des bâtiments. Cela réduit les besoins en chauffage et en climatisation, se traduisant par des économies d'énergie significatives [33].

Fabriquée à partir de matériaux naturels, la BTC est plus saine par rapport à d'autres matériaux de construction. Elle ne contient pas de produits chimiques nocifs et contribue à maintenir un environnement intérieur sûr et sain [33].

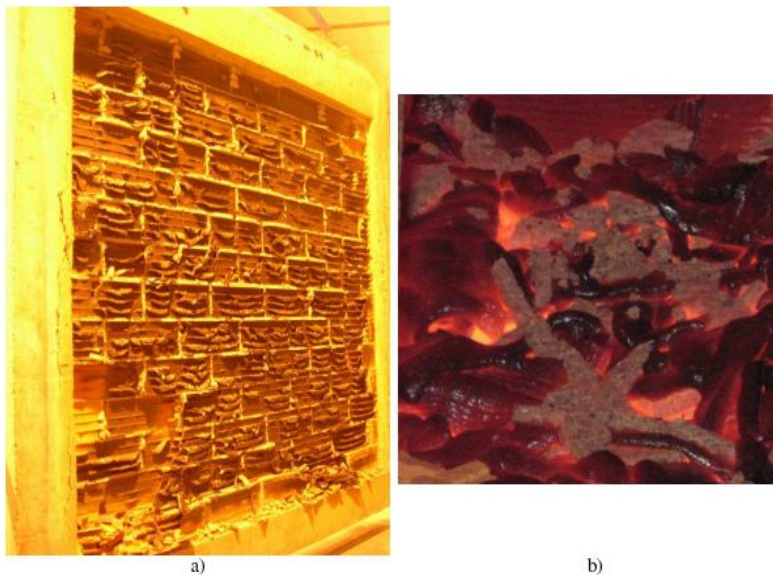


figure 1.11: Mur non porteur épais après 360 minutes d'exposition au feu (a) On observe une épaisseur accrue sur la surface exposée. (b) La terre cuite se déforme comme du "chocolat" à haute température (observation effectuée après 180 minutes de test à l'intérieur du four) [34].

Naturellement résistante au feu, la BTC est un matériau de construction sûr. Cependant, il est essentiel de suivre les normes d'ingénierie et les directives spécifiques pour garantir la sécurité et des performances optimales face aux incendies [34].

La représentation La (**figure 1.12**) montre la répartition de la température dans la brique après 180 minutes. On constate que le transfert de chaleur par rayonnement est dominant. En effet, les parois verticales présentent des températures plus élevées que les parois horizontales, où le transfert de chaleur par conduction prédomine. Le modèle de transfert de chaleur proposé, qui a montré des prédictions acceptables du sol, est utilisé pour analyser le comportement thermomécanique de la construction lors d'une exposition au feu [34].

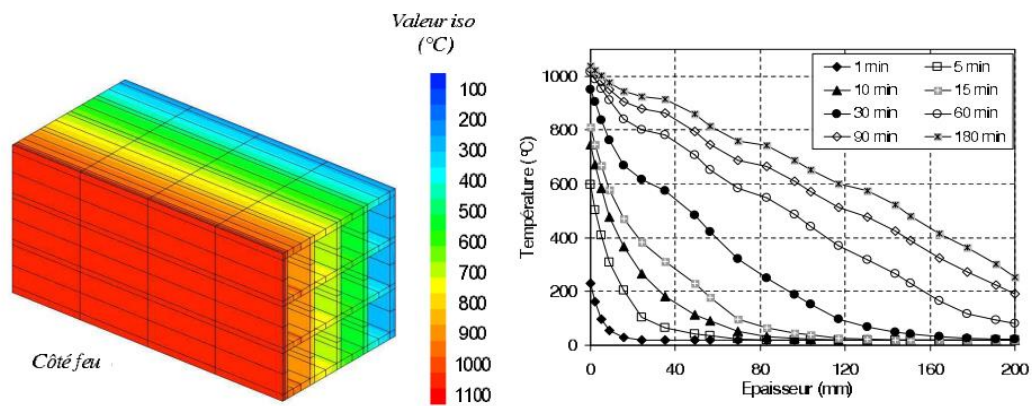


figure 1.12 : les valeurs de la température dans la brique après 180 minutes, et son gradient dans l'épaisseur [34]

La conception standardisée des BTC facilite leur installation, accélérant ainsi le processus de construction et réduisant les coûts de main-d'œuvre. De plus, leur esthétique naturelle leur permet de s'intégrer harmonieusement à l'environnement (**figure 1.13**).



figure 1.13 : Maison En Brique De Terre comprimée

Comparée à d'autres matériaux de construction comme l'acier ou le béton, la production de BTC consomme beaucoup moins d'énergie, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction (**tableau 1.4**) [35].

Tableau 1.4 : d'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de certains matériaux [36]

Matériaux de construction plus utilisés	KWh/m3
Acier	57000
Panneau fibre bois dur	3800
Béton ordinaire	500
Plaque de carton plâtre	850
Brique de terre cuite	700
Laine de verre	250
Bois d'œuvre	180
Brique de terre comprimée	100-120
Terre crue et la paille	25-30

Tableau 1.5: Comparaison des cycles de vie d'un mur en BTC à un mur en parpaing et un mur en béton armé. [37]

Contenu en énergie	Mur en BTC	Mur maçonnerie parpaing + enduit ciment	Mur en béton armé
En équivalent en litres de diesel	5.9	10.2	25.5
En MJ (Méga joules)	211	363	912
Valeurs comparatives	1	2	4

1.3.2 Limitations de la construction en (B.T.C)

Selon [37] la construction en briques de terre comprimée (B.T.C) présente plusieurs limitations importantes qui nécessitent une attention particulière. Afin de mieux comprendre ces enjeux, il est essentiel d'examiner en détail les limitations et les considérations importantes associées à ce type de construction. Le tableau 1.6 résume les principaux aspects à considérer.



figure 1.14 : Un exemple de Ksar dans le Sahara algérien (Timimoune) la sensibilité de la brique en terre crue à l'eau

tableau 1.6: Défis et Considérations de la Construction en Briques de Terre Comprimée (B.T.C)

Limitation/Considération	Détails
Sensibilité à l'eau	Les briques de terre crue sont vulnérables à l'érosion par la pluie et peuvent subir des désordres structurels dus à l'accumulation d'eau interne. Une protection adéquate comme un enduit terre, chaux ou un bardage est cruciale.
Drainage du sol et remontées capillaires	Il est essentiel d'assurer un bon drainage du sol et de prendre des mesures pour limiter les remontées capillaires pour maintenir l'intégrité structurelle.
Choix des revêtements appropriés	Les revêtements doivent être respirants, permettant aux briques d'évaporer l'excès d'humidité, ce qui préserve l'intégrité des briques et prévient les problèmes d'humidité.
Résistance mécanique	Bien que les briques de terre soient robustes, elles peuvent ne pas être suffisantes pour des charges importantes, surtout dans les murs porteurs. Une évaluation spécialisée est nécessaire.
Expertise et compétences spécialisées	Les projets de grande envergure nécessitent des compétences spécifiques en maçonnerie et une expérience adéquate, rendant important l'engagement de professionnels qualifiés.
Considérations sur le coût global	Bien que les matériaux de terre crue soient peu coûteux, les compétences spécialisées requises pour la construction peuvent entraîner des coûts globaux plus élevés comparés à la construction traditionnelle en béton.

Ce tableau démontre clairement que bien que la B.T.C offre de nombreux avantages en termes de durabilité et d'impact environnemental, elle exige également une planification méticuleuse, une conception adaptée et la gestion de facteurs spécifiques pour réussir. Ces informations devraient être prises en compte par les architectes, les ingénieurs et les constructeurs lors de la planification et de la mise en œuvre de projets utilisant ce matériau traditionnel et renouvelable.

1.4 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre démontre que la terre, utilisée depuis des millénaires comme matériau de construction, reste une option viable et avantageuse grâce aux avancées technologiques. La construction en briques de terre comprimée (BTC) est particulièrement mise en avant pour ses nombreux bénéfices écologiques, économiques et techniques. En effet, la BTC offre une excellente résistance à la compression, une inertie thermique remarquable et un impact environnemental réduit par rapport aux matériaux de construction traditionnels tels que le béton.

Les techniques traditionnelles de construction en terre, telles que l'adobe, le pisé et le torchis, ainsi que les méthodes modernes comme les BTC, démontrent une grande adaptabilité aux différents contextes géographiques et climatiques. L'utilisation de stabilisateurs comme le ciment et la chaux améliore encore plus les propriétés mécaniques et de durabilité des BTC, malgré quelques limitations liées à la sensibilité à l'eau et à la nécessité d'une expertise spécialisée.

En somme, la construction en terre, et en particulier avec les BTC, représente une alternative durable et efficace pour les futures constructions, tout en répondant aux exigences contemporaines de respect de l'environnement et de performance énergétique.

Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons sur l'étude de faisabilité de l'utilisation de la poudre de caroube comme éco-liant pour les BTC. Nous explorerons également dans le chapitre 3 l'impact de l'incorporation de différents pourcentages de poudre de caroube sur les propriétés mécaniques des BTC fabriquées à base de ce liant naturel. Cette investigation vise à ouvrir de nouvelles perspectives pour une construction encore plus durable et respectueuse de l'environnement.

CHAPTER 2
LA CAROUBE COMME MATERIAU DURABLE

2 CHAPITER 2 : LA CAROUBE COMME MATERIAU DURABLE

2.1 Introduction

Le caroubier, une espèce agro-sylve-pastorale[38], présente des avantages socioéconomiques et écologiques considérables. Largement cultivé dans les pays méditerranéens (**figure 2.1**) à des fins ornementales et industrielles, cet arbre nécessite peu d'entretien et tolère divers types de sols, contribuant ainsi à la lutte contre la déforestation et la désertification. En Algérie, le caroubier, scientifiquement connu sous le nom de *Ceratonia Siliqua* L, pousse naturellement, surtout à l'est, sous forme de peuplements spontanés[39]. Son origine méditerranéenne est justifiée par une période de floraison tardive. Doté de multiples usages, le caroubier est prisé pour son miel, ses feuilles riches en unités fourragères, et son rôle dans la prévention de l'érosion des sols en tant que brise-vent. Il est également largement cultivé en Californie et en Australie pour son attrait en tant qu'arbre ornemental résistant à la sécheresse. En plus de son bois apprécié en ébénisterie, ses fruits comestibles sont utilisés pour produire une farine riche en polyphénols, et la gomme extraite de ses graines trouve des applications variées dans les industries agro-alimentaires, pharmaceutiques, textiles et cosmétiques, bien qu'elle soit confrontée à une concurrence de substances chimiques similaires[40].



figure 2.1: L'aire de répartition de caroubier[41]

2.2 Propriétés de la caroube

2.2.1 Composition chimique et propriétés physiques

La poudre de caroube est obtenue à partir des gousses de l'arbre *Ceratonia siliqua*, qui contiennent des graines entourées par des pulpes. La gousse se compose principalement de pulpe et de graines, représentant respectivement 90% et 10% de son poids total [42]. Elle est riche en hydrates de carbone et en fibres, avec des quantités faibles de protéines et de lipides, mais une appréciable teneur en minéraux. La composition chimique de la pulpe varie généralement en fonction du cultivar, de l'origine et parfois de la période de récolte, selon plusieurs auteurs[43] [44][45] . En ce qui concerne les graines, elles sont pauvres en minéraux, en fibres et en protéines, mais contiennent une quantité significative de lipides.

Tableau 2.1: valeurs moyennes de la composition chimique globale et de la valeur calorique de la caroube [46]

Composition chimique	%
Humidité	5.29
Protéine	6.34
Gras éprude	1.99
Cendre	3.16
Fibre brute	7.30
Glucides	75.92
Valeur calorique K cal. /100g	346.95

Tableau 2.2 : valeurs moyennes de la teneur en minéraux de la poudre de caroube (mg/kg) [46]

Minéraux	mg /Kg
Mn	10.24
Zn	24.71
Fe	381.80
Cu	4.84
Se	9.79
C a	2123.00
Na	505.97
K	8637.64
P	2255.21
S	17577.80

La poudre de caroube présente des propriétés physiques intéressantes telles que , la densité, la porosité, la capacité d'absorption d'eau et d'huile [47]. Selon la littérature, la poudre de caroube est généralement décrite comme ayant une couleur brun foncé à brun clair[48] , une texture fine et une saveur sucrée naturelle[49] . En termes de granulométrie, elle peut varier selon le processus de production, mais elle est généralement fine et légèrement granuleuse. Ces caractéristiques sont importantes pour déterminer l'utilisation optimale de cette poudre dans diverses applications.

