



**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ AHMED DRAIA – ADRAR**



**Chapitre II : Améliorations des caractéristiques des briques en terre crue DÉPARTEMENT DE GÉNIE
CIVIL**

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Spécialité : Matériaux En Génie Civil

Présentée Par

BEN ABDALLAH Charifa

**AMÉLIORATION DES CARACTÉRISTIQUES DE LA BRIQUE
DE TERRE CRUE LOCALE (TOUB), DES ENDUITS ET CREPIS
NATURELS AINSI QUE DES SYSTÈMES D'ÉTANCHÉITÉ**

Soutenue le : 27/06/2026

Devant le jury composé de :

BENNACER Lyacine	Pr	Université d'Adrar	Président
DJAFARI Driss	MCA	Université d'Adrar	Directeur de Thèse
FEZZIOUI Naima	MCA	Université de Béchar	Examineur
AKACEM Mustapha	MCA	Université d'Adrar	Examineur
BADA Abdelmalek	MCA	Université d'Adrar	Invité

Année Universitaire : 2025/2026

Résumé

L'amélioration des caractéristiques des matériaux de construction écologiques, en particulier la brique de terre crue locale (Toub), les enduits et crépis naturels, ainsi que les systèmes d'étanchéité associés, constitue les objectifs principaux de cette thèse.

La présente recherche vise à perfectionner les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de la brique de terre crue afin d'augmenter sa durabilité et son efficacité énergétique. Les études approfondies portent également sur le développement des formulations optimales pour les enduits et crépis naturels, mettant en avant leur compatibilité avec la brique de terre crue. Parallèlement, cette thèse explore des méthodes novatrices pour renforcer les systèmes d'étanchéité, offrant des solutions durables et respectueuses de l'environnement. Nos recherches menées s'inscrivent dans une perspective globale de promotion de la construction écologique et de l'utilisation responsable des ressources locales.

Les résultats obtenus au cours de cette étude contribuent significativement au domaine de la construction durable.

Mots-clés : Brique, Terre crue, Durabilité, Efficacité énergétique, Construction, Enduits.

ملخص

يعد تحسين خصائص مواد البناء البيئية، وخاصة الطوب المحلي، الملاط الجبس الطبيعي، وكذلك أنظمة العزل المرتبطة بها، الأهداف الرئيسية لهذه الأطروحة.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للطوب الطيني الخام من أجل زيادة المتانة والكفاءة الطاقية. تشمل الدراسات المتعمقة أيضًا تطوير التركيبات المثلى للطلاءات والملاط الطبيعي، مع التركيز على توافقها مع الطوب الطيني. في الوقت نفسه، تستكشف هذه الأطروحة طرقًا مبتكرة لتعزيز أنظمة العزل، مقدمة حلولًا مستدامة وصديقة للبيئة. تندرج أبحاثنا التي أجريناها في إطار شامل يهدف إلى تعزيز البناء البيئي والاستخدام المسؤول للموارد المحلية.

تساهم النتائج التي تم الحصول عليها خلال هذه الدراسة بشكل كبير في مجال البناء المستدام.

الكلمات المفتاحية: طوب، طوب خام، استدامة، كفاءة الطاقة، البناء، التلبيس.

Abstract

The improvement of the characteristics of eco-friendly construction materials, particularly local raw-earth bricks (Toub), natural plasters and renders, as well as the associated waterproofing systems, constitutes the main objectives of this thesis.

The present research aims to enhance the physical, mechanical, and thermal properties of raw earth bricks to increase durability and energy efficiency. The in-depth studies also focus on the development of optimal formulations for natural plasters and renders, highlighting their compatibility with adobe bricks. At the same time, this thesis explores innovative methods to strengthen sealing systems, offering sustainable and environmentally friendly solutions, such as the use of bio-based materials and advanced sealing techniques that improve the longevity and performance of these systems. Our research is part of a global perspective promoting ecological construction and the responsible use of local resources.

The results obtained during this study significantly contribute to the field of sustainable construction.

Keywords: Brick, Raw earth, Sustainability, Energy efficiency, Construction, plasters.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon superviseur, Monsieur **Dr DJAFARI Driss**, de L'université d'Adrar, pour avoir accepté de superviser ce travail tout au long de ces cinq années de thèse et pour avoir partagé généreusement ses connaissances et son expertise. Son appui, son expertise, son zèle, sa disponibilité et sa perspicacité ont été d'une valeur inestimable pour moi.

J'adresse mes grands remerciements aux membres du jury de ma soutenance :

Pr. L. BENNACER (Univ-Adrar), président du jury, et **Dr. N. FEZZIOUI (Univ-Béchar)**, **Dr. M. AKACEM (Univ-Adrar)**, **Dr. A. BADA**, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements les plus grands aux membres du Laboratoire de Développement Durable et Informatique (LDDI) de l'université Ahmed Draia d'Adrar. Je voudrais remercier mes collègues,

Dr. Azzarih Amina, **Dr. Bekraoui Hafsa**, **Dr. Tahiri Fadila**, et **Lakrim Chahrazad**.

J'exprime toute ma gratitude à Mr. **Houtia**, ingénieur au laboratoire pédagogique de génie civil à l'Université d'Adrar, M. **Ishek**, et Mme **Mbarka**, ingénieur au laboratoire pédagogique de chimie à l'Université d'Adrar, Mr. **Bouafia** à LTPO, Dr. **BENIDIR Adel** du CNERIB.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous les superviseurs et les membres du personnel des laboratoires, qui ont contribué de manière directe ou indirecte à la progression et à la pérennité de cette étude de recherche :

- Laboratoire LTPS, unités de Ghardaïa et d'Adrar.
- Laboratoire LTPO, unités d'Adrar.
- Laboratoire de l'Université de Béchar.
- CNERIB d'Alger.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude la plus sincère envers mes parents, mon épouse bien-aimée, qui m'a soutenu dans la réalisation de cette thèse, mes enfants, ainsi que toute ma famille élargie, pour leur soutien infaillible, leur patience et leurs encouragements tout au long de ces années de recherche.

Dédicace

Je dédie cette thèse à :

L'âme pure de mon père

Ma chère mère, pour son amour, sa confiance et son soutien

Mon mari et mes enfants, source de mon bonheur

Toute ma famille

Tous mes amis

Table des matières

Résumé.....	II
ملخص.....	III
Abstract.....	IV
Remerciements.....	V
Dédicace.....	VI
Liste de Figures.....	XII
Liste de Tableaux.....	XV
Introduction générale.....	1
A/ Recherche bibliographique.....	4
Chapitre I : État de l’art et synthèse bibliographique.....	5
I.1 Introduction.....	6
I.2 Construction en terre en Algérie.....	6
I.2.1 Période précoloniale.....	6
I.2.2 Période coloniale.....	7
I.2.3 Post-coloniale.....	8
I.3 Diversité de la construction en terre.....	8
I.3.1 Construction en pisé.....	10
I.3.2 Construction en bauge.....	11
I.3.3 Construction en torchis.....	11
I.3.4 Construction en adobe.....	12
I.3.5 Construction de blocs de terre comprimés (BTC).....	12
I.4 Gisement d’argile dans la wilaya d’Adrar.....	13
I.5 Cas de Tamentit.....	14
I.5.1 Présentation générale du ksar.....	14
I.5.2 Aperçu historique.....	16
I.5.3 Aperçu géologique et climatique.....	16
I.5.4 Aperçu de construction.....	17
I.6 Avantages et limites de la construction en terre crue.....	20
I.7 Conclusion.....	22
Chapitre II : Améliorations des caractéristiques des briques en terre crue.....	23
II.1 Introduction.....	24
II.2 Présentations des matériaux.....	24
II.2.1 Adobe.....	24

Table des matières

II.2.2	L'Argile	25
II.2.3	Sable de dune	26
II.2.4	Ciment.....	27
II.2.5	Coquille d'arachide	28
II.2.6	Sciure de bois.....	30
II.2.7	Eau de gâchage	31
II.2.8	Bloc de terre crue (Adobe)	31
II.3	Stabilisation	34
II.3.1	Caractéristiques essentielles pour la stabilisation des sols	34
II.3.2	Principes et mécanismes de stabilisation	34
II.3.3	Stabilisation mécanique.....	34
II.3.4	Stabilisation physique	35
II.3.5	Stabilisation par cuisson	35
II.3.6	Stabilisation chimique.....	35
II.3.7	Mécanismes de stabilisation à la chaux.....	37
II.3.8	Stabilisation par incorporation des fibres.....	39
II.4	Enduit, crépis naturel et système d'étanchéité.....	40
II.4.1	Définition	40
II.4.2	Composition de l'enduit	40
II.4.3	Types d'argiles utilisées	40
II.4.4	Additives et améliorations.....	40
II.4.5	Propriété des enduits	41
II.4.6	Mise en Œuvre.....	41
II.4.7	Avantage des enduits.....	41
II.4.8	Inconvénient	41
II.5	Crépis naturels.....	42
II.5.1	Définition	42
II.5.2	Composition.....	42
II.5.3	Types de crépis naturels	42
II.5.4	Propriétés	42
II.5.5	Avantages.....	43
II.5.6	Inconvénients.....	43
II.6	Systèmes d'étanchéité adaptés à la construction en terre	43
II.6.1	Définition	43

Table des matières

II.6.2	Types des systèmes d'étanchéité.....	43
II.6.3	Propriétés des recherches	44
II.6.4	Mise en œuvre.....	44
II.6.5	Avantages.....	44
II.6.6	Inconvénients.....	44
II.7	Additives végétales.....	44
II.7.1	Définition	45
II.7.2	Classification des fibres végétales	45
II.7.3	L'utilisation des fibres dans la construction	46
II.8	Caractérisations mécaniques et thermiques.....	47
II.8.1	Caractérisations mécaniques.....	47
II.8.2	Caractérisations thermiques.....	49
II.9	Durabilité.....	52
II.9.1	Essais indirects.....	52
II.10	Conclusion.....	57
B/ EXPERIMENTATION		59
Chapitre III : Essais de caractérisations		60
III.1	Introduction	61
III.2	Essais d'identification des matériaux.....	61
III.2.1	Analyse chimique.....	61
III.2.2	Essai au bleu de méthylène [NF P94-068]	62
III.2.3	Diffraction des rayons X.....	62
III.2.4	Analyse granulométrique	63
III.2.5	Masse volumique.....	65
III.2.6	Équivalence du sable	66
III.2.7	Limites d'Atterberg	66
III.2.8	Absorption d'eau	67
III.3	Protocoles de préparation des coquilles d'arachide et sciure de bois.....	67
III.3.1	Coques d'arachide	67
III.3.2	Sciure de bois.....	67
III.4	Méthode de fabrication des éprouvettes normalisées (04×04×16) cm ³ et (05×05×05) cm ³ en BTS	68
III.4.1	Brique de terre crue recyclée	68
III.4.2	Brique de terre crue nouvelle (adobe)	69

Table des matières

III.5	Étude du comportement mécanique	71
III.5.1	Mesure du module d'élasticité par ultrasons	71
III.5.2	Résistance à la flexion	72
III.5.3	Résistance à la compression	73
III.6	Étude du comportement thermique	73
III.6.1	Conductivité thermique	73
III.7	Durabilité	74
III.7.1	Remontée d'eau par capillarité	74
III.7.2	Gel-dégel	75
III.7.3	Humidification (mouillage-séchage)	75
III.7.4	Attaque chimique (SDS)	76
III.7.5	Essai d'attaque de l'eau (H ₂ O)	76
III.8	Conclusions	77
Chapitre IV : Résultats et discussions		78
IV.1	Introduction	79
IV.2	Essais chimiques	79
IV.2.1	Analyse chimique	79
IV.2.2	Bleu méthylène	80
IV.3	Essais minéralogiques	80
IV.3.1	Diffraction des rayons X	80
IV.4	Essais physiques	82
IV.4.1	Analyse granulométrique	82
IV.4.2	Masses volumiques	83
IV.4.3	Essai d'équivalent de sable	84
IV.4.4	Limites d'Atterberg	84
IV.4.5	Absorption d'eau	84
IV.5	Caractérisation physique (Masse volumique)	85
IV.6	Caractérisation mécanique avant les essais de durabilité	87
IV.6.1	Mesure du module d'élasticité par ultrasons	87
IV.6.2	Essai de traction par flexion	88
IV.6.3	Essai de compression	89
IV.7	Caractérisation thermique	91
IV.7.1	Conductivité thermique	91
IV.7.2	Chaleur spécifique	92

Table des matières

IV.8	Caractérisation physique après 120 jours.....	93
IV.8.1	Remontée d'eau par capillarité	93
IV.9	Caractérisation mécanique après essais de durabilité.....	94
IV.9.1	Essai de gel-dégel.....	94
IV.9.2	Humidification (mouillage-séchage).....	97
IV.9.3	Attaque chimique	100
IV.9.4	Attaque d'eau	102
IV.10	Enduit, crépis naturel et système d'étanchéité	104
IV.11	Conclusion.....	106
Conclusion générale.....		108
Références bibliographies		111