2.2.2 Avantage en tant qu'éco liant

L'intégration de la poudre de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) comme éco-liant dans la fabrication de briques de terre comprimée pourrait offrir des avantages significatifs, exploitant sa composition chimique unique et ses propriétés physiques. La richesse de la caroube en fibres et en composés polys phénoliques est susceptible d'améliorer la cohésion et la résistance mécanique des briques[50], permettant ainsi de réduire la dépendance aux liants traditionnels comme le ciment ou la chaux, qui sont plus coûteux et moins écologiques. Cette hypothèse est soutenue par les propriétés

structurales des composés présents dans la caroube, qui pourraient théoriquement contribuer à une meilleure intégrité structurelle des matériaux de construction.[50]

En outre, les propriétés antimicrobiennes et antifongiques de la caroube pourraient prolonger la durée de vie des briques, les protégeant contre les agents pathogènes dans des climats humides ou instables, ce qui serait un atout crucial pour augmenter la durabilité des constructions. La composition faiblement lipidique et protéique de la caroube assure également une stabilité chimique, ce qui pourrait prévenir l'érosion ou la décomposition sous l'effet des éléments naturels.

Toutefois, l'application de la caroube comme éco-liant dans les briques de terre comprimée reste théorique et nécessiterait des recherches approfondies pour valider ces projections. Une exploration plus poussée pourrait révéler comment exploiter pleinement le potentiel de la caroube, ouvrant ainsi la voie à des solutions de construction plus innovantes et durables. Ces perspectives prometteuses méritent une investigation scientifique détaillée pour confirmer les bénéfices anticipés et pour élaborer des pratiques de construction écologiquement et économiquement avantageuses.

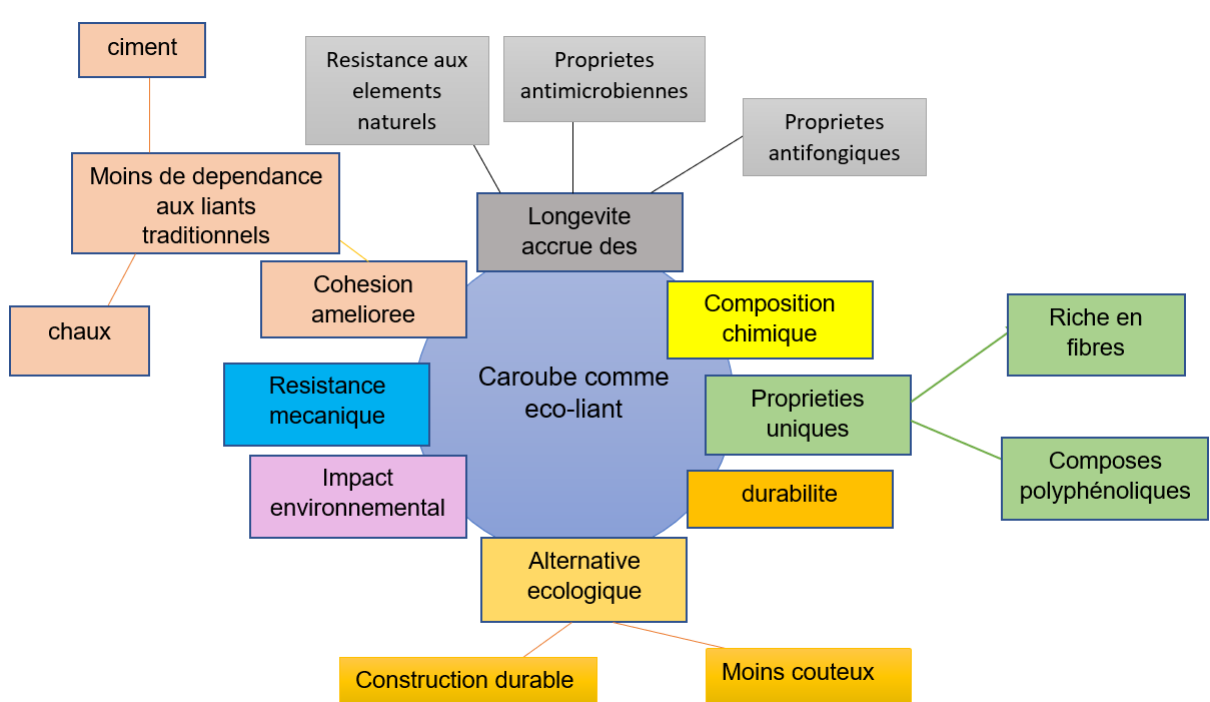


figure 2.2 : avantages de caroube comme éco-liant

2.3 Utilisation de la caroube dans divers domaines

La poudre de caroube est utilisée dans une variété de domaines, notamment en alimentation, en cosmétique en médecine naturelle et en chimie, elle provenant des gousses offre une alternative au chocolat en termes de goût et d'apparence, elle est souvent utilisée comme épaississant dans les desserts [51], tout en présentant l'avantage de ne pas contenir de stimulants tels que la caféine ou la théobromine. [52]

De plus, La gomme de caroube demeure un ingrédient clé dans cette industrie, utilisée pour divers produits tels que soupes, sauces, crèmes glacées, tourtes, confiseries, produits de boulangerie, fromages, biscuits, mayonnaises et salades.[52]

En cosmétique, elle peut être ajoutée à des produits de soins de la peau pour ses propriétés hydratantes et apaisantes[54]. En médecine naturelle, elle est parfois utilisée pour ses bienfaits digestifs et sa teneur en fibres [53]

D'autre coté, plusieurs études ont examiné l'utilisation de la farine de caroube dans des processus tels que l'extraction du sucre, la fermentation de l'éthanol, et la fabrication d'acide citrique. Parallèlement, le bois du caroubier est recherché pour des applications en ébénisterie, la production de charbon de bois et d'écorces, ces dernières provenant des racines étant utilisées dans la tannerie. [54]



figure 2.3 : sérum de pulpe de caroube[55]



figure 2.4 : poudre de caroube substitut du cacao[56]



figure 2.5: mélasse de caroube biologique[57]

2.3.1 Études antérieures sur l'utilisation de la caroube dans la construction

Le secteur du bâtiment et de la construction est l'une des industries les plus nocives pour l'environnement, responsable de la production de niveaux élevés d'émissions de gaz à effet de serre (GES), de consommation d'énergie et de déchets.[58] Le contexte de cette étude est basé sur la nécessité de trouver des alternatives durables et respectueuses de l'environnement pour les matériaux de construction conventionnels [59]. Avec l'accent croissant sur la construction écologique, la poudre de caroube émerge comme une option prometteuse car elle est d'origine naturelle, renouvelable et biocompatible. Cependant, malgré l'intérêt suscité par cette poudre dans le domaine de la construction, peu d'études ont été menées sur son utilisation spécifique. C'est dans ce contexte qu'il est important d'explorer les différentes possibilités d'utilisation de la poudre de caroube et d'évaluer son impact, car Une compréhension approfondie de l'utilisation de cette poudre dans la construction est essentielle pour explorer de nouvelles possibilités d'optimisation des performances des matériaux et de réduction de l'impact environnemental de l'industrie de la construction.

En 2019, **Romero** et son équipe réalisent une étude sous titre ” **Improvement in the rheological and mechanical properties of clay mortar after adding Ceratonia Siliqua L**”.

Dans cette étude, ils ont étudié l'utilisation d'un des composants du caroubier, Polyphénols, comme additif pour améliorer les propriétés rhéologiques du mortier d'argile utilisé pour la durabilité bâtiment. Pour obtenir des résultats comparables, des sols à bases argileuses différentes ont été utilisés comme matières premières.

Pour les matériaux utilisés : le fruit du *Ceratonia Siliqua* L., connu sous le nom de caroubier. Les sous-produits de caroube utilisés dans Cette étude a été fournie par la société Fruit Secs SL, dont les plantations intensives de caroubiers sont situées en Espagne. Pour l'extraction de l'additif tanin de caroube (ci-après CT), la matière première a été acquise à partir du sec et gousses de caroube broyées de différentes tailles (1 cm + -3 mm et 0,2 cm + -1 mm) (Figure2.6) pour tester le rendement d'extraction du tanin. Seule la dosette a été utilisée en raison de sa forte teneur en hydrolysable des tanins, comme l'acide gallique, qui peuvent être utilisés comme additif[60]



figure 2.6 : échantillon de gousse de caroube. particules de 1 cm[61]

Trois types de sols argileux aussi différents que possible (**tableau 2.3**) ont été sélectionnés pour l'analyse de l'évolution de leur comportement mécanique après ajout d'additifs obtenus à partir du fruit de la caroube arbre. Un sol illitique (ci-après IS), un sol kaolinitique (ci-après KS), et enfin, un sol smectitique (ci-après SS) a été sélectionné.

Tableau 2.3: analyse minéralogique fournie par les fournisseurs[61]

Components	IS	SS	KS
% Smectites	0.00	34.61	0.0
% Illitic	60.71	24.09	5.4
% Chlorite	6.23	33.93	0.0
% Kaolinitic	33.06	7.38	94.6

Un granulat de quartz d'une taille maximale de 2 mm, exempt de limon, et avec une courbe granulométrique standardisée.

L'étape suivante c'est la préparation de l'additif : le fruit de *Ceratonia Siliqua* L. contient une grande variété de polyphénols tels que les pro anthocyanidines, les ellagitanins et les gallotanins.[60]. Au sein de la famille des polyphénols, certains sont solubles et d'autres insoluble. Les pro anthocyanidines hautement polymérisées, par exemple, sont insolubles dans l'eau tandis que l'acide gallique, les polyphénols extraits sous forme un additif, est soluble dans l'eau. La méthodologie d'extraction utilisée résines absorbantes et cationiques [61].

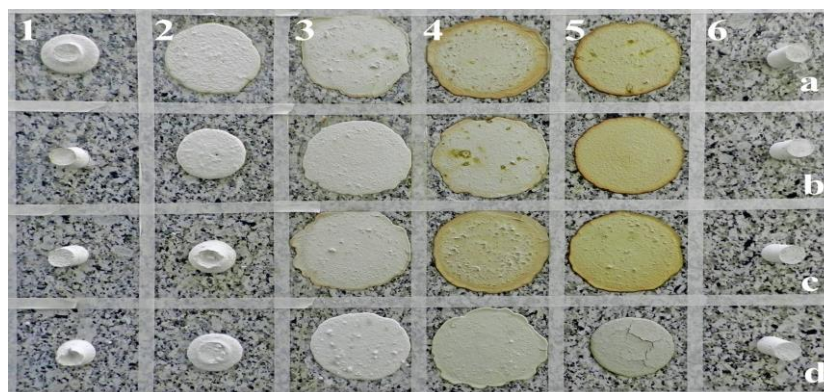


figure 2.7: grille de test de cohérence pour déterminer le % CT optimal.[61]

Ensuite, Les mortiers ont été préparés avec 30 % d'argile et 70 % de granulats par poids. La teneur en argile du mélange était plus élevée que dans les mortiers commerciaux (15 à 20 %), ce qui permet d'améliorer la réaction de l'argile. Les

mortiers ont été préparés selon les spécifications DIN 18947:2012– 08 et UNE-EN 1015-2:1999 [62]. Le mélange a été laissé préparer et humidifié jusqu'à 24 heures avant son utilisation pour parvenir à un comportement complet de ses propriétés, notamment de ses plasticités. Les spécimens ont été préparés pour les essais mécaniques.

Puisque le mortier d'argile n'a pas besoin d'une température ambiante élevée et humidité pour le durcissement, les échantillons ont été conservés dans un endroit contrôlé chambre climatique dans des conditions constantes de 20 C et 50 % HR et rupture à 90 jours. Puis, ils ont déterminé la teneur en eau optimale %H₂O et % CT optimal,



figure 2.8: types de dispersion[61]

Tableau 2.4: les valeurs de l'hydratation pour chaque mortier pour une valeur de fluidité de 160mm +-5mm [61]

Sol	IS	KS	SS
H ₂ O %	15%	24%	80%

Les mortiers d'argile ont réagi différemment à l'ajout de CT, produisant des effets intéressants dans différents pourcentages d'additifs. C'était a constaté qu'à l'intérieur de la fourchette d'additifs fixée sur la base des recommandations d'utilisation de produits commerciaux, le pourcentage d'additif était trop élevé, créant dans de nombreux cas des sur coagulations dans le mortier. Une quantité beaucoup plus faible était suffisante pour disperser les argiles de manière satisfaisante (**tableau2.5**).

Tableau 2.5: les pourcentages des réactions optimales .[61]

Type de mortier (échantillons de 160 g)	H2O % (H ₂ O/Mortier)	NaCl % (N _a Cl/H ₂ O)	Additif w/w% (CT/Mortier)
IS	15	0.55	0.09
KS	24	0.55	0.045
SS	80	0.55	0.015

Des effets de dispersion hétérogènes intéressants ont été observés dans certains échantillons, avec des granules d'agrégats clairement regroupés en raison de la coagulation ou, dans certains cas, de la dispersion du mortier avec une quantité excessive et ségrégation mécanique contre-productive.

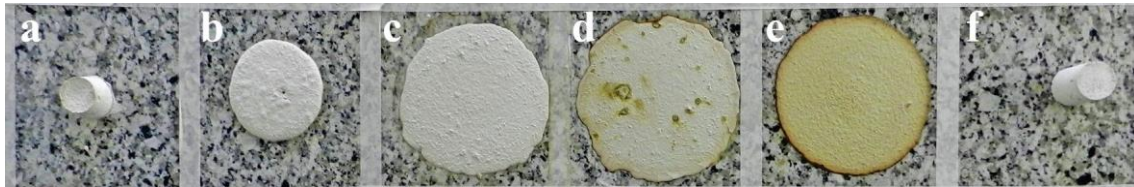


figure 2.9: tableau de réaction[61]

Enfin, ils ont réalisé les essais mécaniques : compression, flexion, test d'usure et disque large.

Les tests montrent que la résistance à la compression augmente considérablement avec une réduction de l'eau de gâchage dans les mortiers. L'une des raisons importantes est l'augmentation de la densité finale de l'échantillon.

Une raison supplémentaire pour l'amélioration de la compression et la résistance à la flexion est la disposition de la microstructure de l'argile – le tri de l'argile, comme nous l'avons vu sur la **Figure 2.9**, avec le changement dans sa charge électrique, par opposition au cas d'une charge aléatoire arrangement avec des positions qui ne favorisent pas la transmission de charges de compression (**Figure 2.11**). Les meilleurs résultats ont été obtenus pour l'IS en raison des propriétés fondamentales de l'argile. Néanmoins, le sol qui a montré le plus amélioration due à la présence de l'additif était le KS.

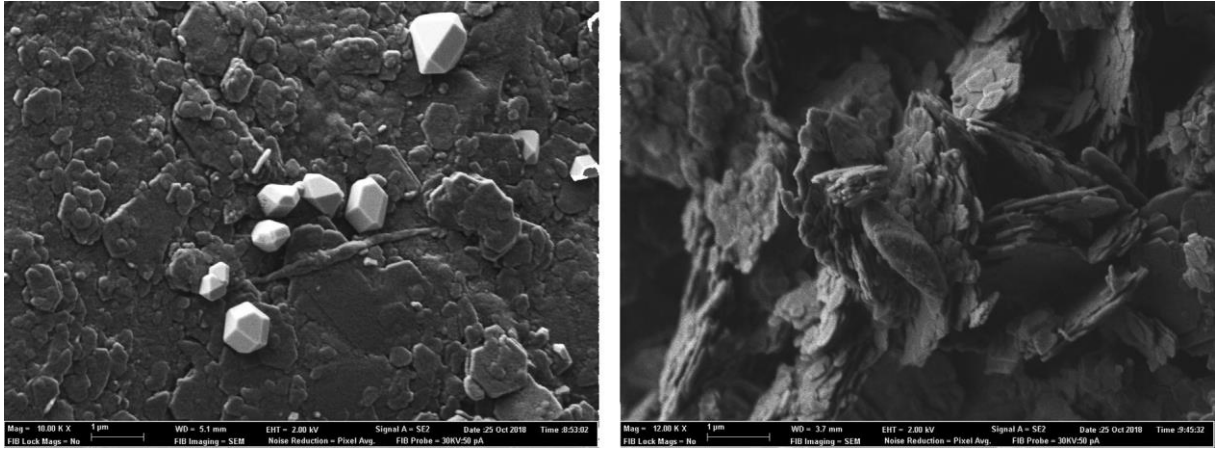


figure 2.10: à gauche : structure dispersée. Mortier KS sec avec CT. à droite : structure flocculée.[61]

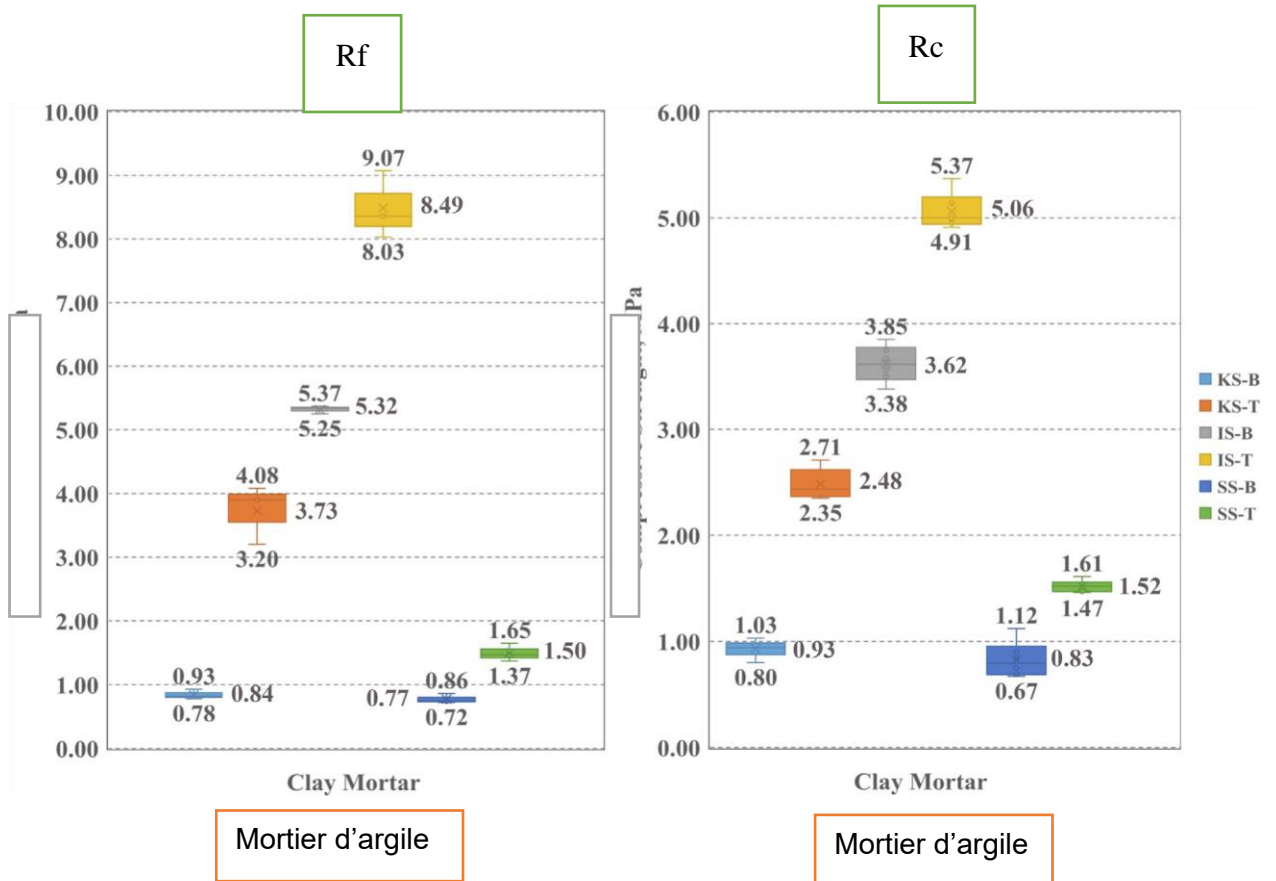


figure 2.11: résultats des tests de résistance à la flexion et à la compression.[61]

Pour les tests d'abrasion, il a été observé que les résultats suivent le même schéma que dans les essais de compression et de flexion, avec le KS et l'IS affichent la plus grande augmentation de force après l'ajout du CT (**Figure 2.12 à droite**). Dans le cas du test SAET, les résultats du SI n'étaient pas aussi bons que ceux du CT. Ceci est dû à la faible quantité de limons proportionnellement au squelette granulométrique, sa stabilité dans conditions humides ou usure par l'eau (**Figure 2.12 à gauche**).

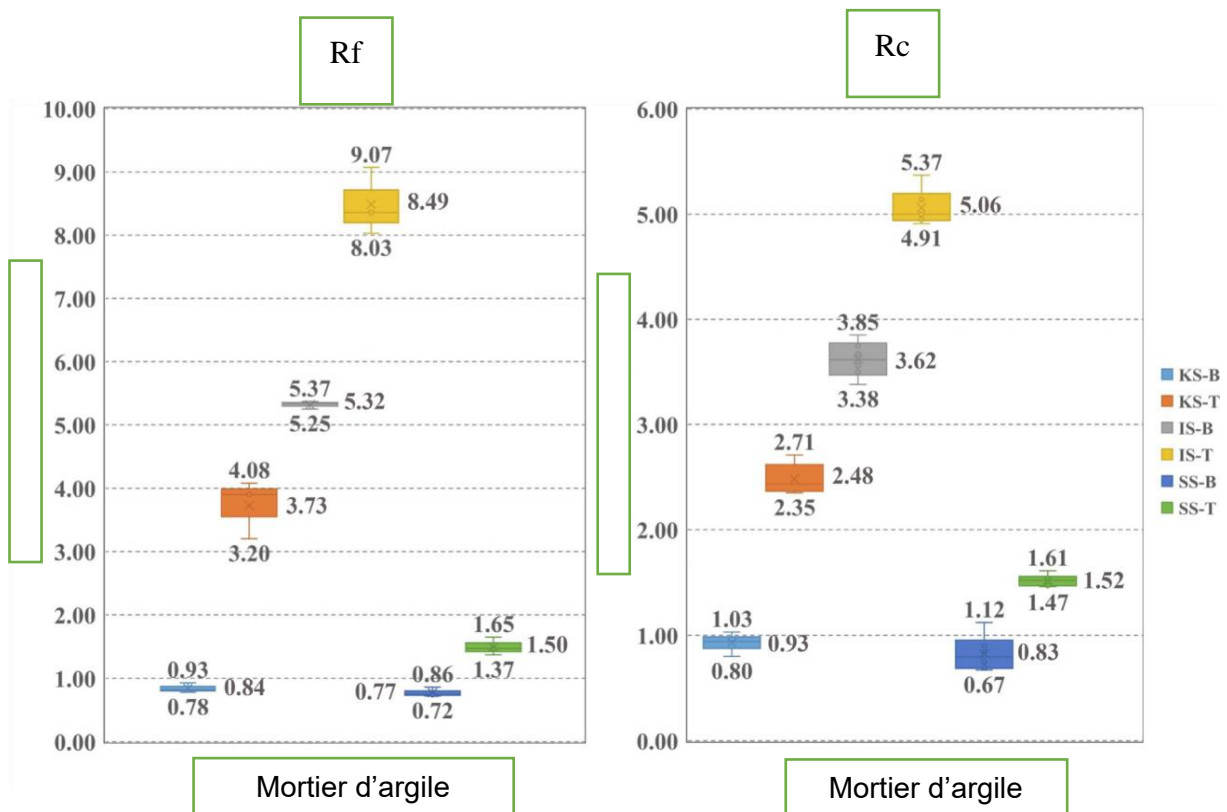


figure 2.12 : résultats du test SAET du test d'expansion du disque large.[61]

Donc, le comportement du CT sur diverses particules d'argile a été testé et de bons résultats divers ont été obtenus dans chaque cas.