Liste de Figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Ancien Hôpital d'Adrar – Touat	7
Figure I. 2 : Modes d'utilisation de la terre en construction	9
Figure I. 3 : (a) Superbe maison en pisé moderne en Chine, (b) Technique traditionnelle de pisé	9
Figure I. 4 : Technique traditionnelle de la bauge	11
Figure I. 5 : Technique traditionnelle (mur en Torchis)	11
Figure I. 6 : Technique traditionnelle de l'Adobe.	12
Figure I. 7 : (a) Mur en BTC, (b) BTC fabriqué à l'aide d'une presse manuelle	12
Figure I. 8 : Situation géographique d'Adrar	13
Figure I. 9 : Principaux bassins sédimentaires de la plate-forme saharienne en Algérie	14
Figure I. 10: Le ksar de Tamentit	15
Figure I. 11: Kasbah de Tamentit	14
Figure I. 12 : Classification climatique en Monde	17
Figure I. 13 : Brique d'adobe pendant le séchage	18
Figure I. 14 : Revêtement du mur	18
Figure I. 15 : Plafond	19
Figure I. 16 : Revêtement extérieur du mur	20
Figure I. 17 : Roue d'intérêts du matériau terre	20
Figure I. 18 : Cycle écologique durable de la construction en terre : du matériau naturel au recyclage intégral	21

Chapitre II

Figure.II. 1 : Site d'échantillonnage des sols, point de prélèvement	25
Figure. II. 2: Représentation des tétraèdres et des octaèdres	26
Figure. II. 3: Argile d'Adrar	26
Figure. II. 4: Sable de dunes	27
Figure.II. 5: Image MEB de coques d'arachide : (a) bordure ; (b) surface intérieure ; (c) surface extérieure	28
Figure.II. 6: Production mondiale d'arachides en 2020 et principaux pays producteurs (en millions de tonnes métriques)	29
Figure.II. 7 : Coquille d'arachide	30
Figure.II. 8: Sciure de bois	31
Figure.II. 9: (a) Démoulage des briques de terre, (b) Séchage des briques de terre	33
Figure.II. 10: Stockage des briques de terre	33
Figure.II. 11: Cycle de la chaux(Internet, 2026)	37
Figure.II. 12 : (a) Bitume naturel, (b) Ciment poudre et (c) Poudre de chaux	38
Figure.II. 13: Différents liants hydrauliques de stabilisation	39
Figure.II. 14: Les différentes formes de fibres	45
Figure.II. 15: Classification des fibres végétales	46
Figure.II. 16 : Appareil Ct-mètre	51
Figure. II. 17 : Test d'absorption de surface	53
Figure.II. 18 : Test d'abrasion à la brosse métallique	54

Figure.II. 19 : Essai d'érosion accélérée.....	55
--	----

Chapitre III

Figure. III. 1 : Essai de bleu de méthylène	62
Figure. III. 2: Machine de Diffraction des Rayons X.....	62
Figure. III. 3 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.	63
Figure. III. 4 : Appareillages de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.....	63
Figure. III. 5 : Essai pour déterminer la masse volumique apparente.....	65
Figure. III. 6 : Essai pour déterminer la masse volumique absolue	65
Figure. III. 7 : Essai d'équivalent de sable (sable de dunes + sol).....	66
Figure. III. 8 : Essais de limites d'Atterberg.....	66
Figure. III. 9 : Présentation des limites d'Atterberg	66
Figure. III. 10 : Étapes préparations des coquilles d'arachides et sciure de bois.....	68
Figure. III. 11 : Malaxage à sec de la terre avec le stabilisant	70
Figure. III. 12 : Ajout des additives au mélange et à l'eau optimal.....	70
Figure. III. 13 : Moules destinés (a) aux essais mécaniques, (b) à l'essai thermique.....	70
Figure. III. 14 : Démoulage et séchage.....	71
Figure. III. 15 : Stockage des éprouvettes	71
Figure. III. 16 : Essais ultrasoniques	72
Figure. III. 17 : Essai de traction par flexion à trois points.	72
Figure. III. 18 : Essai de compression sur les demi-prismes de la flexion.....	73
Figure. III. 19 : Appareil Ct-mètre.....	74
Figure. III. 20 : Essai remontée d'eau par capillarité.....	75
Figure. III. 21 : Conduite de l'essai de gel-dégel.....	75
Figure. III. 22 : Conduite de l'essai d'humification-séchage.....	76
Figure. III. 23 : Éprouvettes immergées dans la solution de Na_2SO_4	76
Figure. III. 24 : Éprouvettes immergées dans la solution de H_2O	77

Chapitre IV

Figure. IV. 1 : Spectrographe de diffraction des rayons X (DRX) du sol, accompagné de l'identification des minéraux constitutifs.....	80
Figure. IV. 8 : Résistance à la traction par flexion trois points après 28 jours	88
Figure. IV. 9: Résistance à la compression après 28 jours	90
Figure. IV. 10: Conductivité thermique en W/m. K	91
Figure. IV. 11 : Chaleur spécifique en kJ/m^3 . K	93
Figure IV. 12: Masse d'eau d'absorption	94
Figure IV. 13: Délitement des éprouvettes de béton de terre non stabilisé après l'immersion dans l'eau	94
Figure. IV. 14: Résistance à la traction avant et après l'essai de gel-dégel.....	96
Figure. IV. 15: Résistance à la compression avant et après l'essai de gel-dégel.....	97
Figure. IV. 16 : Résistance à la traction avant et après l'essai de mouillage/séchage.....	98
Figure. IV. 17 : Résistance à la compression avant et après l'essai de mouillage/séchage.....	99
Figure. IV. 18 État des échantillons de nouveaux types de briques à base de toub recyclée et d'argile et de sable de dune après l'essai d'attaque chimique de Na_2SO_4	99
Figure. IV. 19 : Résistance à la traction avant et après l'essai d'attaque chimique.....	100

Liste de Figures

Figure. IV. 20 : Résistance à la compression avant et après l'essai d'attaque chimique.....	101
Figure. IV. 21 : Résistance à la traction avant et après l'essai d'attaque d'eau.....	103
Figure. IV. 22 : Résistance à la compression avant et après l'essai d'attaque d'eau.....	104
Figure. IV. 23 : État des échantillons de nouveaux types de briques à base de toub recyclée et d'argile et de sable de dune après l'essai d'attaque d'eau H ₂ O	104

Liste de Tableaux

Chapitre I

Tableau. I. 1 : Avantages et inconvénients de la construction en terre	22
--	----

Chapitre II

Tableau. II. 1: Composition chimique.	27
Tableau. II. 2: Composition minéralogique du clinker (Bouge).	27
Tableau. II. 3 : Analyse physique du ciment.....	27
Tableau. II. 4: Résistance à la compression	28
Tableau.II. 5 : Composition chimique des poudres de coquille d'arachide	30
Tableau.II. 6 : Compositions minérales d'eau potable d'Adrar	31
Tableau.II. 7: Critères réglementaires associés à la résistance à la traction.....	49
Tableau. II. 8: Synthèse bibliographique sur l'amélioration des comportements des briques de terre crue	56

Chapitre III

Tableau. III. 1 : Formulation des briques de terre crue recyclée	69
Tableau. III. 2 : Brique de terre crue nouvelle (Adobe).....	69

Chapitre IV

Tableau. IV. 1 : Analyse chimique de la terre du KsarTamentit.....	79
Tableau. IV. 2 : Paramètres de la granulométrie de la terre du Ksar Tamantit.....	83
Tableau. IV. 3 : Résultats de la masse volumique apparente et absolue.....	83
Tableau. IV. 4 : <i>Résultats de l'essai d'équivalent de sable.</i>	84
Tableau. IV. 5 : Paramètres définis de l'état de consistance d'Adobe.	84
Tableau. IV. 6 : Résultats de la masse volumique en $[g/m^3]$	87
Tableau. IV. 7 : Résultats de l'essai de traction après 28 jours	89
Tableau. IV. 8 : Résultats de l'essai de compression simple après 28 jours.....	91
Tableau. IV. 9 : Résultats de l'essai de traction après l'essai de gel-dégel	95
Tableau. IV. 10 : Résultats de compression après l'essai de gel-dégel	96

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
A	Diffusivité thermique	m^2/s
A	Section transversale de l'éprouvette	m^2
c	Capacité thermique massique	$J/kg \cdot K$
C	Capacité thermique volumique	$J/m^3 \cdot K$
F_d	Résistance à la flexion	MPa
σ_c	Résistance à la compression	MPa
E	Effusivité thermique	$J \cdot K^{-1} \cdot m^2 \cdot s^{-1/2}$
E	Module d'élasticité	GPa
R	Résistance thermique	K/W
R_D	Résistance à la diffusion	K/W
S	Surface de l'éprouvette	m^2
V_p	Vitesse de propagation du son	Km/s

Abréviations

Notation	Signification
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
CNEREB	Centre national d'études et de recherches intégrées en bâtiment
DTR	Document réglementation thermique
LTPO	Laboratoire de travaux publics Ouste
LTPS	Laboratoire de travaux publics Sud
SDS	Solution de concentration de 2 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4)

FORMULATIONS

A	Argile + Sable de dune
AC	M1 = Argile + Sable de dune plus 10% de ciment blanc.
ACS_α	M1 + Sciure de bois fine ($\alpha = 5\%$ et $\alpha = 10\%$).
ACC_β	M1 + Coque d'arachide fine ($\beta = 5\%$ et $\beta = 10\%$).
$ACC_{\alpha\beta}$	M1 + α % coque d'arachide fine + β % sciure de bois fine ($\alpha = 2,5$ et $\beta = 2,5$) ; ($\alpha = 5$ et $\beta = 5$).
$ACC\alpha S^F_\beta$	M1 + α % Coque d'arachide fine + β % Sciure de bois fibre ($\alpha = 2,5$ et $\beta = 2,5$) ; ($\alpha = 5$ et $\beta = 5$).
T	Terre seule
TC	M2 = Terre stabilisée plus 10% de ciment blanc.
TCS_α	M2 + Sciure de bois comme fine ($\alpha = 5\%$ et $\alpha = 10\%$)

Nomenclature

TCC_{β}	M2 + Coque d'arachide comme fine ($\beta = 5\%$ et $\beta = 10\%$).
$TCC_{\alpha\beta}$	M2 + α % Coque d'arachide fine et β % Sciure de bois fine ($\alpha = 2,5$ et $\beta = 2,5$) ; ($\alpha = 5$ et $\beta = 5$).
$TCC\alpha S^F_{\beta}$	M2 + α % Coque d'arachide fine + β % Sciure de bois fibre ($\alpha = 2,5$ et $\beta = 2,5$) ; ($\alpha = 5$ et $\beta = 5$).

Introduction générale

Face aux défis environnementaux actuels, notamment la réduction des émissions de carbone (Seevaratnam et al., 2020), La préservation des ressources naturelles et l'adaptation des bâtiments aux conditions climatiques extrêmes, la construction en terre crue s'impose comme un champ de recherche stratégique dans le domaine du génie civil et de l'architecture durable. Matériau ancestral largement répandu dans les civilisations (Yogananth et al., 2019), La terre crue présente des qualités environnementales remarquables, telles qu'un faible coût énergétique (Shukla et al., 2009), une recyclabilité quasi-totale (Calatan et al., 2017) et une forte inertie thermique, ce qui la rend particulièrement adaptée aux climats arides et semi-arides.

En Algérie, et plus particulièrement dans les régions sahariennes, la construction en terre constitue un héritage architectural et technique majeur. Les ksour et les habitats vernaculaires, comme ceux du ksar de Taghit, et Knadsa à Béchar (Assia et al., 2019; Idder et al., 2020; Rabiâ, 2019), et de Tamantit à Adrar (Abdelkader et al., 2024), illustrent une maîtrise empirique des propriétés hygrothermiques et mécaniques de la terre. Toutefois, la transposition de ces techniques traditionnelles dans un contexte de construction contemporaine se heurte à des limites structurelles, normatives et de durabilité, notamment en ce qui concerne la résistance mécanique, la sensibilité à l'eau et la variabilité des matériaux naturels.

Dans ce cadre, la recherche scientifique s'oriente vers l'optimisation des matériaux en terre crue par des approches de stabilisation physico-chimique, l'incorporation de fibres naturelles (Akhzeroun et al., 2023) (Echeverría-Maggi et al., 2022 ; Mostafa et al., 2016) ou de sous-produits locaux (Costi de Castrillo et al., 2021), ainsi que par une meilleure compréhension du comportement mécanique et hygrothermique des briques en terre. Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique et vise à analyser en profondeur le potentiel des matériaux locaux de la région d'Adrar pour la production de briques en terre crue améliorées, adaptées aux exigences contemporaines de durabilité et de performance.

L'objectif principal de cette thèse est d'établir une corrélation entre la composition des matériaux, les procédés de fabrication et les performances mécaniques, thermiques et hydriques des briques en terre crue. L'approche adoptée repose sur une démarche expérimentale rigoureuse, complétée par une analyse critique des résultats obtenus au regard des travaux existants.