Pour obtenir une valeur concluante de la réactivité entre le CT et les sols, les paramètres qui doivent être connus et contrôlés sont le pH et sa CEC (au-delà de ses caractéristiques minéralogiques ou chimiques).

En conclusion, Le but de cette recherche a été de remplacer les additifs chimiques utilisés dans la construction conventionnelle avec des additifs plus durables d'origine végétale. Pour cette raison, il est important de souligner que le produit final et son développement doivent avoir le niveau le plus bas coût éventuel en termes d'énergie, tout en évitant d'inclure des additifs chimiques dans le sol qui annuleraient son principal avantage, à savoir sa possibilité de réutilisation. Le tanin de la caroube a été démontré être un produit avec un potentiel important comme additif pour les éléments de construction à base d'argile, notamment comme superplastifiant ouvrant ainsi la porte à des possibilités de marché jusqu'alors réservées aux additifs chimiques.

2.4 Conclusion

La caroube est une source potentielle intéressante pour la construction durable. Elle est utilisée dans divers domaines tels que la santé, la cosmétique et le luxe, et elle peut être valorisée pour la construction durable en raison de ses caractéristiques naturelles.

Le Portugal évalue la caroube comme source de biocarburant, ce qui suggère son potentiel pour la construction durable. Cependant, il est important de noter que les recherches sur la valorisation de la caroube pour la construction durable sont limitées et que de futures études expérimentales seront nécessaires pour évaluer son potentiel.

Dans le chapitre suivant , il sera intéressant de faire une étude sur les propriétés mécaniques de BTC avec la poudre de caroube comme éco-liant .[63].

CHAPITRE 3.
ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

3 CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE ET RESULTATS

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude expérimentale menée au laboratoire de recherche EOLE, visant à évaluer les propriétés mécaniques et physiques des briques de terre comprimée stabilisées avec de la poudre de caroube. Cette campagne expérimentale a pour objectif d'analyser comment différents pourcentages de poudre de caroube influencent la résistance à la compression, la résistance à l'humidité et la résistance à l'abrasion des briques.

Dans un premier temps, ce travail permet de présenter les normes et les méthodologies suivies, ainsi que le processus de fabrication des briques. Les matériaux utilisés, tels que le tuf de Béni-Saf et la poudre de caroube, sont décrits en détail. Ensuite, divers essais, incluant des tests de compression, d'immersion et d'abrasion, sont réalisés pour évaluer les performances des briques. Des analyses par diffraction des rayons X (DRX) sont également effectuées pour identifier les phases cristallines formées dans les briques stabilisées.

Les résultats obtenus fourniront des informations précieuses sur les formulations optimales des briques de terre comprimée, contribuant ainsi au développement de matériaux de construction durables et écologiques.

3.2 Description des Matériaux

Nous avons utilisé pour la fabrication de nos briques un seul type de sol, le tuf, provenant de la région de Béni-Saf (wilaya de Aïn Témouchent), ainsi que de la poudre de caroube [3].

Le tuf a été collecté à une profondeur de 0,5 à 1 m de la surface du sol lors de l'excavation de la ligne ferroviaire située dans le nord-ouest de l'Algérie [3]. Ce matériau, récupéré et utilisé pour l'éco-construction, présente une teneur en eau naturelle de $w = 2,95\%$ et une teneur au feu à 1000°C de $4,3\%$ [3].

La figure 3.1 montre le diffractogramme DRX du tuf de Béni-Saf, qui met en évidence les pics caractéristiques des minéraux présents dans le tuf. La figure 3.2 présente la distribution granulométrique du tuf et le domaine recommandé par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud (1994).

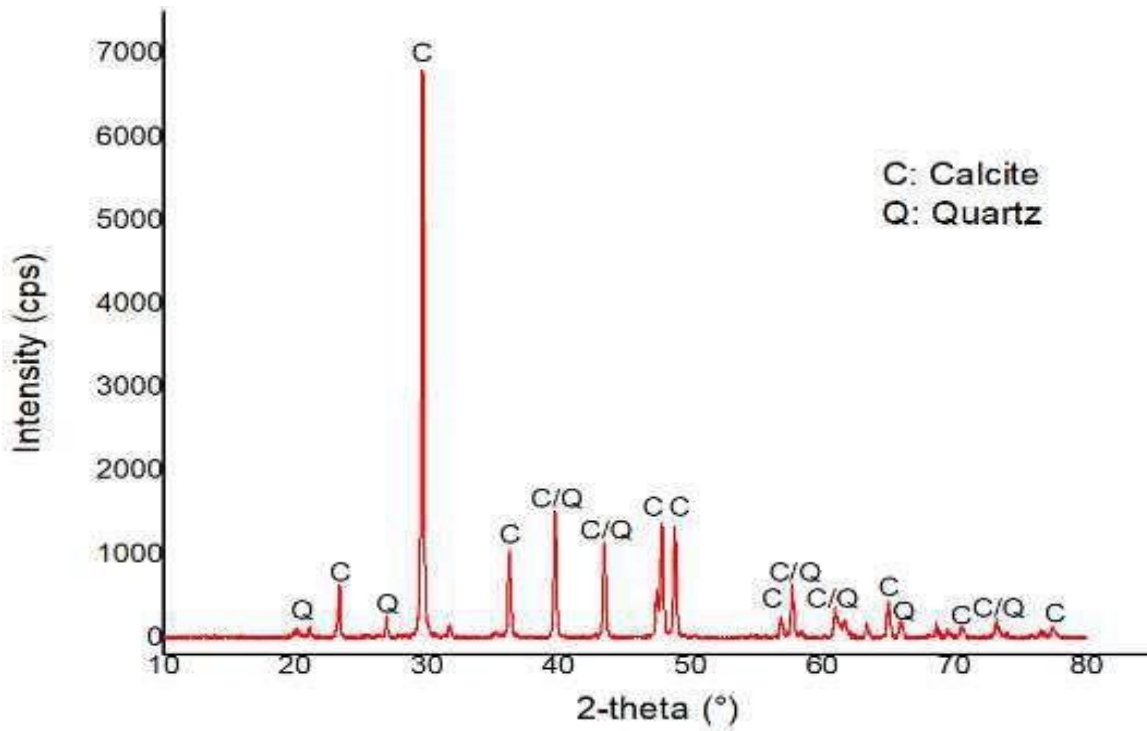


figure 3.1: DRX du tuf de Beni-Saf[3]

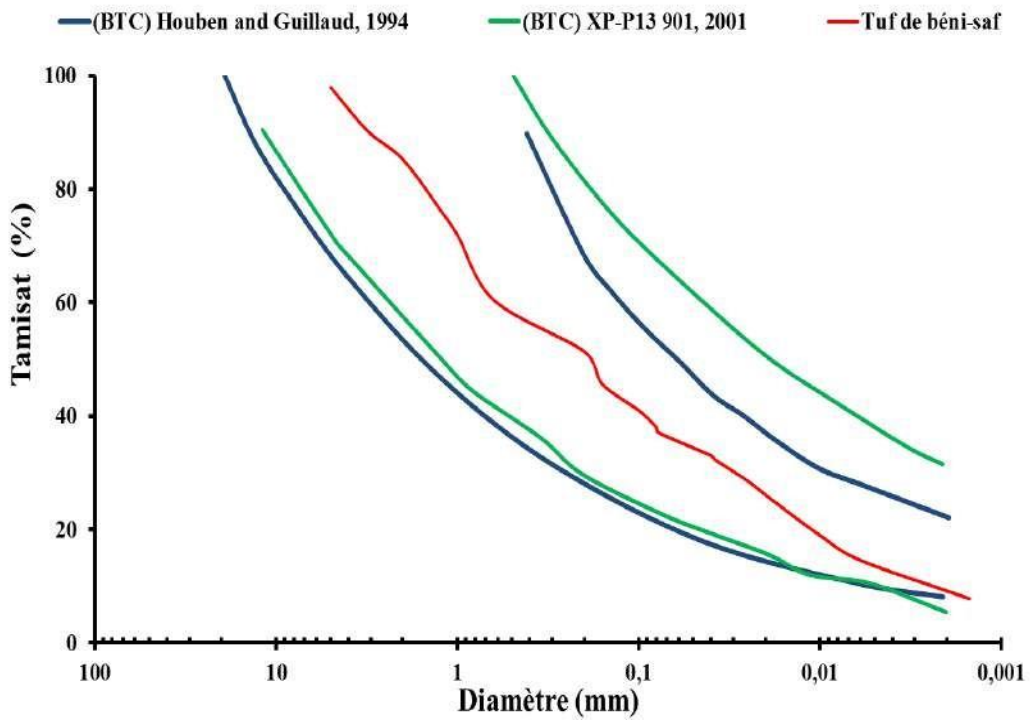


figure 3.2: Distribution granulométrique et le domaine recommande par la norme XP P13-901 et Houben and Guillaud, 1994

Le tableau 3.1 résume l'analyse minéralogique du tuf de Béni-Saf, indiquant des pourcentages de quartz et de calcite. Les caractéristiques géotechniques et physiques du tuf sont présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.1: analyse minéralogique de sol utilise[3]

Composition minéralogique (%)	Tuf de Béni-Saf
Quartz	52,4
calcite	47,6

Tableau 3.2: Récapitulatif des caractéristiques géotechniques et physiques du Tuf de Béni-Saf [3]

Propriétés	Valeurs	Normes
Gravier (%)	12	NF P 94-041
Sable (%)	48	
Limon (%)	21	NF P 94-057
Argile (%)	19	
WL (%)	37	NF P 94-051
IP (%)	17	
Densité des grains solides	2,74	NF P 94-054
CaCO ₃ (%)	85	NF P 94-048
Mo (%)	1,8	NF P 94-047
VBS	1,4	NF P 94-068
Equivalent de sable (%)	73	NF EN 933-8

La poudre de caroube a été choisie pour plusieurs raisons : ses propriétés adhésives dues à sa teneur en mucilage, sa capacité à offrir une bonne isolation thermique, sa disponibilité en Algérie et son coût raisonnable. La poudre de caroube est produite localement par l'entreprise SARL PRODALEX, affiliée à BOUBLENZA SARL, un leader dans la transformation de la caroube.

La figure 3.3 illustre la poudre de caroube conditionnée en Doypack de 250g. Le tableau 3.3 présente les résultats des tests d'analyse en laboratoire de la poudre de caroube de Tlemcen réalisés le 23 janvier 2024.

Le diffractogramme DRX de la poudre de caroube, utilisé dans la fabrication de briques de terre comprimée à base de tuf, montre les différents pics caractéristiques de la structure cristalline de la poudre de caroube (**Figure 3.4**).

Le diffractogramme DRX obtenu pour la poudre de caroube présente plusieurs pics d'intensité variable, indiquant la présence de différentes phases cristallines dans le matériau. Les pics les plus intenses correspondent aux plans cristallins les plus denses et les plus ordonnés. La présence de plusieurs pics bien définis suggère que la poudre de caroube possède une structure cristalline relativement complexe, avec plusieurs orientations cristallographiques. Cette information est cruciale pour comprendre comment la poudre de caroube interagira avec le tuf dans la fabrication des briques de terre comprimée, affectant potentiellement les propriétés mécaniques et la durabilité des briques finales.



figure 3.3: Poudre de caroube en Doypack de 250g [64]

Tableau 3.3: Les tests d'analyse en laboratoire de la poudre de caroube Tlemcen 23/01/2024

LOT	M1685/22
PRODUIT	CARUMA 45
DATE DA FABRICATION	OCTOBRE 2022
ANALYSE PHYSIQUE ET CHIMIQUE	
RESULTATS	
HUMIDITE	1,50 %
CENDRES	3,69 %
FIBRES	19,42%
SUCRES	27,33%
PROTEINES	4,49%
PH	5,30
GRAISSE	0,77 %
ANALYSES MICROBIOLOGIQUES	
RESULTATS	
SALMONELLE	0 ufc/25g
E-COLI	0 ufc/g
AEROBIE	< 1000 ufc/g

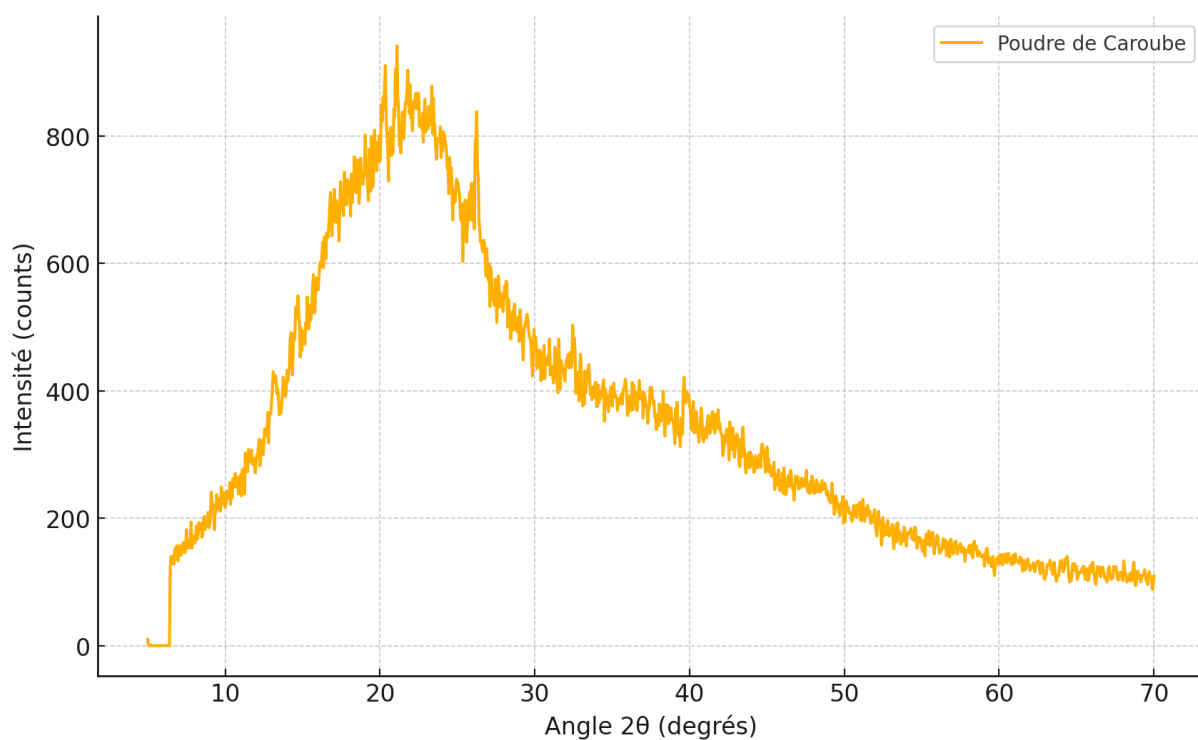


figure 3.4: Diffractogramme DRX de la poudre de Caroube

3.3 Processus de fabrication

Nous avons fabriqué plusieurs briques de terre comprimée prismatiques à base de tuf et différents pourcentages de poudre de caroube. Six formulations différentes ont été réalisés, comme résumé dans le tableau suivant :

Tableau 3.4: la méthode utilisée pour la fabrication des briques

	1ere	2eme	3eme	4eme	5eme	6eme
	Formulation	Formulation	Formulation	Formulation	Formulation	Formulation
Terre	100%	97.5%	95%	92.5%	90%	85%
caroube	0%	2.5%	5%	7.5%	10%	15%
Eau	15%	15%	15%	15%	15%	15%

Nous avons commencé par le tamisage du sol avec un tamis de 2 mm avant de l'utiliser (figure 3.5).



figure 3.5: Tamisage de tuf avec un tamis de 2mm

Le tuf tamisé est ensuite mis dans une étuve à 105°C pour le déshumidifier (figure 3.6)



figure 3.6: Mettre de tuf dans l'étuve (105°)

Les quantités de tuf et de caroube sont pesées selon le tableau ci-dessus (**Tableau 3.4**). Nous avons fabriqué une dizaine de briques pour chaque formulation. Ensuite, nous ajoutons la quantité d'eau correspondante avec précaution pour éviter la

formation de grumeaux (**figure 3.1**). Le mélange est divisé en sachets et bien fermés pour éviter la déshumidification (**figure 3.9**). Le moule utilisé contient 2 kg de mélange (**figure 3.10**).



figure 3.7: Peser la quantité de tuf après ajouter la quantité de caroube appropriée



figure 3.8: Mélangez les ingrédients.



figure 3.9: Diviser le mélange sur des sachets



figure 3.10: Le moule utilisé pour confection des briques[3]

Nous avons utilisé une presse hydraulique pour la fabrication des briques de terre (**figure 3.11**), ce qui donne un bon résultat en termes de forme et de résistance. La force maximale utilisée est de 8 tonnes.



figure 3.11: Stabilisation mécanique

Les briques obtenues sont enveloppées dans la cellophane pour bien interagir avec la terre, la caroube et l'eau, et pour éviter les réactions chimiques avec le milieu externe. Ensuite, elles sont mises dans une étuve à 45°C.

Les briques sont pesées tous les jours jusqu'à ce que leur masse soit stabilisée. Ensuite, des tests mécaniques, thermiques et chimiques peuvent être effectués.



figure 3.12: Aperçu sur quelques briques réalisés

La figure suivante 3.12 montrant la stabilisation de masse des briques de terre comprimé. Les courbes illustrent la variation de la masse des briques au fil des jours, indiquant leur stabilisation progressive. Les différents pourcentages de caroube utilisés montrent l'impact de l'ajout de caroube sur la stabilisation des briques à différents pourcentages de caroube :

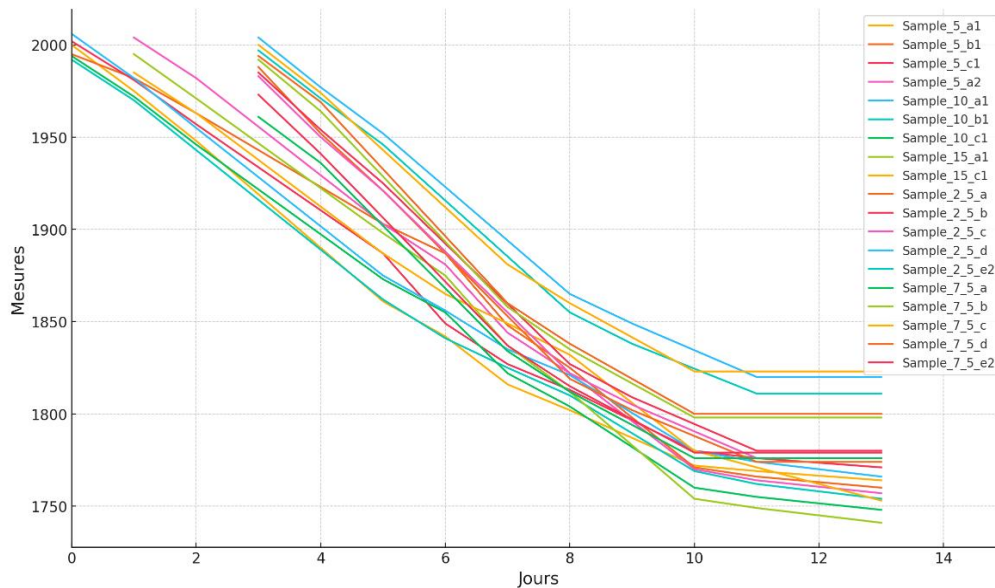


figure 3.13: Stabilisation de masse des BTC à différents % de caroube

3.4 Résultats et discussions

3.4.1 La résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression a été réalisé pour évaluer la solidité des briques de terre comprimée stabilisées avec différents pourcentages de poudre de caroube. Cet essai est crucial pour déterminer la capacité des briques à supporter des charges sans se déformer, conformément à la norme NF XP P13-901 (AFNOR 2022), qui stipule que la résistance à la compression à sec du BTC doit être d'au moins 2 MPa.



figure 3.14: essai de compression simple d'une brique en terre comprimée.

Le principe du test consiste à soumettre l'échantillon à une vitesse de chargement constante grâce au mouvement du cylindre de pression et à mesurer la force axiale affichée sur le cadran une fois le test terminé (**figure 3.14**). La résistance à la compression de la brique (R_c) est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{10 \times F}{S}$$

R_c : résistance à la compression de la brique en (MPa).

F : charge maximale supportée par les demi-blocs (KN).

S : surface de demi bloc en (cm²).

Les résultats de la résistance à la compression des briques en fonction des pourcentages de caroube sont présentés dans le tableau 3.5 ci-dessous :

Tableau 3.5: les résultats de l'essai de résistance à la compression

Briques (%)	Test 1 (RC Mpa)	Test 2 (RC Mpa)	Catégorie
0	5,06	5,16	RC5
2,5	5,31	5,29	RC5
5	4,78	4,87	RC4
7,5	4,58	4,75	RC4
10	3,77	3,75	RC3
15	3,33	3,32	RC3

Les briques non stabilisées (0% de caroube) présentent une résistance à la compression de 5,06 MPa à 5,16 MPa. L'ajout de 2,5% de poudre de caroube augmente légèrement la résistance à la compression à environ 5,31 MPa à 5,29 MPa. Cependant, des pourcentages plus élevés de poudre de caroube (à partir de 5%) entraînent une diminution de la résistance à la compression, atteignant 3,33 MPa à 3,32 MPa pour 15% de caroube.

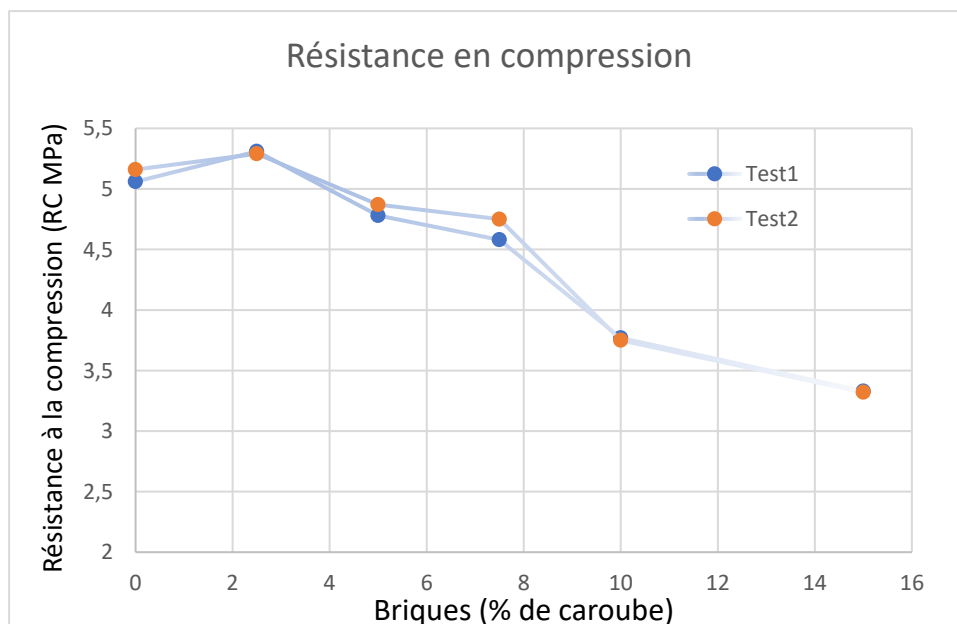


figure 3.15: Résistance à La Compression En Fonction Du Pourcentage De Caroube

Les résultats montrent que l'ajout de caroube améliore la résistance à la compression jusqu'à un certain point (2,5%). Cependant, des pourcentages plus élevés réduisent la résistance. Une raison possible de cette diminution pourrait être que l'excès de caroube compromet la structure de la brique. En proportions modérées, la caroube agit comme un liant renforçant la structure. À des concentrations plus élevées, elle peut causer des problèmes de compacité et de cohésion, entraînant une diminution de la résistance globale de la brique.

figures 3.16 ci-dessous présente une comparaison des résistances à la compression pour différents pourcentages de poudre de caroube :