La thèse est organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre propose une synthèse critique de l'état de l'art sur la construction en terre crue et l'optimisation des matériaux.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériaux constitutifs et aux stratégies d'amélioration des briques. Le troisième chapitre détaille la méthodologie expérimentale et les protocoles d'essais mis en œuvre. Enfin, le quatrième chapitre présente l'analyse approfondie des résultats expérimentaux, suivie d'une discussion générale permettant de dégager les apports scientifiques et les perspectives de recherche.

A/ Recherche bibliographique

Chapitre I : État de l'art et synthèse bibliographique

I.1 Introduction

La construction en terre constitue l'une des formes les plus anciennes de l'architecture humaine, utilisée depuis des millénaires dans de nombreuses régions du monde en raison de la disponibilité locale des matériaux et leur adaptation aux conditions climatiques spécifiques. En Algérie, particulièrement dans les zones sahariennes et semi-arides, la terre crue a historiquement servi à l'édification de logements, de ksour et d'ouvrages traditionnels, en s'inscrivant dans un contexte culturel et environnemental bien particulier.

Ce chapitre vise à présenter l'état de l'art des techniques de construction en terre, en mettant en lumière la diversité des procédés (pisé, bauge, torchis, adobe, blocs de terre comprimés) ainsi que leurs caractéristiques spécifiques. Il inclut également une synthèse bibliographique sur les gisements d'argile présents dans la wilaya d'Adrar, notamment autour de Tamantit, qui représentent des ressources essentielles pour l'approvisionnement en matériaux de construction locale. Enfin, cette revue critique expose les principaux avantages et limites liés à l'usage de la terre crue comme matériau de construction, tant sur les plans techniques, environnementaux qu'économiques.

I.2 Construction en terre en Algérie

I.2.1 Période précoloniale

L'architecture de terre en Algérie n'a pas encore bénéficié d'un inventaire exhaustif visant à établir avec précision son ancienneté, son importance et l'origine des techniques actuellement employées. Ce sujet, à l'instar de l'ensemble de l'histoire algérienne précoloniale, constitue une énigme, voire une approximation, pour de nombreux Algériens [(Lesbet, 1985). Pour les périodes romaines, vandales et byzantines en Algérie, l'emploi de la pierre se révèle prédominant. Néanmoins, de nombreux historiens, tels que ceux cités par (Bourouiba, 1983), font état de la présence de constructions militaires, de fortifications et de remparts urbains érigés en terre crue et remontant à la période médiévale. « Al-Muqaddasi indique que Marsâ'L-Dadjadj (port aux poules) est une cité côtière dont les habitants construisent des édifices en briques crues. » (Bourouiba, 1983) S'agissant du port de Qaṣr al Fulus et de la ville de Ténès, construite lors de la conquête arabe antérieure au Xe siècle, les historiens relèvent l'emploi des techniques de construction en pisé, en brique crue et en torchis dans l'édification de plusieurs remparts importants.

Il convient de retenir, malgré la rareté de la documentation, que les constructions en terre crue en Algérie datent au moins de la conquête arabe. De plus, il faut remarquer que l'utilisation de ce matériau s'est étendue même aux villes côtières. Dans les médinas de l'époque turque, la brique de boue a côtoyé la pierre. L'architecture traditionnelle ne se limite pas à une organisation et une pratique de l'espace traditionnelles, mais se base également sur des techniques de construction traditionnelles avec l'utilisation des matériaux locaux. L'habitat traditionnel algérien offre autant de variétés architecturales que de techniques de construction. Ainsi, dans l'habitat kabyle réputé pour l'emploi de la pierre avec ou sans mortier, le pisé est utilisé par les familles les moins aisées. Au M'zab, c'est le toub qui remplace parfois la pierre pour la réalisation des murs. Les Touaregs du Hoggar sont passés

de la tente à la zriba (hutte couverte d'herbes sèches) puis ils ont construit des maisons en toub pour se sédentariser (Madaci, 2013).

I.2.2 Période coloniale

L'occupation française s'était surtout concentrée sur la partie nord du pays. Les grandes villes comme celles d'importance moyenne qui ont connu des interventions à la "Hausmannienne", ont presque toutes été édifiées en matériaux lourds : béton ou pierre. Cependant, certains villages à vocation agricole furent bâtis en pisé par les colons. Un grand nombre de petites villes et villages éparpillés dans les wilayas de Mila, Constantine et Jijel témoignent encore de ce choix. Lors de nos enquêtes de prospection, nous avons eu l'occasion de visiter certains d'entre eux. Quant au sud du pays, où la tradition de la construction en terre semble ancrée, la colonisation française a marqué sa domination par l'architecture de terre, avec l'édification en pisé durant les années 1920-1930, de multiples forts et villes de garnison (CRATerre, 1986). Les réalisations civiles y étaient moins importantes, mais quelques-unes sont considérées parmi les plus intéressantes de l'époque en Afrique : "Le plus spectaculaire et le plus innovant de ces accomplissements demeure l'hôpital régional édifié en pisé et en adobe dès 1943 à Adrar (CRATerre, 1986). D'autres constructions, utilisant des techniques et des matériaux locaux, ont été réalisées à cette époque. Nous citons les exemples de Bordj - édifice à vocation évangélique - construit en 1910 à Tamanrasset, la porte d'accès à la nouvelle ville de Timimoun édifiée vers 1930 et l'hôtel de l'oasis Rouge réalisé la même année. Cependant, rien ne laisse croire qu'il ait eu une réelle volonté de prise en charge de l'architecture de terre par les autorités occupantes en Algérie. Certes, la politique colonialiste en Algérie dépasse le cadre de notre recherche. Néanmoins, on peut déduire que la promotion ou le renouveau des traditions, qu'elles soient constructives ou autres, ne pouvait s'inscrire dans la logique de l'occupation. La population autochtone, marginalisée et mise au service des colons, a été, de ce fait, écartée d'une participation conséquente à la production de l'espace. Celui-ci devient le reflet des intentions d'implantation d'une société étrangère au détriment des valeurs locales. C'est ce qui pourrait expliquer la stagnation des méthodes de construction en terre crue dans notre pays. L'isolement et l'appauvrissement des populations se sont traduits par la construction de maisons ou gourbis à l'image de leur situation socio-économique (Madaci, 2013).



Figure I. 1 : Ancien Hôpital d'Adrar – Touat (H Abdne, 2007)

I.2.3 Post-coloniale

Si bien qu'à l'aube de l'indépendance, les responsables et les particuliers furent séduits par le matériau importé par la société "civilisée" : le béton. En milieu urbain, toutes les constructions étaient réalisées en béton. En milieu rural, le lancement des mille villages agricoles sera l'occasion d'un retour timide vers les matériaux locaux. La première expérience fut le village socialiste de Mostefa Ben-Brahim à 30 km de Sidi Bel Abbès. Sur les deux cent vingt-deux (222) logements prévus, trente devaient être réalisés en béton de terre stabilisée. L'étude, confiée à une équipe franco-belge, s'est soldée par la production d'une architecture non adaptée au mode de vie des paysans. De plus, elle n'offrait aucun avantage technique ou économique. Le projet a nécessité l'utilisation de quantités trop importantes de ciment : fondation en semelle élargie en béton armé ; soubassement en béton maigre hydrofugé ; chaînage en béton armé ; dalle en béton armé ; et les murs porteurs ont été réalisés en pisé stabilisé au ciment avec des épaisseurs de 40 cm pour le rez-de-chaussée et 30 cm pour l'étage. Cette même équipe a été chargée en 1972 de la réalisation d'un groupe d'habitations rurales à Zéralda. Si les intentions de ces architectes étaient de chercher "à moderniser l'image traditionnelle du pisé et lui conférer une connotation similaire à l'apparence du béton" (CRATerre, 1986), dans la pratique le résultat n'était qu'une autre manière de construction en béton. La construction du village agricole d'El Mâadher, près de M'sila, fut confiée aux frères Miniawy, architectes égyptiens disciples de H Fathy. Cette autre tentative du renouveau de l'architecture de terre ne fut pas plus concluante que ses précédentes. "Les futurs attributaires signalent déjà l'affaissement des maisons d'El Mâadher et de Débila proche. d'El Oued", écrit Sid Boubekur (Madaci, 2013) .

Ces expériences furent suivies de décisions politiques visant à encourager l'emploi des matériaux locaux dont le béton de terre stabilisée. L'instruction du 05 février 1985 du ministère de l'intérieur et des collectivités locales spécifiait l'intérêt de l'utilisation de ces matériaux et stipulait que « 30% des constructions devaient être édifiées en matériaux locaux, le seront en B.T.S. » (JORA, 2014). L'action sera suivie en novembre 1986, par d'importantes décisions du conseil des ministres pour pallier l'importation croissante et onéreuse des matériaux de construction : « Tous ces matériaux coûtent cher, surtout quand ils sont payables en devises. Pour toutes ces considérations, il a été programmé la réalisation à fin 1989 de 32 000 logements en matériaux locaux BTS et Pierre Calcaire Reconstituée (P C R). A cet effet, il a été prévu l'importation d'unités industrielles pour la production d'éléments de construction en matériaux locaux. Mais — crise économique oblige — cette opération, dont le coût est très élevé, n'a pas été entièrement concrétisée⁵ ». Depuis, ces initiatives ont été interrompues. Ce que l'on peut retenir de l'expérience algérienne, c'est qu'il n'a jamais été question d'impliquer les spécialistes nationaux ; architectes ou artisans (Madaci, 2013) .

I.3 Diversité de la construction en terre

Au niveau du patrimoine architectural mondial, les techniques de construction en terre crue se caractérisent par une diversité exceptionnelle de méthodes, déclinées en un grand nombre de variantes. Ces ajustements résultent conjointement des propriétés géotechniques des sols exploités et du degré de compétence technique des constructeurs, illustrant de ce fait les contextes culturels ainsi que les particularités territoriales.

D'après la classification élaborée par le groupe CRAterre et résumée sous la forme d'un disque en 1986 (figure I.1), douze modes d'emploi principaux de la terre en construction ont été recensés (H Houben et al., 2006):

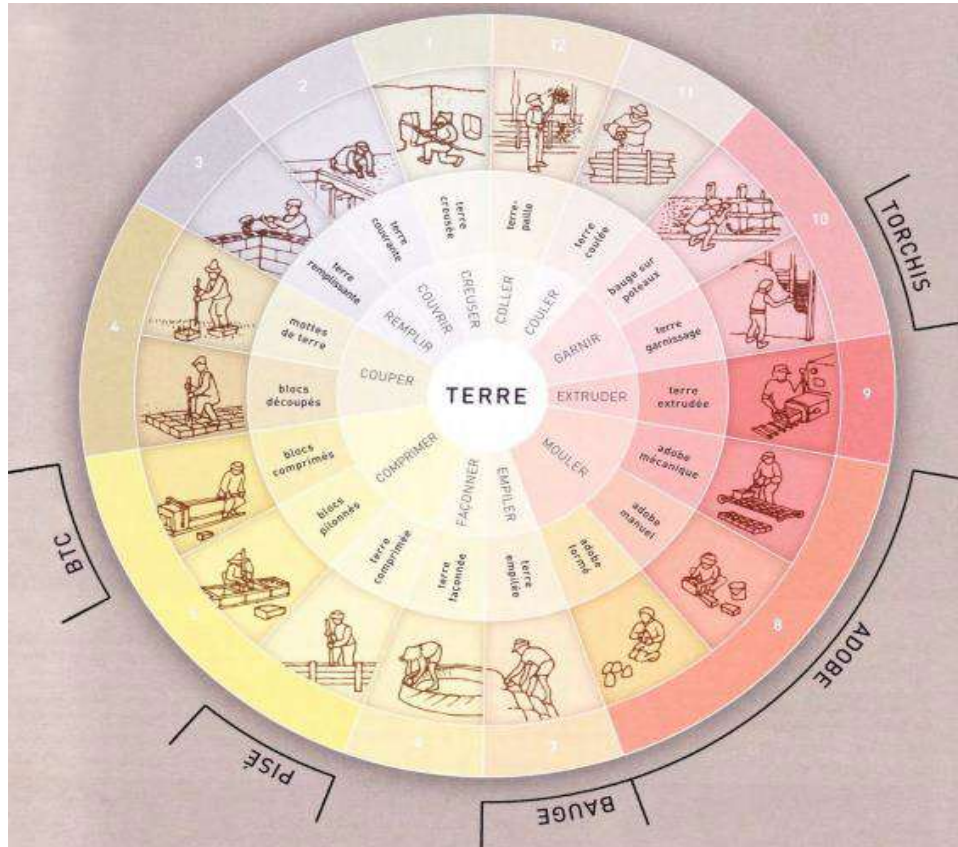


Figure I. 2 : Modes d'utilisation de la terre en construction (CRAterre)

Voici une reformulation scientifique permettant d'éviter toute similitude textuelle tout en conservant le contenu technique :

1. Terre excavée : l'espace habitable est aménagé par un creusement direct dans le sol naturel, ce qui donne naissance à des formes d'architecture troglodytique.
2. Terre de recouvrement : la terre est utilisée comme matériau de couverture ou de protection d'une ossature réalisée avec un autre matériau porteur.
3. Terre de remplissage : la terre est insérée à l'intérieur d'une structure creuse servant d'enveloppe ou de coffrage permanent.
4. Terre découpée en blocs : des éléments constructifs sont prélevés directement dans la masse du terrain sous forme de blocs taillés.
5. Terre compactée : le matériau est densifié par compression dans des moules ou des coffrages pour produire des éléments structuraux.
6. Terre modelée : à l'état plastique, la terre est façonnée manuellement pour constituer des parois généralement d'épaisseur faible.