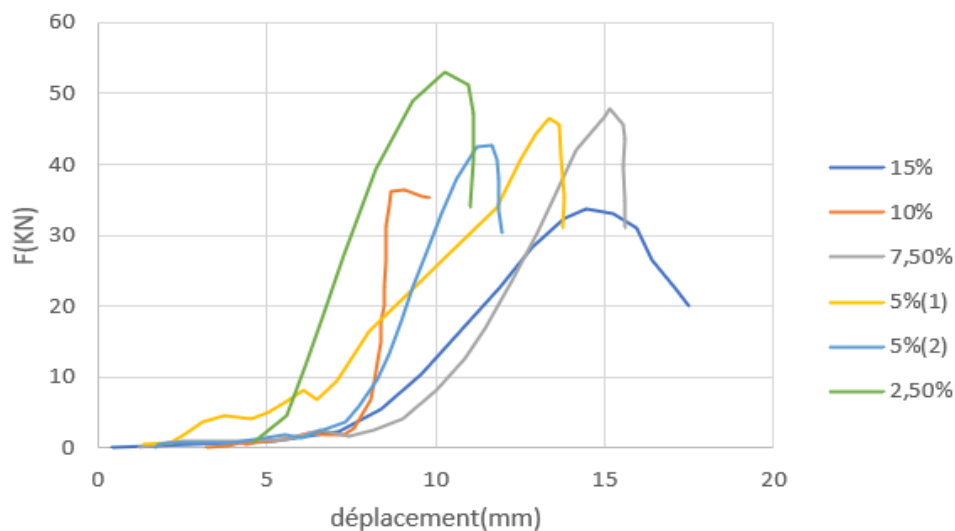


figure 3.16: la force de compression en fonction de déplacement

La Figure 3.17 montre l'état des briques avant et après l'essai de compression. Les briques stabilisées avec 2,5% de poudre de caroube ont conservé leur intégrité structurelle mieux que celles avec des pourcentages plus élevés de caroube, qui présentent des signes de déformation et de fissuration.



avant l'essai de compression



après l'essai de compression

figure 3.17 : avant et après l'essai de compression

L'essai de résistance à la compression a démontré que l'ajout de faibles pourcentages de poudre de caroube (jusqu'à 2,5%) améliore la résistance des briques de terre comprimée. Cependant, des pourcentages plus élevés (à partir de 5%) diminuent cette résistance. Ces résultats soulignent l'importance de la proportion de stabilisant utilisé pour optimiser la solidité des briques de terre comprimée.

3.4.2 L'immersion

L'essai de tenue à l'eau par immersion a été réalisé pour évaluer la résistance à l'humidité des briques de terre comprimée stabilisées avec différents pourcentages de poudre de caroube. Cet essai permet de simuler l'exposition des briques à l'humidité, ce qui est pertinent pour les régions sujettes à des conditions humides. La norme utilisée pour cet essai est la XP P13-901 (AFNOR 2022).

Le principe de cet essai est d'immerger 10 cm de la brique verticalement dans un récipient d'eau pendant 10 minutes, puis de mesurer la perte de masse des briques (**Figure 3.18**). La perte de masse (P) est déterminée par le rapport entre la masse des résidus et la masse initiale de la brique selon l'équation suivante :

$$P = \frac{M_2 \times 100}{M_0}$$

P : la perte de masse en pourcentage %

M₀ : la masse initiale de la brique avant l'essai

M₂ : la masse de la brique séchée jusqu'à la masse constante après l'essai

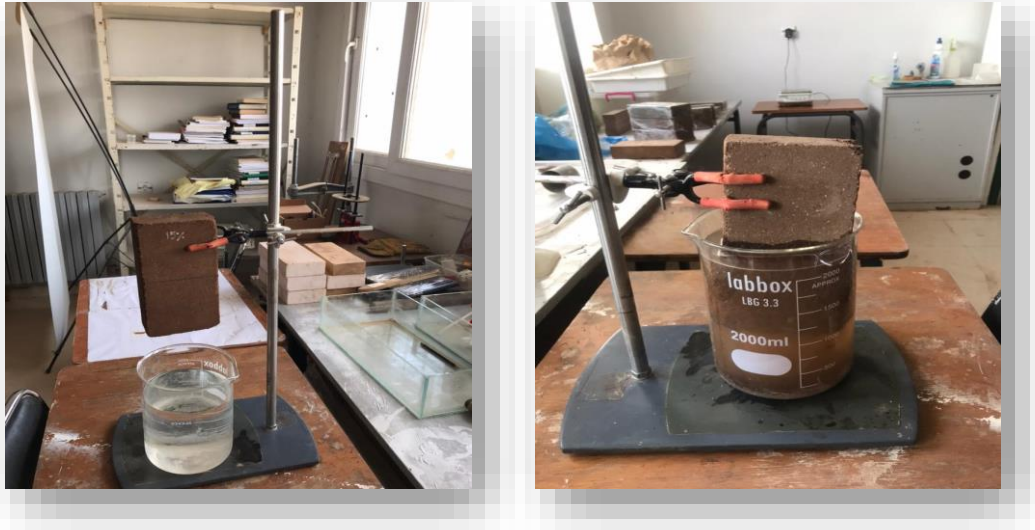


figure 3.18: Illustration de l'essai d'immersion

Les résultats de la perte de masse des briques en fonction des pourcentages de caroube sont présentés dans le tableau 3.6 ci-dessous :

Tableau 3.6: les résultats de l'essai de l'immersion

Briques (% de caroube)	Perte en masse Test1 (%)	Perte en masse Test2 (%)
0	9,59	10,44
2,5	2,09	2,13
5	7,5	7,87
7,5	7,79	8,66
10	12,09	13,22
15	27,75	26,39

Les briques non stabilisées (0% de caroube) présentent une perte de masse significative de 9,59% à 10,44%, indiquant une faible résistance à l'humidité. L'ajout de 2,5% de poudre de caroube réduit considérablement la perte de masse à environ 2,09% à 2,13%, montrant une meilleure résistance à l'eau. Cependant, des

pourcentages plus élevés de poudre de caroube (10% et 15%) entraînent une augmentation importante de la perte de masse, ce qui indique une détérioration de la résistance à l'humidité.

La **figure 3.19** ci-dessous présente une comparaison des pertes de masse pour différents pourcentages de poudre de caroube :

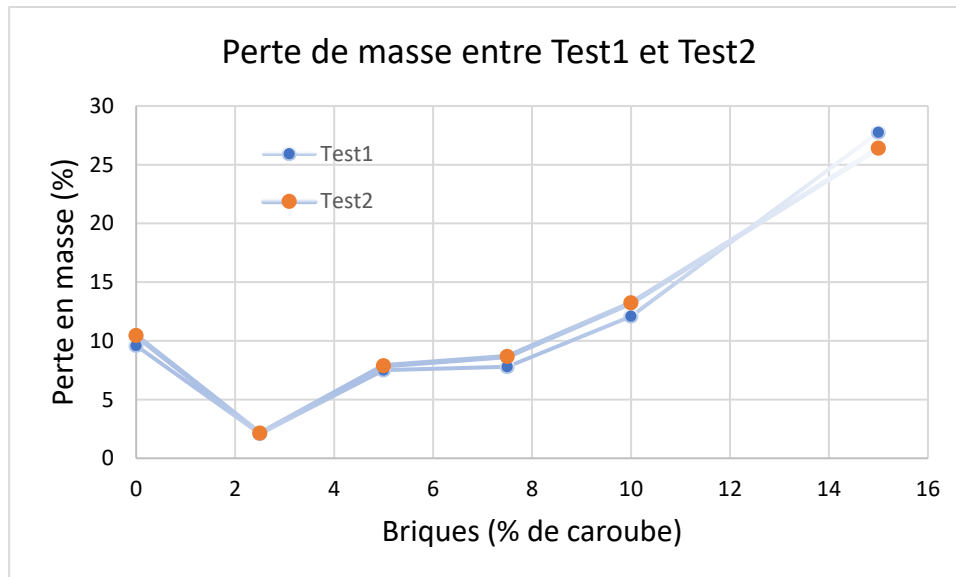


figure 3.19: pourcentage de la perte de masse En Fonction Du Pourcentage De Caroube

Les résultats peuvent être attribués aux propriétés de la poudre de caroube, connue pour ses capacités à lier l'eau et à former des gels visqueux. Lorsqu'elle est ajoutée aux briques, elle agit comme un agent liant renforçant la structure de la brique et réduisant sa porosité. Cela conduit à une meilleure résistance à l'eau et donc à une réduction de la perte de masse lorsqu'elle est exposée à l'humidité. Cependant, des concentrations plus élevées de poudre de caroube peuvent augmenter la viscosité du mélange, ce qui peut affecter négativement les propriétés de la brique.

La Figure 3.20 illustre l'état des différentes briques après l'essai d'immersion. Les briques comprimées avec 2,5% de poudre de caroube montrent peu ou pas de dégradation notable, confirmant leur bonne résistance à l'humidité. En revanche, les briques non stabilisées et celles avec 10% et 15% de poudre de caroube présentent une détérioration significative de la surface.



figure 3.20: état des briques après l'essai de tenue à l'eau par immersion.

L'essai d'immersion a démontré que l'ajout de faibles pourcentages de poudre de caroube (2,5%) améliore la résistance à l'humidité des briques de terre comprimée. Cependant, des pourcentages plus élevés (10% et 15%) diminuent cette résistance. Ces résultats soulignent l'importance de la proportion de stabilisant utilisé pour optimiser la durabilité des briques dans des conditions humides.

3.4.3 L'abrasion

L'essai d'abrasion a été réalisé pour évaluer la résistance à l'abrasion des briques de terre comprimée stabilisées avec différents pourcentages de poudre de caroube. Cet essai permet de simuler l'impact abrasif du vent de sable sur les briques, ce qui est particulièrement pertinent pour les régions sahariennes. La norme utilisée pour cet essai est la NF XP P13-901.

L'essai a été effectué en utilisant une brosse métallique normalisée, appliquant une pression verticale de 3 kg en un aller-retour par seconde pendant une minute figure 3.21. Le coefficient d'abrasion (Ca) est calculé selon l'équation suivante :

$$Ca \left(\frac{cm^2}{g} \right) = \frac{s}{m_0 - m_1} \cdot 100$$

M₀ : masse initiale de la brique.

M₁ : masse après brossage.

S : la surface brossée du bloc.

Les résultats des coefficients d'abrasion pour les différentes briques sont présentés dans le tableau 3.7 ci-dessous :

Tableau 3.7: les résultats de l'essai de l'abrasion

	Résistance à l'abrasion		Catégorie
	Briques	Coef d'abrasion	
	(pourcentage de caroube)	Ca (g/cm ²)	
Test 1	0	0,58	Hors catégorie
	2,5	0,28	Ab3
	5	0,3	Ab3
	7,5	0,39	Ab3
	10	0,83	Hors catégorie
	15	0,97	Hors catégorie
Test 2	0	0,58	Hors catégorie
	2,5	0,3	Ab3
	5	0,31	Ab3
	7,5	0,4	Ab3
	10	0,8	Hors catégorie
	15	0,99	Hors catégorie



figure3.21:essai d'abrasion

Les briques non stabilisées (0% de caroube) présentent un coefficient d'abrasion relativement élevé de 0.58 g/cm², indiquant une faible résistance à l'abrasion. L'ajout de poudre de caroube réduit le coefficient d'abrasion pour les pourcentages allant jusqu'à 7.5%, avec des valeurs minimales atteintes à 2.5% (0.28 g/cm²). Cependant, des pourcentages plus élevés de poudre de caroube (10% et 15%) augmentent significativement le coefficient d'abrasion, indiquant une détérioration de la résistance à l'abrasion.

Selon la norme AFNOR XP P13-901, les briques peuvent être classées en fonction de leur coefficient de résistance à l'abrasion. Les briques stabilisées avec 2.5%, 5%, et 7.5% de poudre de caroube sont classées dans la classe Ab 3, ce qui les rend adaptées aux conditions abrasives. En revanche, les briques non stabilisées ainsi que celles contenant 10% et 15% de caroube sont hors classement car leur coefficient d'abrasion dépasse 0.5 g/cm².