7. Terre montée par empilement : des masses ou des mottes de terre sont superposées pour former des murs épais.
8. Terre moulée : la terre est mise en forme, manuellement ou à l'aide de moules, afin d'obtenir des éléments aux géométries variées.
9. Terre extrudée : le matériau est mis en œuvre par extrusion mécanique à travers un dispositif adapté.
10. Terre coulée : la terre, à consistance fluide, est versée dans des coffrages ou des moules selon un principe comparable à celui du béton.
11. Terre allégée aux fibres (terre-paille) : une barbotine argileuse enrobe des fibres végétales afin de former un composite léger à vocation isolante.
12. Terre de garnissage : un mélange terre-fibres est appliqué en couche mince pour remplir ou enduire un support existant.

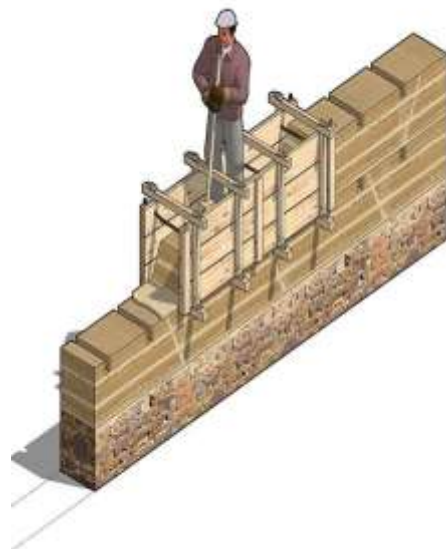
Parmi cet ensemble, cinq procédés se distinguent par leur fréquence d'emploi et constituent les principales familles techniques de la construction en terre.

I.3.1 Construction en pisé

Le matériau employé pour cette méthode est une terre sableuse faiblement argileuse ; il arrivait que des cailloux et du gravier y soient incorporés, ce qui augmentait granulométrie et garantissait une cohésion accrue. Le matériau terreux est mis en œuvre par compactage successif à l'aide d'un pilon, à l'intérieur de coffrages (banches). Le dégagement s'effectue par strates superposées, chaque levée étant réalisée avant le déplacement du coffrage vers la section suivante. Dans les pratiques traditionnelles, ces instruments étaient généralement fabriqués en bois (H Houben et al., 2006).



(a)



(b)

Figure I. 3 : (a) Superbe maison en pisé moderne en Chine, (b) Technique traditionnelle de pisé (H Houben et al., 2006)

I.3.2 Construction en bauge

Cette technique repose sur l'accumulation progressive de mottes ou de masses de terre, lesquelles sont ensuite compactées légèrement, soit par intervention manuelle, soit par piétinement, dans le but de former des parois continues et homogènes. En règle générale, le matériau est consolidé par l'incorporation de fibres végétales ou organiques provenant de sources variées afin d'optimiser sa cohésion et ses caractéristiques mécaniques [Houben, 2006].



Figure I. 4 : Technique traditionnelle de la bauge(Ngo, 2017)

I.3.3 Construction en torchis

Cette méthode constructive repose sur une charpente en bois constituée de montants et de treillis, dont les interstices sont comblés par un mélange argileux appliqué en une ou plusieurs couches. La matrice argileuse, habituellement consolidée par l'incorporation de paille ou d'autres fibres végétales, constitue ainsi les parois de l'édifice (H Houben et al., 2006).



Figure I. 5 : Technique traditionnelle (mur en Torchis)(Ngo, 2017)

I.3.4 Construction en adobe

L'adobe — désigné sous le terme de banco au Mali — désigne un procédé ancestral de fabrication de briques en terre crue, traditionnellement moulées à la main et susceptibles d'être ornées. Il s'agit d'un amalgame de terre à prédominance argileuse, d'eau et de fibres végétales (principalement de la paille), minutieusement malaxé puis façonné dans des moules en bois. Les matériaux ainsi obtenus sont ensuite séchés à l'air libre, le plus souvent sous l'influence solaire, avant leur utilisation (H Houben et al., 2006).



Figure I. 6 : Technique traditionnelle de l'Adobe(Hibouche, 2013).

I.3.5 Construction de blocs de terre comprimés (BTC)

Les blocs de terre comprimée sont introduits dans un moule puis pressés selon une méthode traditionnelle ; ces blocs étaient façonnés dans un moule en bois avant d'être compressés par battage ou par la chute d'un couvercle très lourd. À ce jour, la technique a été optimisée en termes de compression et d'efficacité grâce à la mécanisation. On emploie alors soit des presses manuelles dotées d'un bras de levier conséquent permettant le déplacement de plateaux comprimant le sol, soit des presses hydrauliques.(H Houben et al., 2006).



(a)



(b)

Figure I. 7 :(a) Mur en BTC, (b) BTC fabriqué à l'aide d'une presse manuelle(H Houben et al., 2006)

I.4 Gisement d'argile dans la wilaya d'Adrar

La wilaya d'Adrar, située à l'extrême sud-ouest de l'Algérie (figure 1.8), constitue une région frontalière et occupe le premier rang dans le découpage administratif national en termes de numérotation. Son territoire est dominé par un climat saharien marqué, caractérisé par une aridité prononcée. Le paysage est majoritairement composé d'étendues sableuses, avec, dans sa partie septentrionale, des plateaux rocheux et stériles désignés sous le nom de Hamada.

Le tissu territorial présente un caractère à la fois urbain et rural. En raison de l'immensité de sa superficie, la densité démographique demeure faible, avoisinant 0,7 habitant par km². La wilaya regroupe notamment les centres urbains d'Adrar, Reggane, Tsabit, Zaouïa Kounta, Tamantit et Fenoughil. Elle compte environ 441 800 habitants, répartis administrativement en 11 daïras, 28 communes et près de 330 ksour.

Elle se trouve à environ 1500 km de la capitale, et cette région comprend nombre d'oasis, de villes et de ksour. Plus de 350 oasis disséminées sur les sables du désert sont semblables à un archipel dans les mers. Cette région représente une extension naturelle du Sahara de Tanzroft vers le nord. La zone se termine par trois vallées qui s'y déversaient pour alimenter les foggaras et les puits d'eau, ce qui donnait vie à cette partie du désert. Ces vallées sont l'Oued Maqedoun, qui se termine dans la région d'Al-Gourara, puis l'Oued Massoud, qui se termine dans la région de Touat, et le troisième Wadi Qaribet, qui se termine dans la région de Tidikelt. Les habitants sont connus pour leurs méthodes d'exploitation et de préservation des eaux souterraines, dont la plus importante est le Foggara.

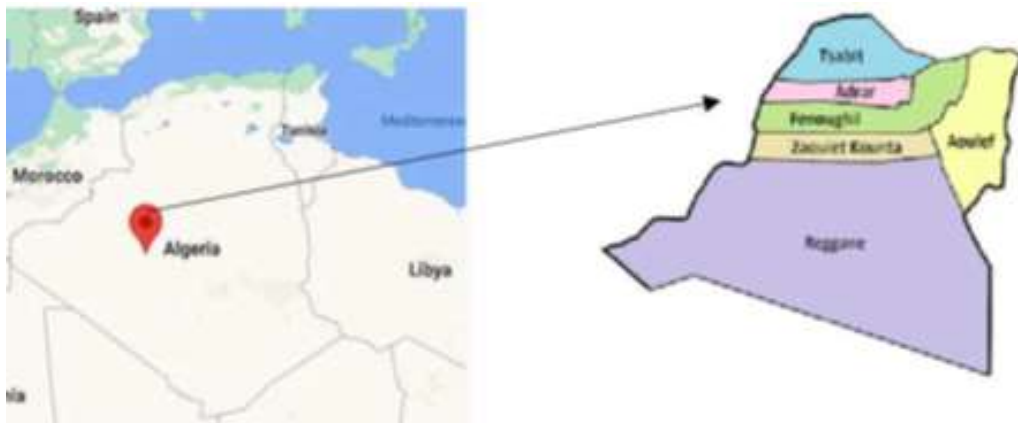


Figure I. 8 : Situation géographique d'Adrar (Google, 2026)

Il a été recensé. Onze gisements et indices d'argiles dans la région de Touat ont été identifiés : Adrar (situé au nord d'Adrar, à environ 1,5 km à l'est de la route nationale n° 6 menant vers Béchar), Zaouit Kounta, Raggane, Tsabit, Fenoughil, Tamentit, Mraggan, Bouda, Sbaa, Noum Annase et Tidmayan.

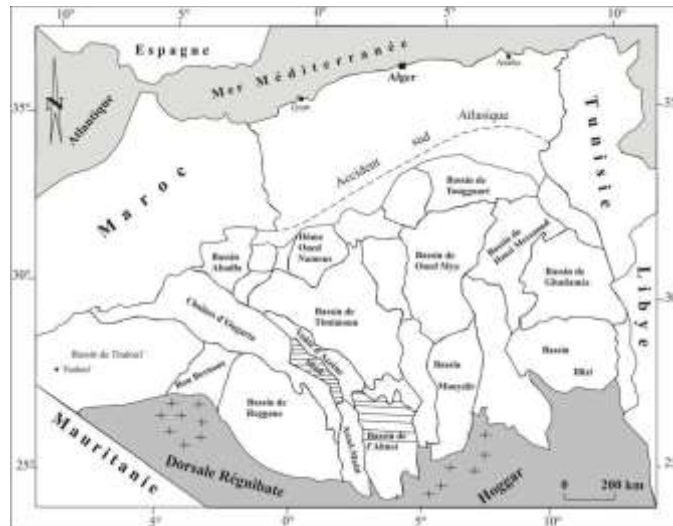


Figure I. 9 : Principaux bassins sédimentaires de la plate-forme saharienne en Algérie (carte SONATRACH, Division Exploration).

Les puits sont excavés collectivement par les habitants du Ksar, qui se répartissent ensuite l'eau en fonction de leur contribution. L'unité de mesure de l'eau est le carat. À la suite de l'évolution technologique et de l'initiation du forage de puits artésiens, la fonction de la Foggara a été réduite, ainsi que l'intérêt porté à sa restauration.

La région d'Adrar comprend plus de 294 ksars en terre. Nous avons sélectionné, comme objet d'étude dans notre thèse, d'anciens édifices architecturaux réalisés en adobe, désignés sous le nom de Ksar Tamentit.

I.5 Cas de Tamentit

I.5.1 Présentation générale du ksar

Le Ksar de Tamentit est considéré comme l'un des ensembles ksouriens les plus anciens de la région du Touat. Il occupe une position stratégique sur l'axe de circulation reliant les ksour septentrionaux et méridionaux. Localisé aux coordonnées 27°45'52'' de latitude et 15°53'15'' de longitude, à une altitude moyenne de 240 m, il s'inscrit au cœur d'une palmeraie étendue. L'ensemble couvre une superficie d'environ 18 hectares et regroupe près de 400 habitations familiales.

La commune de Tamentit, située à environ 12 km au sud de la ville d'Adrar, constitue aujourd'hui l'une des entités territoriales majeures de la wilaya, en raison de la richesse de son patrimoine urbain historique. Elle est délimitée au nord par les communes d'Adrar et Sebaa, au sud par Fenoughil, à l'est par Augrout et Timagatin, et à l'ouest par Bouda. Cette implantation territoriale est étroitement liée aux contraintes et aux logiques du système d'irrigation traditionnel par foggara, qui a favorisé une sédentarisation durable des populations locales.

Les recherches historiques indiquent que l'occupation du site remonte à des périodes très anciennes, jusqu'à la préhistoire (Adam et al., 2001; Hadiri et al., 2007; Maini, 2005), ce qui a

conduit à son classement en tant que monument historique national en 1988. La population actuelle de la commune est estimée à environ 8750 habitants.



Figure I. 10: Le ksar de Tamentit.

Le ksar se compose de plusieurs entités fortifiées (kasbahs), parmi lesquelles figurent notamment : Kasbah Tahiqah, Kasbah d'Ouled Ali Ben Moussa, Kasbah de Tofaghi, Kasbah d'Ouled M'hamed, Kasbah d'Ouled Daoud, Kasbah Taylot, Kasbah d'Ouled Ihali, Kasbah d'Ouled Yacoub et Kasbah de Bou Salah. Ces unités présentent des caractéristiques morphologiques communes, dont des habitations, une mosquée, des remparts, des tours de guet, ainsi qu'un réseau dense de ruelles et de passages couverts.