La figure 3.22 ci-dessous présente une comparaison des coefficients d'abrasion pour les deux séries de tests effectués :

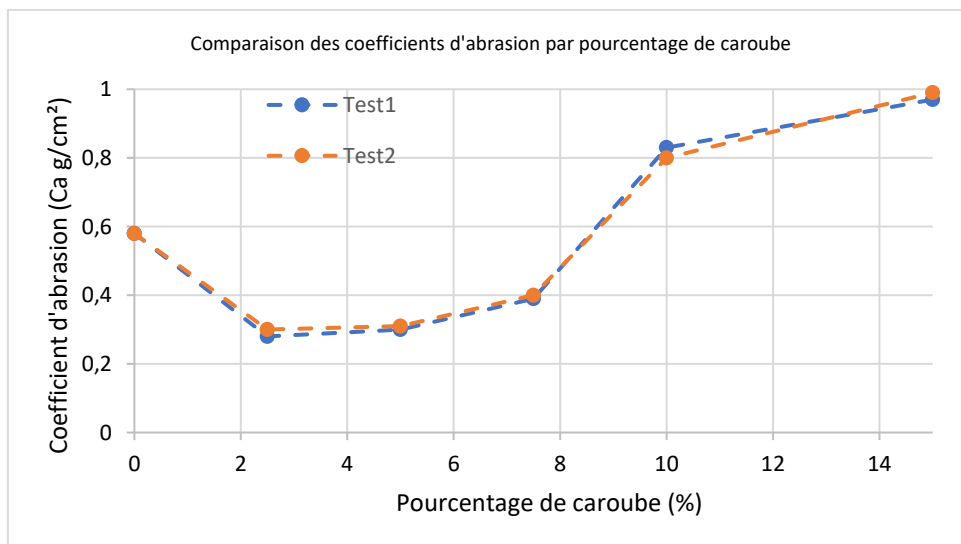


figure 3.22 : coefficient de l'abrasion En Fonction Du Pourcentage De Caroube

La Figure 3.23 illustre l'état des différentes briques après l'essai d'abrasion. Les briques comprimées avec 2.5%, 5%, et 7.5% de poudre de caroube montrent peu ou pas de rayures profondes, confirmant leur bonne résistance à l'abrasion. À l'inverse,

les briques non stabilisées et celles avec 10% et 15% de poudre de caroube présentent des rayures profondes, indiquant une faible résistance à l'abrasion.

L'essai d'abrasion a démontré que l'ajout de faibles pourcentages de poudre de caroube (jusqu'à 7.5%) améliore la résistance à l'abrasion des briques de terre comprimée. Cependant, des pourcentages plus élevés (10% et 15%) diminuent cette résistance. Ces résultats soulignent l'importance de la proportion de stabilisant utilisé pour optimiser la durabilité des briques dans des conditions abrasives.

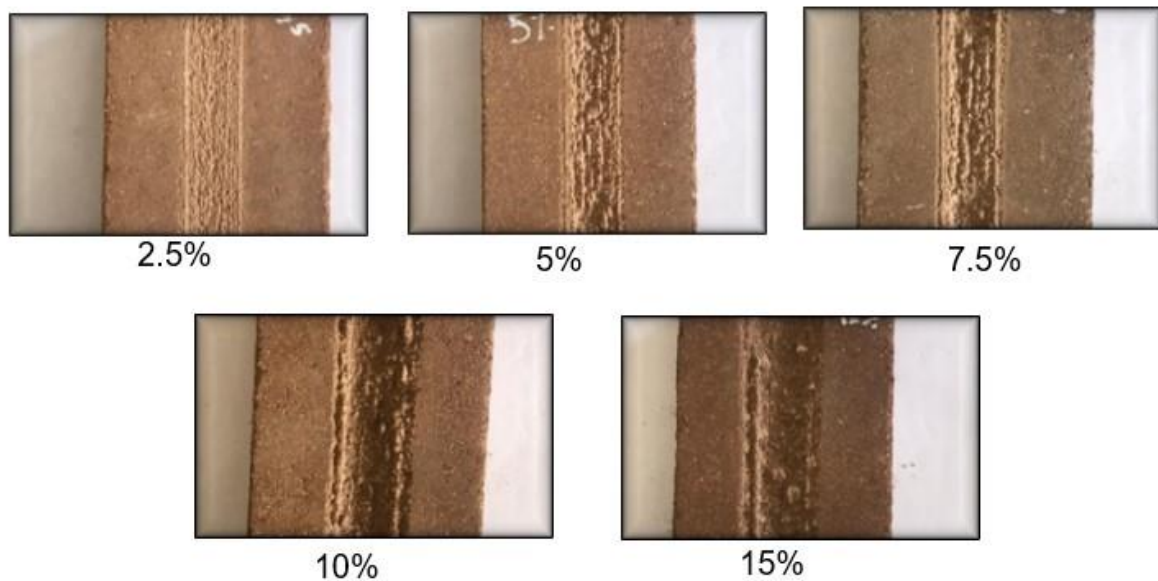


figure 3.23: état des briques après l'essai d'abrasion

3.4.4 Diffractogrammes DRX

Les pics du diffractogrammes DRX des échantillons de tuf pur, de poudre de caroube pure et des mélanges tuf + 2,5% et 15% de poudre de caroube sont présentés ci-dessous. Les principaux pics observés pour chaque échantillon sont comparés pour identifier les nouvelles phases formées (**Tableau 3.8**)

Tableau 3.8: les résultats de diffractogrammes DRX

Angle 2θ (°)	Tuf Seul	Poudre de Caroube Pure	Tuf + 2,5% de Poudre de Caroube	Nouveau Pic (2,5%)	Tuf + 15% de Poudre de Caroube	Nouveau Pic (15%)
6.50	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
6.65	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non

6.75	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
6.90	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
7.10	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
7.30	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
7.50	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
7.65	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
7.80	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
8.00	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non
20.9	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
21.20	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
21.60	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
24.60	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
26.6	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
28.15	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
29.4	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
30.35	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
30.50	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
30.95	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
32.99	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
36.5	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
37.55	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
39.4	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
40.95	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
42.5	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
43.1	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
44.7	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
45.8	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
47.5	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
48.5	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
49.05	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
50.05	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
50.1	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
54.9	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
57.5	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
58.15	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
58.95	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
60.0	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non
62.25	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
62.55	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

62.80	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
62.90	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
66.20	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
67.15	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
68.1	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non

Les principaux pics pour la poudre de caroube pure sont situés entre 6.50° et 8.00° aux angles 2θ . Ces pics correspondent aux phases cristallines présentes dans la poudre de caroube pure. Les principaux pics pour le tuf pur, identifiés à partir de la base de données, sont situés entre 20.9° et 68.1° aux angles 2θ . Ces pics correspondent principalement à la calcite (C) et au quartz (Q).

Les principaux pics pour le mélange de tuf avec 2,5% de poudre de caroube sont représentés par la couleur verte au Tableau 3.8. Ces nouveaux pics observés à 21.20° , 21.40° , 21.60° , 24.60° , 28.15° , etc., indiquent la formation de nouvelles phases cristallines suite à l'ajout de la poudre de caroube. Ces nouvelles phases pourraient justifier l'amélioration des propriétés mécaniques des briques avec 2,5% de Caroube. Les pics similaires observés dans le mélange à 2,5% de poudre de caroube sont également présents dans le mélange à 15% (**Figure 3.24**). Cependant, l'augmentation de la concentration en poudre de caroube peut perturber la structure cristalline de manière défavorable, justifiant ainsi la réduction des performances des briques.

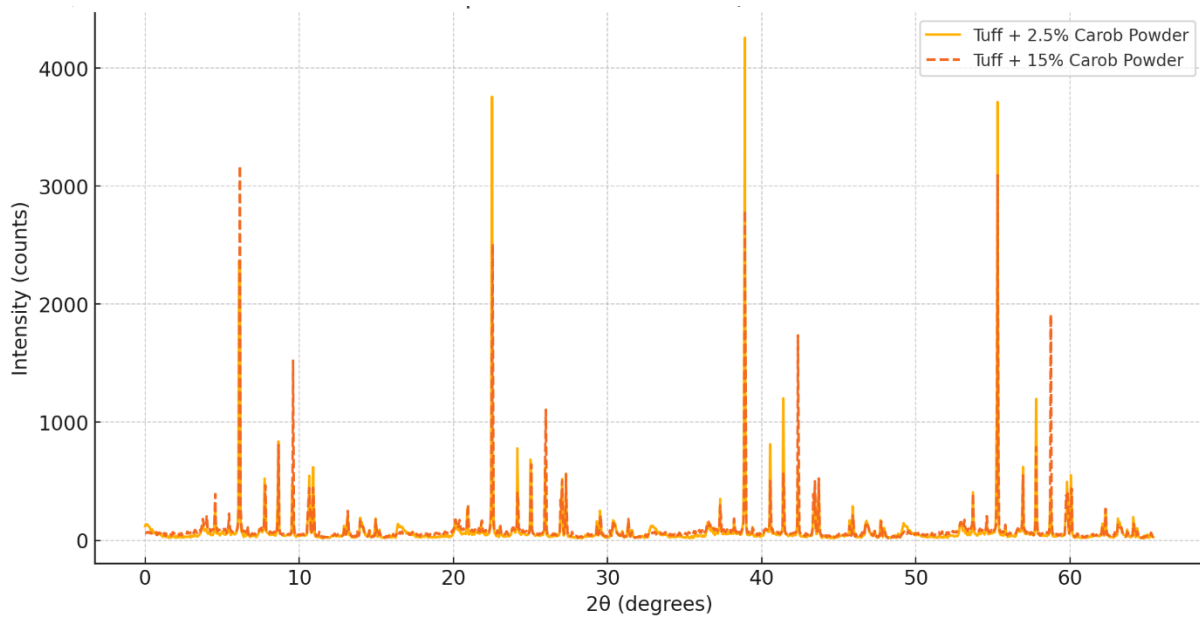


figure 3.24: DRX comparatifs de brique de terre comprimée (tuf + 2,5 % et tuf + 15 % de poudre de caroube)

3.5 Conclusion

L'étude expérimentale sur l'utilisation de la poudre de caroube comme additif dans les briques de terre comprimée a montré des améliorations significatives des propriétés mécaniques et de résistance à l'humidité des briques. L'ajout de poudre de caroube entre 2,5% et 5% optimise la résistance à la compression, atteignant jusqu'à 5,31 MPa, ce qui dépasse les normes de construction écologiques. Cette amélioration est due aux propriétés adhésives du mucilage contenu dans la caroube, renforçant la cohésion des particules de tuf.

Les résultats montrent également une réduction significative de la perte de masse après immersion, passant de 9,59% à 2,09% avec 2,5% de caroube, indiquant une meilleure imperméabilité des briques. De plus, les tests d'abrasion révèlent une meilleure résistance à l'usure pour les briques contenant jusqu'à 7,5% de caroube, classées dans la catégorie Ab3.

Les analyses de diffraction des rayons X (DRX) montrent la formation de nouvelles phases cristallines dans les mélanges de tuf et de caroube, potentiellement responsables de l'amélioration des propriétés mécaniques. Ces nouvelles phases pourraient inclure des composés polysaccharidiques ou dérivés de la lignine, interagissant avec les minéraux du tuf pour renforcer la matrice des briques.

Conclusion générale

Cette étude met en lumière l'importance de l'utilisation de la terre en tant que matériau de construction durable, avec un accent particulier sur la technique des briques de terre comprimée (BTC). Les résultats expérimentaux montrent que l'ajout de poudre de caroube améliore significativement les propriétés mécaniques et la résistance à l'humidité des briques, particulièrement avec un pourcentage de 2,5%.

Dans le premier chapitre, nous avons exploré les techniques et les avantages de l'utilisation de la terre comme matériau de construction, soulignant son faible coût, sa disponibilité universelle dans la région méditerranéenne, ses propriétés thermiques et ses avantages environnementaux. Nous avons également discuté des méthodes de stabilisation mécanique et chimique des briques ainsi que de leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, l'accent a été mis sur la poudre de caroube en tant que source potentielle pour la construction durable, et ses utilisations dans divers domaines ont été explorées en plus des possibilités de son utilisation dans la construction. La faisabilité d'utilisation de la caroube présente une piste prometteuse dans le l'industrie de la construction.

Enfin, Les résultats des tests expérimentaux ont montré que l'ajout de poudre de caroube avec des proportions modérées (2,5% à 5%) améliore les propriétés mécaniques. Cependant, des concentrations plus élevées de poudre de caroube ont entraîné une détérioration des propriétés des briques, et aussi une perturbation de la structure cristalline. Il est donc recommandé d'utiliser des pourcentages plus faibles pour obtenir de meilleurs résultats.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives. Pour améliorer la durabilité des briques de terre comprimée, il est recommandé de :

- Maintenir le pourcentage de 2,5% de poudre de caroube : Les tests ont montré que ce pourcentage optimise les propriétés mécaniques et de durabilité. Des essais avec des pourcentages inférieurs pourraient être explorés pour voir si des résultats encore meilleurs peuvent être obtenus.
- Ajouter un autre composant à la brique : Pour renforcer davantage la durabilité et la résistance à l'humidité, l'intégration d'un autre matériau comme l'argile pourrait être

bénéfique. L'ajout de chaux naturelle ou l'application d'une compression à haute pression pourraient également améliorer la densité et, par conséquent, la durabilité des briques.