Le dispositif défensif du ksar comprend un fossé périphérique, désigné localement sous le terme « Ahfir », destiné à renforcer la protection contre les agressions extérieures. Chaque kasbah est également dotée d'un puits assurant l'approvisionnement en eau en cas de siège. L'accès principal est contrôlé par une porte en bois massif équipée d'un système de verrouillage traditionnel appelé « Afkir ».

D'un point de vue topographique, les kasbahs sont édifiées sur des reliefs rocheux surélevés, permettant à la fois une surveillance optimale et une protection contre les risques d'inondation liés aux crues et aux eaux pluviales (Figure. I.11).



Figure I. 11 : Kasbah de Tamentit

L'organisation spatiale de l'habitat reflète fortement les dimensions sociales, culturelles et religieuses de la communauté. Les habitations traditionnelles se développent généralement sur trois niveaux : une cave (dans certains cas), un rez-de-chaussée et une terrasse. Les espaces inférieurs assurent des fonctions mixtes (diurnes et nocturnes en hiver, principalement diurnes en été), tandis que la terrasse sert d'espace de repos nocturne en été.

La distribution intérieure s'articule autour d'un espace d'entrée ouvrant sur un séjour relativement spacieux, prolongé par un hall central autour duquel s'organisent deux ou trois pièces à ouvertures réduites. Une pièce supplémentaire peut être réservée au stockage, en fonction des besoins domestiques.

I.5.2 Aperçu historique

Tamentit, souvent qualifiée de « cité du désert » ou encore de « capitale historique du Touat », témoigne d'un héritage historique particulièrement riche et stratifié. L'évolution historique de la région peut être structurée en trois grandes phases distinctes.

La première période s'étend de la protohistoire jusqu'aux alentours de l'an 100 après J.-C. et correspond à l'occupation par des populations berbères, notamment les Gétules. La deuxième phase, dite hébraïque, se situe entre 100 et 600 après J.-C. et se caractérise par l'installation de communautés juives ayant joué un rôle notable dans le développement économique et culturel de l'oasis. La troisième période débute avec l'islamisation de la région, marquée par l'arrivée des premiers musulmans, et se prolonge jusqu'à l'époque de la dynastie saadienne à la fin du XVI^e siècle.

Grâce à sa position géographique, Tamentit s'est imposée comme un carrefour majeur du commerce caravanier transsaharien, atteignant son apogée entre les XIII^e et XV^e siècles. Toutefois, à partir du XVI^e siècle, la région amorce un déclin progressif, accentué par les mutations des routes commerciales et les transformations politiques. Ce processus s'achève avec la période coloniale française au début du XX^e siècle, marquée notamment par le transfert du centre administratif du Touat vers Timmi, future ville d'Adrar.

I.5.3 Aperçu géologique et climatique

a) Contexte géographique et environnemental

La région de Tamentit s'inscrit dans l'environnement saharien de la wilaya d'Adrar, caractérisé par des formations géologiques dominées par des plateaux rocheux et des dépôts sableux. L'implantation des ksour sur des substrats rocheux légèrement surélevés traduit une adaptation aux contraintes hydrologiques, notamment la gestion des écoulements d'eau et la prévention des inondations.

Le développement de l'oasis repose sur un système hydraulique traditionnel sophistiqué, la foggara, qui permet l'exploitation durable des nappes phréatiques profondes et conditionne fortement l'organisation spatiale des établissements humains.

b) Caractéristiques climatiques

Le climat de la région d'Adrar est de type hyperaride, marqué par une forte amplitude thermique annuelle et des conditions extrêmes.

Durant la saison hivernale, particulièrement entre décembre et février, les températures nocturnes peuvent descendre en dessous de 4 °C, tandis que les températures diurnes demeurent généralement inférieures à 20 °C. À partir de la mi-mai, une élévation significative des températures est observée : les températures nocturnes dépassent fréquemment 34 °C, tandis que les températures diurnes franchissent le seuil de 40 °C.

Les mois de juillet et août correspondent à la période la plus chaude de l'année, avec des températures nocturnes pouvant dépasser 45 °C et des températures diurnes excédant parfois 55 °C. Ces conditions placent la région d'Adrar parmi les zones les plus chaudes au monde (Figure I.12).

Ces contraintes climatiques ont fortement influencé les choix architecturaux et urbains, notamment en matière d'orientation, de compacité du tissu bâti, de limitation des ouvertures et d'utilisation de matériaux à forte inertie thermique.

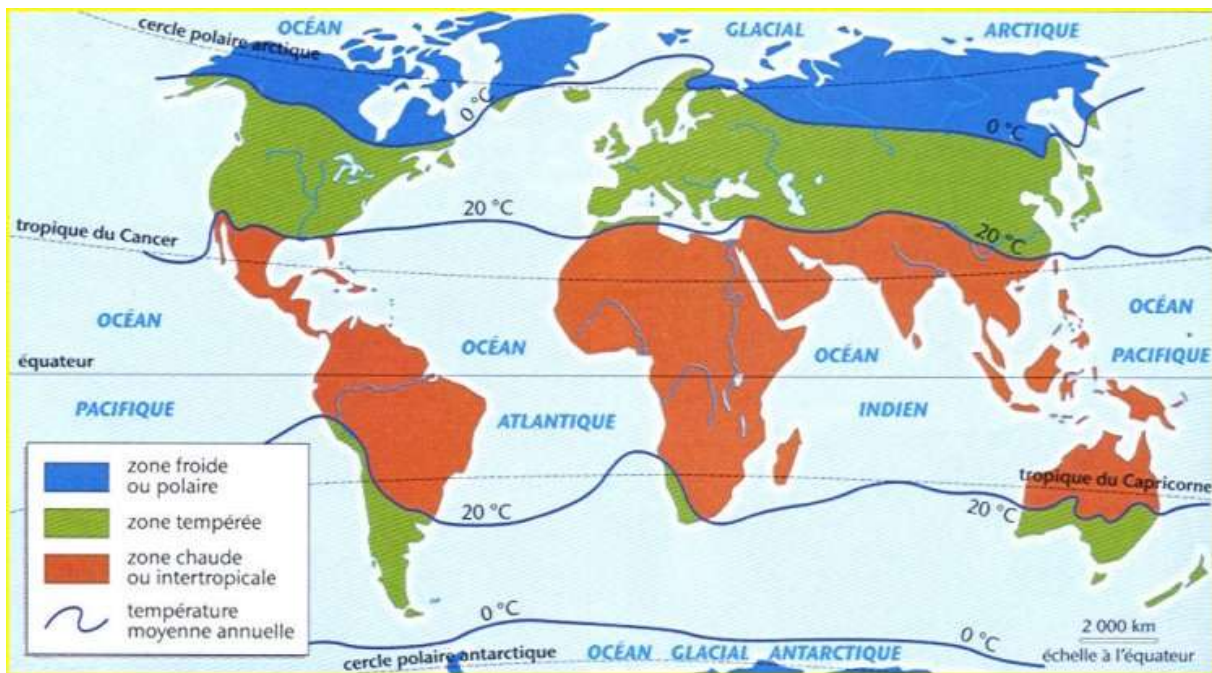


Figure I. 12 : Classification climatique en Monde (soutien67, 2026)

I.5.4 Aperçu de construction

Avant d'aborder les procédés constructifs, il convient de préciser les matières premières utilisées dans l'édification du ksar. Celles-ci se manifestent principalement dans la fabrication des briques de construction, appelées localement « toub », ainsi que dans les mortiers à base d'argile servant de liant.

a) Briques en Toub

Les briques en adobe sont obtenues à partir d'un mélange d'argile, de sable et d'eau, dosé selon des proportions spécifiques. À ce mélange est ajoutée de la paille, puis l'ensemble est laissé en fermentation pendant une durée de 2 à 3 jours. La pâte obtenue est ensuite moulée dans des coffrages rectangulaires en bois ou en métal de dimensions standard ($15 \times 15 \times 30 \text{ cm}^3$), ou parfois façonnée manuellement (Figure. 1.13).



Figure I. 13 : Brique d'adobe pendant le séchage

b) Les murs

Après séchage des briques, les fondations sont réalisées en creusant le sol afin d'y disposer les briques et les pierres selon une configuration spécifique, assemblées à l'aide d'un mortier. Les murs présentent généralement une base élargie assurant la stabilité de la structure, avant de se réduire progressivement en élévation.

Une fois la construction achevée, les murs sont recouverts extérieurement d'un enduit à base de sable salé, destiné à améliorer leur résistance face aux précipitations et à l'érosion éolienne (Figure 1.14).



Figure I. 14 : Revêtement du mur

c) La terrasse

La terrasse occupe une place essentielle dans l'habitat traditionnel du ksar, en raison de son rôle dans le confort thermique et l'usage quotidien. Elle assure une protection contre les fortes chaleurs estivales ainsi que contre les intempéries hivernales.

Les éléments porteurs du plafond sont constitués de troncs de palmiers, dont la portée maximale est généralement limitée à 2,5 m. Les planchers sont composés d'une superposition de troncs de palmier, de karnaf et d'argile, avec une épaisseur variante entre 40 et 50 cm. Dans certains cas, une couche de chaux est ajoutée lorsque la terrasse est accessible (Figure. 1.15).

- **La planche** : obtenue par le débitage longitudinal du tronc de palmier en deux ou quatre sections, d'une longueur comprise entre 2 et 2,5 m, après séchage.
- **Le karnaf** : élément issu de la base de la feuille de palmier, de forme conique irrégulière, avec des dimensions moyennes de 20 × 25 cm.
- **El-fadam (fibres)** : tissu organique entourant le karnaf, utilisé comme matériau complémentaire.



Figure I. 15 : Plafond

d) Revêtement des murs

Le revêtement des murs joue un rôle fonctionnel et esthétique, contribuant à l'intégration du bâti dans son environnement.

- **Revêtement extérieur** : constitué d'un mélange d'argile (jaune ou rouge) avec du sable ou de la terre, assurant une harmonie visuelle avec le paysage environnant (Figure. I.16).
- **Revêtement intérieur** : réalisé à partir d'un mélange d'argile jaune et de sable, appliqué en couches de 2 à 3 cm d'épaisseur, permettant d'améliorer la luminosité des espaces intérieurs.



Figure I. 16 : Revêtement extérieur du mur

I.6 Avantages et limites de la construction en terre crue

La construction en terre offre de multiples atouts. Dix principaux avantages de ce matériau peuvent être regroupés en quatre grandes catégories : culturelles, économiques, sociales et environnementales (figure I.10) (Moriset, 2011). Ces aspects sont détaillés dans la section suivante :

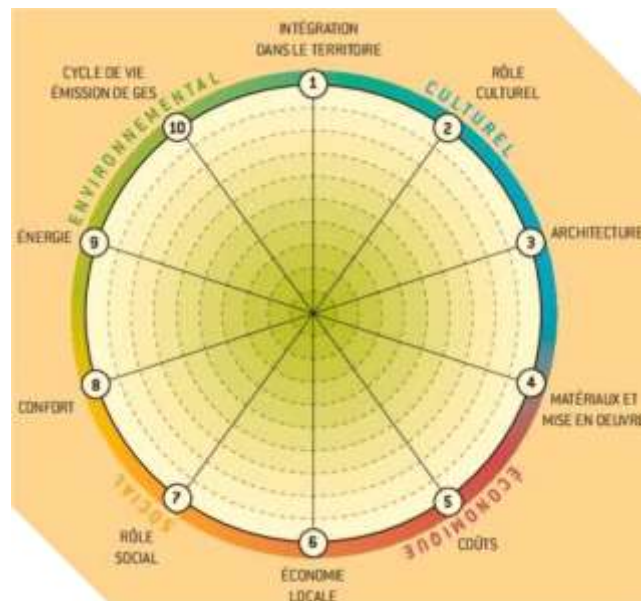


Figure I. 17 : Roue d'intérêts du matériau terre (Moriset, 2011)

1. Ancrage territorial : La terre constitue un élément fort de l'identité locale. Son utilisation dans la réhabilitation ou la construction neuve permet de maintenir le lien entre l'architecture et son environnement.
2. Valeur culturelle : Les bâtiments en terre reflètent un savoir-faire traditionnel élaboré sur de longues périodes, qu'il est essentiel de protéger et de transmettre.

3. Expression architecturale : L'architecture en terre, qu'elle soit historique ou contemporaine, illustre la créativité, l'ingéniosité et la capacité d'innovation des bâtisseurs.
4. Disponibilité et mise en œuvre : La terre est une ressource abondante sur place, nécessitant peu de transformation et des équipements simples pour sa mise en œuvre.
5. Coût et financement : Les techniques en terre favorisent l'auto-construction et l'auto-finition, permettant de limiter les dépenses liées à la main-d'œuvre et aux matériaux.
6. Impact économique local : Le secteur de la construction en terre génère des emplois locaux et soutient les entreprises spécialisées dans la rénovation et l'écoconstruction. La main-d'œuvre représente la part principale du coût d'un mur, ce qui contribue à la redistribution des salaires au niveau local.
7. Dimension sociale : La terre facilite des projets à vocation sociale, comme les chantiers pédagogiques, les programmes d'insertion professionnelle et les initiatives communautaires basées sur la coopération.
8. Confort et bien-être : Les murs en terre offrent un confort hygrothermique naturel, contribuent à la qualité de l'air intérieur et assurent un environnement sain pour les habitants.
9. Efficacité énergétique : Grâce à sa forte inertie thermique et à ses propriétés hygroscopiques, la terre participe à la régulation des températures et limite les besoins énergétiques en été comme en hiver. La filière terre se caractérise également par une consommation minimale d'énergie grise.
10. Cycle de vie et impact environnemental : Les analyses de cycle de vie montrent que la terre figure parmi les matériaux les moins émetteurs de gaz à effet de serre. Elle ne contient pas de substances dangereuses et ne libère pas de gaz toxiques, même en cas d'incendie (figure I.18)..

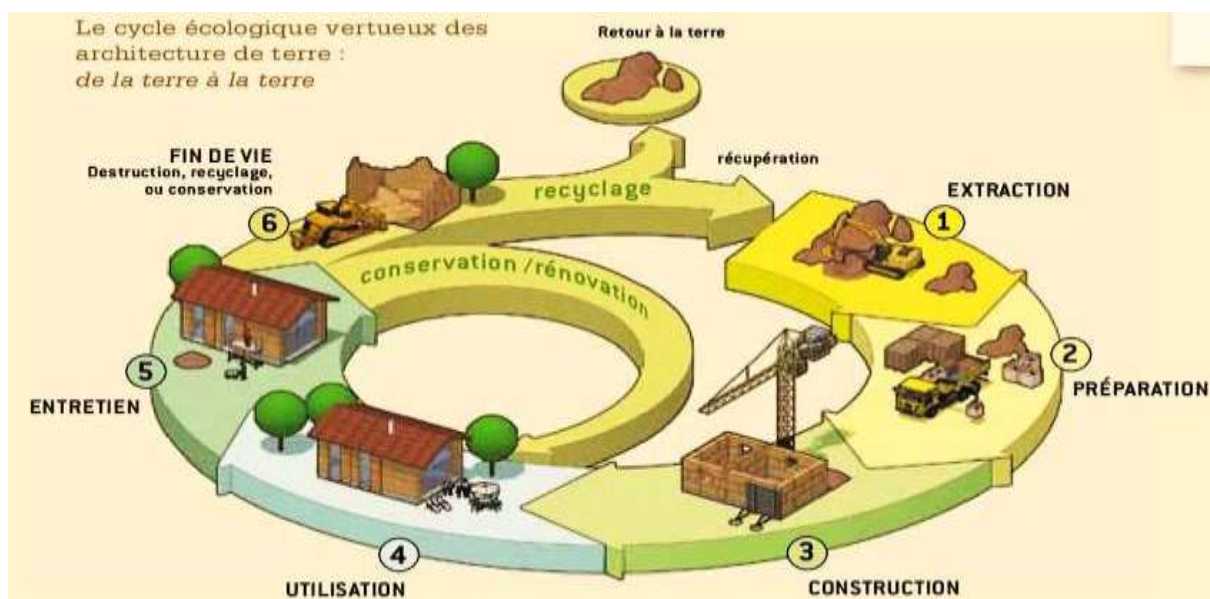


Figure I. 18 : Cycle écologique durable de la construction en terre : du matériau naturel au recyclage intégral.(Moriset, 2011)

Le tableau I.1 ci-dessous présente une synthèse des principaux atouts et limites associés au secteur de la construction en terre :

Tableau. I. 1 : Avantages et inconvénients de la construction en terre (H Houben et al., 2006)

Type	Avantages	Inconvénients
Pisé	- Paroi stable et autoportante. - Excellente performance en isolation acoustique.	- Forte vulnérabilité à l’humidité et aux cycles gel-dégel. - Nécessité de formation pratique pour l’auto-construction. - Isolation thermique insuffisante au niveau des appuis et encadrements de fenêtres.
Bauge	- Résistance mécanique supérieure à celle de la terre crue. - Temps de séchage réduit.	- Main-d’œuvre intensivement requise pour la réalisation des ouvrages.
Torchis	- Résistance mécanique supérieure à celle de la terre crue traditionnelle. - Temps de séchage réduit. - Coût global inférieur à celui d’autres variantes de terre crue.	- Processus de fabrication des briques long et exigeant physiquement. - Sensibilité aux dommages causés par le gel. - Fragilité structurelle.
Brique d’adobe	- Principalement adapté aux cloisons et aux murs intérieurs.	- Nécessite un espace suffisant pour un séchage naturel. - Demande une protection régulière contre les précipitations, par exemple à l’aide d’un enduit à la chaux.
BTC	- Mise en œuvre simple et rapide. - Excellentes propriétés d’inertie thermique et de régulation de l’air intérieur.	- Processus de fabrication intensif en matériaux et en main-d’œuvre.

I.7 Conclusion

À l’issue de cette revue de littérature, il ressort que la construction en terre possède un enracinement historique et culturel profond en Algérie, intégrant une diversité de techniques adaptées aux sols locaux et aux savoir-faire traditionnels. Chaque procédé — pisé, bauge, torchis, adobe ou blocs de terre comprimée (BTC) — se distingue par des caractéristiques techniques et des méthodes de mise en œuvre spécifiques, dont la pertinence varie selon les conditions climatiques et géologiques.

L’analyse des gisements argileux de la région d’Adrar, notamment autour de Tamantit, révèle l’abondance et la variété des ressources locales, ce qui constitue un atout majeur pour le développement de filières de production de matériaux en terre crue.

Si la construction en terre présente des avantages significatifs — emploi de matériaux locaux, confort thermique, faible impact environnemental — elle reste confrontée à certaines limites, telles que la durabilité, la sensibilité à l’eau et l’absence de normalisation des pratiques. Cette synthèse fournit ainsi un cadre solide pour aborder, dans les chapitres suivants, les études expérimentales et techniques relatives à l’exploitation de ces matériaux dans le contexte de la présente recherche.

Chapitre II : Améliorations des caractéristiques des briques en terre crue

II.1 Introduction

L'optimisation des briques en terre crue vise à améliorer leurs performances mécaniques, thermiques et de durabilité afin qu'elles puissent répondre aux exigences actuelles de construction durable et de confort. Les briques en terre crue, notamment les blocs de terre compressée (BTC) et l'adobe, sont traditionnellement constituées d'argile, de sable et d'eau, matériaux locaux et à faible impact environnemental. Cependant, leur comportement dépend fortement de la nature du sol et de la formulation du matériau.

Pour renforcer ces matériaux naturels, divers composants peuvent être intégrés : des liants comme le ciment ou la chaux, des fibres végétales pour améliorer la cohésion interne, et des additifs naturels ou industriels pour moduler la porosité, l'isolation thermique et la résistance mécanique. L'ajout d'agents stabilisants vise notamment à accroître la cohésion et la résistance à l'eau, tandis que les fibres végétales (paille, fibres de palmier, sciure) peuvent contribuer à améliorer les propriétés mécaniques et réduire la conductivité thermique.

Ce chapitre présente d'abord les matériaux utilisés dans la formulation des briques en terre crue : l'adobe, l'argile, le sable, les liants (ciment), les fibres et les additifs. Ensuite, il explore les techniques de stabilisation, les enduits et systèmes d'étanchéité ainsi que l'usage d'additifs de fibres. Enfin, une revue des essais mécaniques, thermiques et de durabilité permet d'évaluer l'impact de ces améliorations sur les performances des briques.

II.2 Présentations des matériaux

II.2.1 Adobe

L'adobe constitue un matériau de construction élaboré à partir d'un mélange de terre, d'eau et de paille. Le sol employé doit présenter une proportion spécifique d'argile et de sable. Chaque composant du mélange remplit une fonction spécifique : le sable diminue le risque de microfissurations dans le bloc de terre, l'argile lie les particules entre elles, tandis que la paille confère une certaine flexibilité à l'ensemble (Wafer, 2010).

Le prélèvement de l'échantillon de terre a été effectué sur le site du cas d'étude « ksar Tamentit », le choix de l'endroit de prélèvement a visé la partie ruine du ksar dont les blocs de terre ont été fabriqués d'une façon purement traditionnelle afin d'éviter les parties réhabilitées par d'autres techniques de construction (risque d'existence des additifs), la figure.II.1 montre en précision, le point de prélèvement.

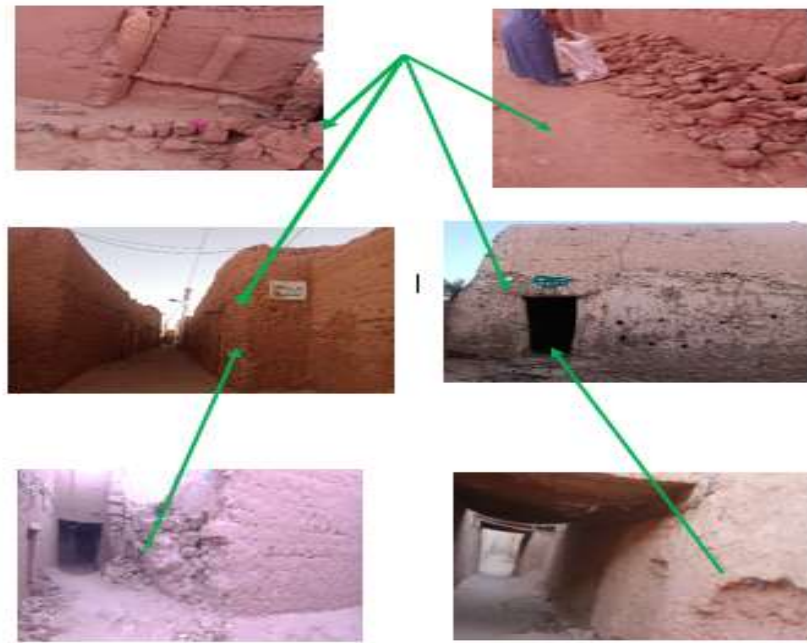


Figure.II. 1 : Site d'échantillonnage des sols, point de prélèvement

II.2.2 L'Argile

Les matériaux argileux désignent couramment les particules dont les dimensions sont inférieures à $2\ \mu\text{m}$. La majorité de ces particules se trouve dans le sol ainsi que dans les matériaux constitués de minéraux argileux. Il importe néanmoins de souligner que la définition de l'argile ne se restreint pas uniquement à ses dimensions. D'après le Journal of Non-Crystalline Solids, les argiles sont caractérisées comme des minéraux phyllo-silicatés conférant une plasticité au matériau argileux, lequel se solidifie lors du séchage ou de la calcination (Guggenheim et al., 1995).

Les minéraux argileux appartiennent ainsi à la catégorie des phyllosilicates et sont essentiellement constitués de silicium, d'aluminium et d'oxygène. Ils se distinguent par une structure formée de feuillets empilés, dont les deux catégories sont illustrées en Figure II-2 : les feuillets tétraédriques, constitués de tétraèdres comportant un atome de silicium (Si^{4+}) central entouré d'oxygènes (O^{2-}) aux sommets ; et les feuillets octaédriques, composés d'ions aluminium (Al^{3+}) susceptibles d'être substitués par des ions magnésium (Mg^{2+}) ou fer (Fe^{2+}), ainsi que de groupements hydroxyles (OH^-) (Bechchar, 2021).

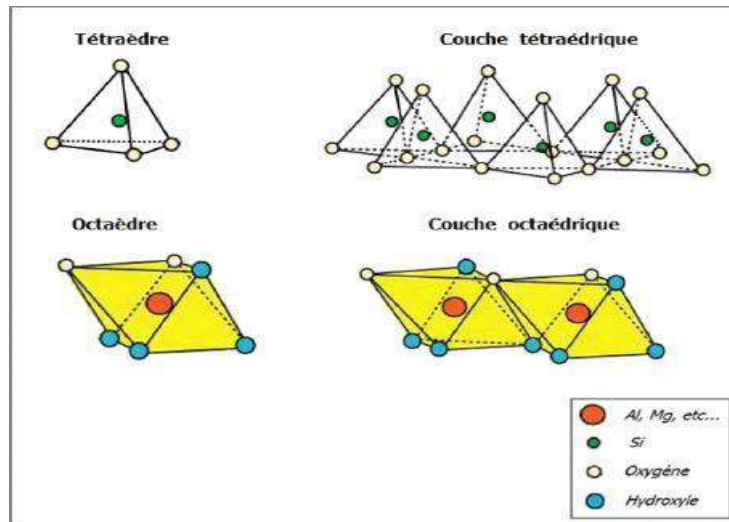


Figure. II. 2: Représentation des tétraèdres et des octaèdres ((Bechchar, 2021)

Dans le cadre de cette étude, l'argile provenant de la région d'Adrar a été utilisée.



Figure. II. 3: Argile d'Adrar

II.2.3 Sable de dune

Le sable de dune résulte de l'érosion et de la sédimentation de diverses roches, puis d'un transport par les cours d'eau et, dans certains cas, par l'action du vent. La fraction dominante de ces formations sableuses est généralement constituée de quartz. Pour les besoins de cette étude, le sable de dunes employé provient de la localité de Bouda.