- Études supplémentaires sur les faibles concentrations de caroube : Il est nécessaire de mener des recherches supplémentaires pour explorer les effets de pourcentages de caroube inférieurs à 2,5% sur les propriétés des briques.

Ces perspectives offrent des voies prometteuses pour le développement de matériaux de construction encore plus durables et respectueux de l'environnement, en intégrant des techniques et des matériaux qui optimisent les propriétés des briques de terre comprimée.

En conclusion, cette étude met en évidence l'utilisation de la terre comme matériau de construction, avec la technologie des briques de terre comprimée et l'ajout de poudre de caroube comme éco-liant. Les résultats montrent un potentiel significatif pour des constructions durables et résistantes, tout en respectant les exigences contemporaines de respect de l'environnement et de performance énergétique .

bibliographie

- [1] D. Gallipoli, A. Bruno, C. Perlot, and J. & Mendes, “A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12, 463-478. <https://doi.org/10.1007/S11440-016-0521-1>,” 2017.
- [2] B. Bayazitlioglu, “Conservation and maintenance of earth constructions: yesterday and today. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 8(4), 323-354.],” 2017.
- [3] AIT SALEM Ahmed Abdelmadjid, “Etude des comportements mécaniques et de durabilité : Valorisation du tuf en brique de terre compressée stabilisée (BTCs),” 2024.
- [4] A. Laborel-Préneron, J. E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout, and A. Bertron, “Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 719–734, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119.
- [5] M. Gomes, T. , Gonçalves, and P. ,Faria, “Hydric Behavior of Earth Materials and the Effects of Their Stabilization with Cement or Lime: Study on Repair Mortars for Historical Rammed Earth Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04016041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5).” 2016.
- [6] E. Schweiker, M., Endres, E., Gossler, J., Hack, N., Hildebrand, L., Creutz, M., Klinge, A., Kloft, H., Knaack, U., Mehnert, J., Roswag-Klinge, “Ten questions concerning the potential of digital production and new technologies for contemporary earthen constructions. *Building and Environment*, 206, 108240. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108240>.” 2021.
- [7] H. . Houben, H. Guillaud, “*Traité de construction en terre*, Éd. Parenthèse, Marseille,” 1995, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.009.
- [8] J. Paulus, “CONSTRUCTION EN TERRE CRUE: DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES – Application à un cas pratique : Ouagadougou.,” de liege, 2015.
- [9] S. Karim, “INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE LA TERRE CRUE NATURELLE ET TRAITEE Soutenue,” in *THESE Présentée pour l’obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle En :*

*Génie Civil Spécialité : Génie Civi*Soutenue publiquement, le 08 / 06 / 2021 ,
2021.

- [10] Rigassi.V, *CRATerre-EAG. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production. Eschborn, ISBN : 3-528-02081-4.7. Allemagne. Allemagne, 1995.* doi: 10.9790/1813-0903010712.
- [16] R. Djelloul, "Thèse de doctorat : Influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en constDjelloul, Ramzi. 2018. "Thèse de Doctorat : Influence de l'ajout de Chaux et ." 2018.
- [17] H. . Houben, H. Guillaud, *Traité de construction en terre. CRATerre,. Marseille : Parenthèse,. 2016.*
- [18] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, . "Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement & Concrete Composites* 26 :811–820." 2004.
- [19] A. Mesbah, J. Morel, and M. Olivie, "Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents. *Materials and structures. Vol32. Page: 687-694. Ecole Nationale de travaux publics Velin Cedex, France.*" 1999.
- [20] S. D. Bruno Agostino, Walter Galipoli, "Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques," 2015.
- [21] J. Giboulet, "Les perceptions de la matière Terre comme matière à vivre et à construire dans l'architecture. *Ecole nationale supérieure d'Architecture. Montpellier,*" 2017.
- [23] S. J. DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, "Soil Compaction: Causes, Development Technology Unit, Warwick University, .," 2001.
- [24] Riza. F.V, *Riza. F.V, Rahman. I.A. The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Jalan, Malaysia. 2015.*
- [25] Schroeder. H, "Earth Building Materials-Production, Requirements and Testing. In: *Sustainable Building with Earth. Ed.: Springer. Germany. ISBN :978-3-319-19490-5.*" 2015.
- [26] W. P. Morel J-C., Pkla A., "Compressive strength testing of compressed earth

- blocks. *Construction and Building Materials* 21: 303–309,” 2007. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [27] A. Zhang, L., Yang, L., Jelle, B. P., Wang, Y., & Gustavsen, “Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 162, 576-583.” vol. 162, pp. 576–583, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163.
- [28] J. E. Oti, J. M. Kinuthia, and J. Bai, “Design thermal values for unfired clay bricks,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 104–112, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.07.011.
- [29] C. El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Antczak, E., & Chapiseau, *Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks. Applied Thermal Engineering*, 93, 377-383. 2016.
- [30] S. P. Liuzzi, S., Hall, M. R., Stefanizzi, P., & Casey, *Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. Building and Environment*, 61, 82-92. 2013.
- [31] A. M. Emmanuel Ouedraogo, Ousmane Coulibaly, Abdoulaye Ouedraogo, “Mechanical and Thermophysical Properties of Cement and/or Paper (Cellulose) Stabilized Compressed Clay Bricks.” *J. Mater. Eng. Struct.*, vol. 2, no. 2, pp. 68–76, 2015.
- [32] V. Cerezo, “Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d’un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique Institut National des Sciences Appliquées de Lyon , France.” *Thèse Dr.*, no. June 2005, p. 247, 2005.
- [33] G. T. O, Joseph , Arumala ., “Conference of the Royal Institution of Chartered surveyors: Compressed earth building blocks. Atlanta, ISBN 978-1-84219-357-0. USA.” 2007.
- [34] T.-D. Nguyen, “Étude Du Comportement Au Feu Des Maçonneries De Briques En Terre-Cuite: Approche Expérimentale Et Modélisation Du Risque D’Écaillage,” p. 153, 2009.
- [35] MEKAIDECHE Khalfallah, “Comportement hygrothermique de la terre crue

- partiellement saturée,” in *THESE Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3ème Cycle EnGénie Civil soutenue publiquement, le 13/07/2021, 2021.*
- [36] S. Hacène, “Matériaux locaux et développement durable cas de la brique de terre comprimée appliquée au sud algérien (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme-Hocine Aït Ahmed, EPAU, Algérie).” 2012.
- [38] J. Batlle, I. Tous, *Carob tree. Ceratonia siliqua L.* may 2014, 1997.
- [39] B. Benmahioul, M. Kaid-Harche, and F. Daguin, “Le caroubier, une espèce méditerranéenne à usages multiples,” *Assoc. Forêt Méditerranéenne, 14 rue Louis Astouin, 13002 MARSEILLE, Fr.*, vol. t. XXXII, no. n° 1, pp. 51–58, 2011, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2042/47106>
- [40] Y. ABDERRAHIM and A. HARMOUNI, “Amélioration du flux de production pour l'entreprise SARL BOUBLENTA,” *ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES*, 2021.
- [42] M. Saadouni, “Thème Etude invitode l'activité antalgique de l'extrait méthanolique de caroube « Ceratonia siliqua L .»,” *des frères Mentouri constantine 1*, 2021.
- [43] P. Orphanos and J. Papaconstantinou, *The Carob Varieties of Cyprus. Technical Bulletin 5.* 1969.
- [44] M. Kaderi, G. Ben Hamouda, H. Zaeir, M. Hanana, and L. Hamrouni, “Notes ethnobotanique et phytopharmacologique sur *Ceratonia siliqua* (L.),” *Phytotherapie*, vol. 13, pp. 144–147, 2014. doi: 10.1007/s10298-014-0904-4.
- [45] N. GAOUAR, “ETUDE DE LA VALEUR NUTRITIVE DE LA CAROUBE DE DIFFERENTES VARIETES ALGERIENNES,” *ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM* -, 2011.
- [46] F. Z. Azzi, H. Rabia, and A. R. Belkadi, “Etude des caractéristiques nutritionnelles et biochimiques de la pulpe de caroube de différentes régions d'Algérie. valorisation en pastification.,” *SAAD DAHLAB BLIDA1*, 2022.
- [47] M. I. Alim and M. Khanous, “Caractérisation et valorisation des propriétés Techno fonctionnelles de poudre de la caroube,” *Ibn Khaldoun-Tiaret*, 2023.

- [48] Stéphanie, “La poudre de caroube : bienfaits et utilisations.”
- [50] M. Moumou, I. Mokhtari, D. Milenkovic, and S. Amrani, “Carob (*Ceratonia siliqua* L .): A Comprehensive Review on Traditional Uses , Chemical Composition , Pharmacological Effects and Toxicology (2002-2022),” 2023.
- [51] F. A. Ayaz *et al.*, “Nutrient content of carob pod (*Ceratonia siliqua* L .) flour prepared commercially and domestically,” vol. 64, no. 4, p. 286, 2009, doi: 10.1007/s11130-009-0130-3.
- [52] B. BOUREMOUME, K. FADLAOUI, and M. ROUAGDIA, “La poudre de caroube,” 8 MAI 1945 GUELMA, 2023.
- [53] Y. Kawamura and D. Ph, “CAROB BEAN GUM Chemical and Technical Assessment (CTA),” *food agriculture Organ. united nations*, p. 10, 2016.
- [54] T. Roukas, “Citric acid production from carob pod by solid-state fermentation,” *Enzyme and microbiol technology*, vol. 24, no. 1–2, pp. 54–59, 1999.
- [58] “Quel bilan carbone pour le secteur du bâtiment ?,” carbo academy.
- [59] K. Amed and J. Ouedraogo, “Stabilisation de matériaux de construction durables et Dates et versions écologiques à base de terre crue par des liants organiques et / ou minéraux à faibles impacts environnementaux Questions juridiques,” 2019.
- [60] M. Papagiannopoulos, H. R. Wollseifen, A. Mellenthin, B. Haber, and R. Galensa, “Identification and Quantification of Polyphenols in Carob Fruits (*Ceratonia siliqua* L .) and Derived Products by HPLC,” *ACS Publ.*, 2004.
- [61] C. Joan Romero, S. Carlos Hidalgo, S. Gabriel Barbeta, and L. Begona Serrano, “improvement in the rheological and mechanical properties of clay mortar after adding *ceratonia siliqua* L .extracts,” *Elsevier*, p. 9, 2019.
- [62] “part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars.,” in *METHODS OF TEST FOR MORTARS FOR MASONRY*, CV., 1999, pp. 2–3.
- [63] S. Latieule, “Le Portugal évalue la caroube comme source de biocarburant,” *l’usine nouvelle*, Apr. 2013.

Webographie

- [11] <https://www.lamaisonsaintgobain.fr/guides-travaux/renovation-energetique-habitat-durable/terre-crue-construction-renovation>
- [12] https://www.flickr.com/photos/phil_marion/35256743862
- [13] <http://patrimoine-terre-lyonnais.patrimoineaurhalpin.org/2016/02/18/technique-du-pise/>
- [14] <https://www.cite-sciences.fr/au-programme/expos-temporaires/ma-terre-premiere/decouvrir/construire/bauge.php>
- [15] <https://www.cite-sciences.fr/au-programme/expos-temporaires/ma-terre-premiere/decouvrir/construire/torchis.php>
- [22] <https://www.cycle-terre.eu/>
- [37] <https://www.logemag.fr/brille-en-terre-crue>
- [41] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Ceratonia_siliqua
- [49] <https://www.vegetopie.com/super-aliments/8-caroube-poudre-3770010225065.html>
- [55] <https://www.beaute-test.com/produit/132468-dha-10-extrait-pulpe-caroube-typology>
- [56] https://corailmarket.com/fr/#google_vignette
- [57] <https://www.grandturkishbazaar.com/>
- [64] <https://prodalex.dz/indexArabe.html>