Figure. II. 4: Sable de dunes

II.2.4 Ciment

Le ciment MALAKI, employé pour la stabilisation de la terre, est un ciment blanc à haute résistance initiale et finale (CPJ – CEM II/A-L 52,5N [NA 442]), obtenu par broyage d'un clinker blanc. Il est principalement constitué d'oxydes minéraux, dont la chaux (CaO), à caractère basique, et la silice (SiO₂), à caractère acide. Ces composants sont rendus réactifs par un traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500 °C. Lors de l'ajout d'eau, une réaction d'hydratation s'enclenche, conduisant à la formation d'un réseau solide et durable, caractéristique de la propriété hydraulique, constitué essentiellement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. Les tableaux II.1 à II.4 présentent un résumé des principales propriétés physico-chimiques de ce ciment.

Tableau. II. 1: Composition chimique.

Perte au feu (%) [NA5042]	6.0±2
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	2,5±0,5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,7±0,5
Teneur en chlorures (%) [NA5042]	0,02-0,09

Tableau. II. 2: Composition minéralogique du clinker (Bouge).

C3S (silicate tricalcique Ca ₃ SiO ₅)	55± 3 %
C3A (Aluminate tricalcique Ca ₃ Al ₂ O ₆)	9,0±1 %

Tableau. II. 3 : Analyse physique du ciment.

Consistance Normale (%)	28 ± 3,0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) [NA231]	4300 – 5200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3,0
Début de prise (min) Temps de prise à 20 °c [NA 230]	160 ± 40
Fin de prise (min) Temps de prise à 20 °c [NA 230]	250 ± 40

Tableau. II. 4: Résistance à la compression

A 2 jours (MPa)	$\geq 20,0$
A 28 jours (MPa)	$\geq 52,5$

II.2.5 Coquille d'arachide

L'arachide (*Arachis hypogaea* L.) constitue une légumineuse à coque semi-rigide, caractérisée par une teneur élevée en huile et en protéines, et originaire du Brésil (Echeverría-Maggi et al., 2022). Ces composants lui apportent à la fois rigidité mécanique, stabilité structurale et résistance à la dégradation naturelle, par exemple, contenus moyens : cellulose ~34–45 %, lignine ~27–33 % (Edward M Rubin, 2008).

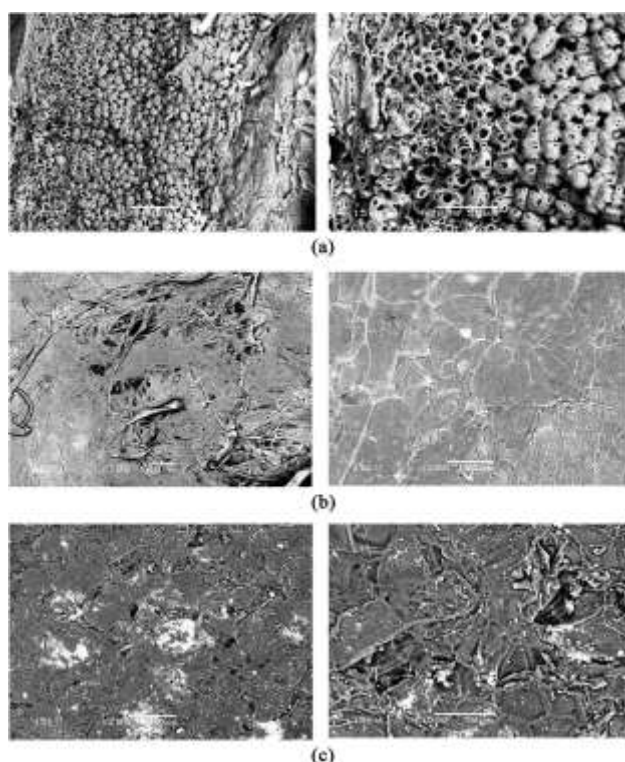


Figure.II. 5: Image MEB de coques d'arachide : (a) bordure ; (b) surface intérieure ; (c) surface extérieure ((Bobet et al., 2020)

En 2020, la production mondiale de coquilles d'arachide s'élevait à environ 47 millions de tonnes métriques. La Chine représentait le principal producteur de cacahuètes, assurant près de 40 % (environ 18 millions de tonnes métriques) de la production mondiale (Figure II. 6). Les compartiments de coque constituent approximativement entre vingt et vingt-neuf pour cent de la masse totale de l'arachide (Davis et al., 2016 ; Duc et al., 2019). Ainsi, l'industrie de l'arachide produit annuellement environ onze millions de tonnes métriques de déchets constitués de coques d'arachide (Perea-Moreno et al., 2018). Par ailleurs, une quantité adéquate de coques d'arachide est employée en tant que biomasse pour des applications énergétiques. Toutefois, un nombre croissant de coques d'arachides est rejeté en tant que déchet.

Le secteur industriel de l'arachide produit une importante quantité de déchets de biomasse variés, comprenant notamment les coques d'arachide, les arachides détériorées, ainsi que les pelures de noyaux, entre autres. En moyenne, la proportion de déchets de biomasse constitués par la coque de cacahuète correspond à 40 % de la masse totale des cacahuètes produites (Kumar et al., 2021). Un pourcentage réduit de la coque d'arachide et de la pellicule de l'amande produites est exploité en tant que produit à valeur ajoutée. La fraction restante est généralement retrouvée dans les déchets solides ménagers. Plusieurs articles de synthèse récents ont porté leur attention sur l'exploitation de la coque d'arachide en tant que déchet biologique valorisable (Duc et al., 2019), dans la fabrication de composites polymères renforcés (Zaaba et al., 2019), de composites à matrice aluminium (Dwivedi et al., 2020), de composites hybrides (Kisan et al., 2021), pour l'élimination du fluor (Pratha et al., 2020), ainsi que comme complément alimentaire pour les ruminants en milieu pastoral (Mokolopi, 2022).

L'intégration des coques d'arachide et de leurs dérivés dans les matériaux de construction contribue à atténuer les problématiques environnementales associées à la gestion des déchets coquilles d'arachide ainsi qu'à la consommation de ciment. De nombreuses études ont examiné l'emploi de coquilles d'arachide en substitution du ciment dans le béton et le mortier (Sathiparan et al., 2018), comme stabilisant des sols (Bell, 1996), que dans la fabrication de briques (Vignesh et al., 2020), ainsi que l'utilisation des coquilles d'arachide et de leur poudre en tant qu'agrégats fins dans le béton et la maçonnerie (Beatrix, 2007.)

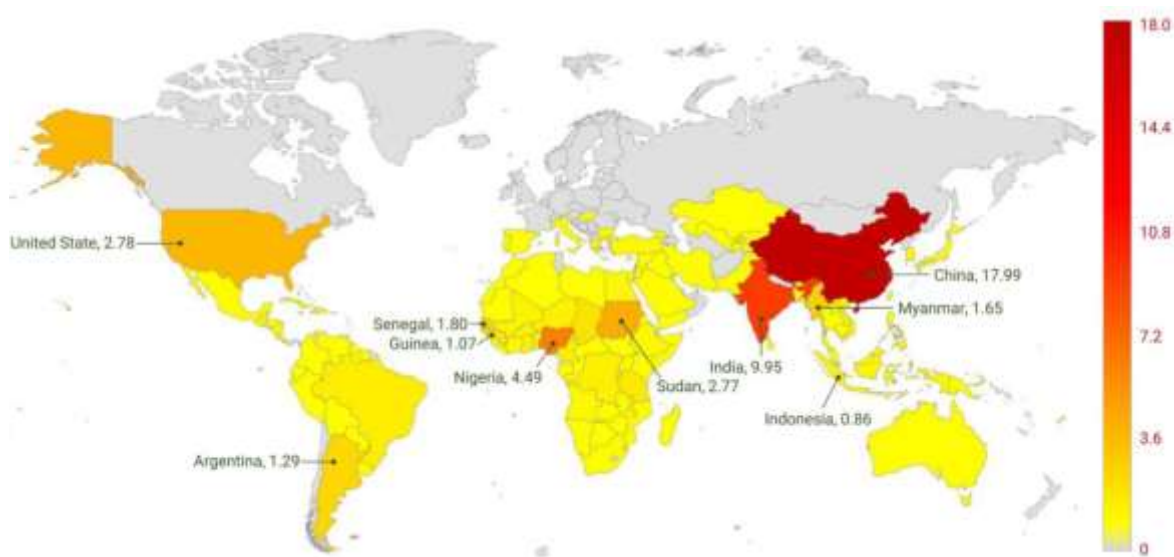


Figure.II. 6: Production mondiale d'arachides en 2020 et principaux pays producteurs (en millions de tonnes métriques) (Statista, 2022)



Figure.II. 7 : Coquille d'arachide

Tableau.II. 5 : Composition chimique des poudres de coquille d'arachide (Bobet et al., 2020)

Poudre de coquille d'arachide	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Autres
	42	3	28	27

- **La cellulose :** Il s'agit de la composante principale des fibres végétales. C'est un polymère naturel de premier plan. En général, les fibres végétales se composent d'une chaîne de cellulose.
- **L'hémicellulose :** L'hémicellulose, présente dans l'ensemble des parois de ces fibres, est un polysaccharide à chaîne courte, ramifiée et repliée sur elle-même. Il s'agit du composant responsable de l'élasticité des fibres et qui autorise l'allongement des parois au cours de la croissance.
- **La lignine :** Elle présente une structure tridimensionnelle complexe constituée d'unités phényle-propane reliées selon diverses configurations. La lignine et l'hémicellulose, en tant que composés amorphes, assurent la cohésion entre les unités de cellulose, qui présentent une structure partiellement cristalline.

II.2.6 Sciure de bois

La sciure de bois est généralement reconnue comme un résidu, un sous-produit de l'industrie forestière, généré lors des opérations de coupe, de sciage ou de broyage du bois. Annuellement, les scieries génèrent des volumes considérables de sciure de bois (FAO, 2021) . D'après un rapport, la croissance moyenne annuelle du volume mondial de récolte de bois s'est établie à 0,20 % entre 1990 et 2015 (Zhang et al., 2020), tandis que la FAO projette une augmentation de 55 % de l'offre potentielle en bois d'œuvre industriel d'ici à 2030 (Penna, 2010). Par conséquent, le secteur de la transformation du bois exprime une préoccupation croissante quant à la valorisation économique des sciures, dont la majorité est incinérée, engendrant ainsi une pollution environnementale (Charis et al., 2019; Lopez et al., 2020). La sciure de bois constitue, en revanche, une matière première précieuse exploitable dans diverses industries grâce à son abondance. La sciure de bois se compose essentiellement de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine ainsi que de faibles proportions (cinq à dix pour cent) de substances étrangères (Lachowicz et al., 2019; Matsuoka et al., 1999; Pettersen, 1984). Il constitue l'agent le plus

fréquemment employé dans les domaines de l'énergie, de l'agriculture et de l'industrie manufacturière. Néanmoins, les études portant sur l'utilisation de la sciure de bois dans la fabrication de matériaux de construction demeurent limitées (Mwango et al., 2019).



Figure.II. 8: Sciure de bois

II.2.7 Eau de gâchage

L'eau employée pour le gâchage des mélanges est de l'eau potable provenant du robinet du laboratoire. Le tableau II.6 présente les compositions chimiques.

Tableau.II. 6 : Compositions minérales d'eau potable d'Adrar (NRH, 2025)

Compositions					
Concentration mg/ml	pH	Rs	Ca ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
	7.03	702	60	37.5	115
	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻¹
	14.1	185	180	19.81	122
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	PO ₄ ⁻	MO	SI
	0.0772	0.1395	0.0002	0.2	733.41

II.2.8 Bloc de terre crue (Adobe)

L'adobe est un matériau de construction élaboré à partir d'un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales, généralement de la paille. La terre employée doit présenter une proportion équilibrée d'argile et de sable, chaque composant remplissant une fonction spécifique : le sable limite l'apparition de microfissures dans les blocs, l'argile assure la cohésion des particules, tandis que la paille confère une certaine souplesse à l'ensemble (Wafer, 2010).

a. Domaine d'utilisation

Les adobes présentent une structure interne robuste, leur permettant d'être employés pour la construction de murs porteurs, de cloisons intérieures, pour la réparation de différentes techniques de construction en terre ou encore pour le remplissage des ossatures en colombage (CRATerre, 1986). Ils constituent une solution pratique et économique, offrant une alternative aux méthodes traditionnelles de remplissage humide, tout en tirant pleinement parti des propriétés intrinsèques de la terre.

b. Formes des briques d'adobe

- **Adobes traditionnels** : Ces briques peuvent être modelées directement à la main, sans recours à un moule, ce qui leur confère des géométries diverses telles que coniques, cylindriques, piriformes ou cubiques. Lorsqu'elles sont fabriquées à l'aide de moules en bois ou par des procédés mécaniques, elles adoptent généralement des formes régulières, notamment prismatiques, cubiques ou parallélépipédiques. Leurs dimensions varient considérablement, avec des longueurs comprises entre 25 et 60 cm.
- **Adobes à conception parasismique** : Grâce à une géométrie spécifique, ces briques présentent une meilleure résistance face aux sollicitations sismiques. Certaines sont spécialement conçues pour faciliter l'intégration de dispositifs structurels renforçant la stabilité de l'ouvrage, tels que les systèmes de chaînage.
- **Adobes spécifiques** : Ces briques peuvent être conçues pour des usages courants ou pour des applications particulières. Parmi elles figurent, par exemple, les adobes munis de stries ou d'aspérités afin d'optimiser l'adhérence, notamment dans la réalisation de coupes ou de voûtes. On trouve également des modèles à système d'emboîtement facilitant l'assemblage, ainsi que des briques présentant des éléments décoratifs ou des marquages distinctifs (signatures, motifs, etc.).

c. Procédé traditionnel de fabrication des briques d'adobe

Pour transformer la terre en brique exploitable en construction, une succession d'opérations doit être respectée selon des règles précises (CRATerre, 1986). Les principales étapes sont les suivantes :

- **Extraction** : Cette phase débute par l'identification d'un gisement adapté. Il convient d'enlever la couche superficielle du sol et de vérifier que la teneur en argile ainsi que la quantité disponible sont suffisantes pour la production envisagée.
- **Tamassage** : L'objectif est d'éliminer les éléments indésirables tels que les matières organiques, les graviers ou les fragments de pierre, afin d'obtenir une terre plus homogène.
- **Préparation du mélange** : Cette étape consiste à définir la formulation. Classiquement, le mélange comprend de l'argile, du sable et une faible proportion de fibres végétales (comme la paille). À titre indicatif, la composition usuelle est d'environ deux tiers d'argile pour un tiers de sable, avec un ajout modéré de paille jouant un rôle d'armature.

- Moulage : La mise en forme dépend des dimensions souhaitées, elles-mêmes liées aux pratiques constructives locales, à la nature du sol et au type d'ouvrage à réaliser. Les briques peuvent être façonnées individuellement ou produites en série à l'aide de moules (voir figure II.10 a).
- Démoulage : Le choix du moule (matériau et dimensions) influence directement la facilité de l'opération. Les moules sont généralement en bois ou en métal. Le démoulage intervient peu après la mise en forme, lorsque la cohésion du mélange est suffisante (figure II.10 a).
- Séchage : Les briques crues sont laissées à l'air libre, de préférence durant les périodes chaudes, afin d'assurer une évaporation progressive de l'eau contenue dans le mélange (figure II.10 b).
- Stockage : Une fois séchées, les briques sont entreposées en laissant des espaces entre les rangées afin de permettre une circulation d'air adéquate. Cette précaution garantit un séchage complet et limite les risques de retrait ultérieur lors de la mise en œuvre (voir la figure II.11).



(a) (b)
Figure.II. 9: (a) Démoulage des briques de terre, (b) Séchage des briques de terre. (Bérengère, 2015)



Figure.II. 10: Stockage des briques de terre (Internet, 2026)

II.3 Stabilisation

II.3.1 Caractéristiques essentielles pour la stabilisation des sols

Les sols présentent des propriétés variables selon leur composition minéralogique et la répartition des différentes fractions granulaires qui les constituent. En général, la fraction prédominante influence fortement les caractéristiques globales du matériau et conditionne son comportement.

On distingue, d'une part, des propriétés chimiques liées notamment à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates. D'autre part, les propriétés physiques regroupent un large éventail de paramètres tels que la teinte, la stabilité de la structure interne, l'adhésivité, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité (ou indice des vides), la capacité d'adsorption, les phénomènes capillaires (potentiel et diffusion), la perméabilité, le retrait linéaire ainsi que la résistance à l'état sec, entre autres.

L'analyse de ces différentes caractéristiques permet d'évaluer l'aptitude d'une terre à être utilisée en construction et d'anticiper son comportement en service (Rigassi, 1995). Toutefois, une étude exhaustive de l'ensemble des propriétés physico-chimiques n'est pas systématiquement indispensable. En pratique, la compréhension de quatre paramètres majeurs suffit généralement pour orienter les choix de stabilisation (H Houben et al., 2006) :

- La texture (ou répartition granulométrique) ;
- La plasticité ;
- La compressibilité ;
- La cohésion.

II.3.2 Principes et mécanismes de stabilisation

La stabilisation regroupe l'ensemble des techniques, d'ordre physique ou chimique, destinées à améliorer les performances des briques en terre, notamment leur capacité portante, leur résistance à l'eau et leur durabilité. Elle vise principalement à :

Diminuer la proportion de vides entre les particules solides ;

Comblers les pores qui ne peuvent être éliminés par simple compactage ;

Renforcer ou créer des liaisons entre les constituants du matériau ;

Assurer un effet durable et irréversible des améliorations obtenues (OTTOU, 1987).

II.3.3 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique repose sur l'augmentation de la densité apparente du matériau par compactage. Cette opération entraîne un rapprochement des particules et une réduction de la porosité. Réalisé dans des conditions appropriées, le compactage diminue la perméabilité, la compressibilité, l'absorption d'eau et le potentiel de gonflement, tout en améliorant les résistances mécaniques à court et à long terme.

Cependant, malgré ces gains, le matériau demeure sensible à l'eau : en présence d'humidité, la brique peut retrouver un comportement plastique et perdre une partie de sa résistance à la compression (OTTOU, 1987).

II.3.4 Stabilisation physique

La stabilisation physique consiste à ajuster la composition granulométrique du sol afin d'améliorer les propriétés. Par correction de la répartition des grains, il est possible soit de réduire l'indice de plasticité, soit d'accroître la cohésion du mélange, selon l'objectif recherché (Meukam, 2004).

II.3.5 Stabilisation par cuisson

Les briques cuites sont élaborées à partir d'un mélange de terre et d'eau auquel peuvent être ajoutés, dans certains cas, des éléments combustibles (ex. sciure de bois) pour améliorer les performances thermiques. Lors de la cuisson en four, ces particules brûlent et laissent des microcavités qui renforcent l'isolation thermique tout en limitant la consommation énergétique du four.

La terre cuite facilite l'évacuation de l'humidité et contribue à une régulation hygrométrique efficace. Les constructions en briques cuites offrent ainsi une bonne protection contre les variations climatiques, le bruit, l'humidité et le feu. En revanche, la cuisson exige une dépense énergétique importante, ce qui augmente le coût de production par rapport aux briques de terre stabilisées au ciment, avec un impact environnemental non négligeable (Meukam, 2004).

II.3.6 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique fait appel à des additifs destinés à modifier durablement les propriétés de la terre, notamment pour réduire sa sensibilité à l'eau. Les liants hydrauliques, comme le ciment, permettent d'agglomérer les grains sableux et de stabiliser la fraction argileuse, améliorant ainsi les performances mécaniques et la résistance à l'humidité. Il est essentiel d'utiliser une eau de gâchage exempte de matières organiques et de sulfate (Meukam, 2004).

Il y a plusieurs types de stabilisants chimiques, on cite ici la suite :

A. Liant hydrocarbonique (bitume)

Un bitume est un produit organique composé majoritairement d'hydrocarbures. Utilisé sous forme d'émulsions ou de cut-backs (suspensions de fines particules dans l'eau ou un solvant), il est incorporé à la terre. Après évaporation du solvant ou de l'eau, un film mince et continu se forme autour des particules, améliorant la résistance à l'eau et apportant une cohésion supplémentaire aux sols peu liés naturellement (H Houben et al., 2006).

B. Liant hydraulique

B.1. Ciment

Le ciment est une poudre fine qui, en présence d'eau, forme une pâte capable de durcir et d'assurer l'agglomération des granulats (CRATerre, 1986). Son utilisation pour la stabilisation s'est développée au début du XXe siècle, d'abord dans les travaux routiers aux États-Unis, puis dans le bâtiment en Europe, avant de se généraliser à l'échelle mondiale (H Houben et al., 2006).

Dans les briques de terre stabilisée (BTS), le dosage en ciment dépend de la nature du sol et des performances recherchées. En général, une proportion minimale de 3 à 4 % (en masse par rapport à la terre sèche) est nécessaire, mais ce taux peut atteindre 6 à 12 % pour garantir de bonnes résistances. Les sols riches en fines exigent des dosages plus élevés.

Le ciment hydraté agit selon deux mécanismes principaux :

Formation d'une matrice cimentaire liant les grains sableux ;

Interaction chimique avec l'argile, générant des gels qui pénètrent et stabilisent progressivement les agglomérats argileux.

Il en résulte une structure composite comprenant une matrice sable-ciment, une matrice argile stabilisée et éventuellement des zones non traitées. Les meilleures performances sont obtenues lorsque la compression est réalisée à l'état humide.

B.2 La chaux

La chaux est un matériau généralement blanc et pulvérulent, obtenu par calcination du calcaire (voir figure II.12). D'un point de vue chimique, elle est constituée principalement d'oxyde de calcium (CaO), avec parfois une proportion variable d'oxyde de magnésium. Le terme « chaux » peut toutefois désigner plusieurs formes chimiques, différenciées selon leurs modes d'emploi dans le domaine de la construction. Le schéma du cycle de la chaux (Figure II.11) en illustre les principales transformations.

:

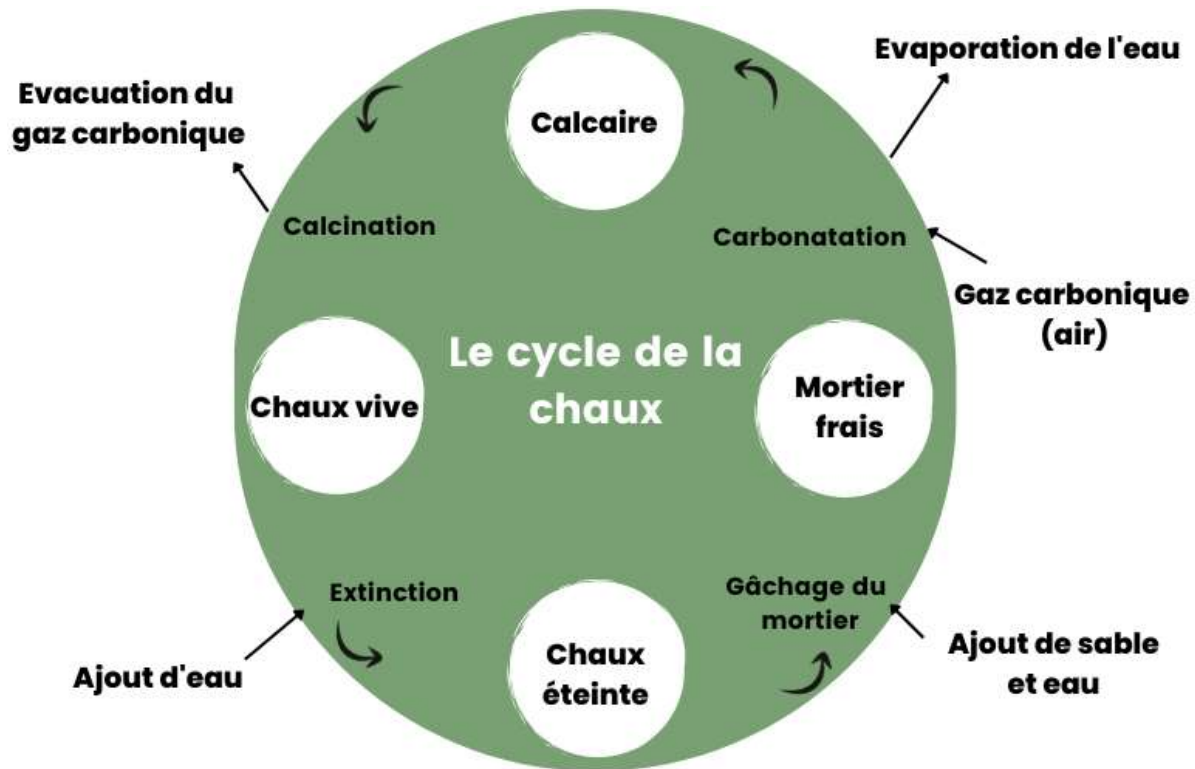
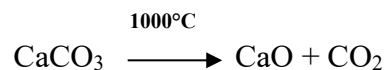
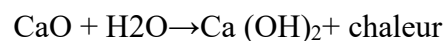


Figure.II. 11: Cycle de la chaux(Internet, 2026)

- Chaux vive : Elle résulte directement de la décomposition thermique du calcaire et correspond essentiellement à l'oxyde de calcium (CaO).



- Chaux aérienne (ou chaux éteinte) : Produite par hydratation de la chaux vive, elle est constituée majoritairement d'hydroxyde de calcium (Ca (OH)₂). Elle est qualifiée d' « aérienne » car son durcissement s'effectue par réaction avec le dioxyde de carbone de l'air.



II.3.7 Mécanismes de stabilisation à la chaux

Selon(H Houben et al., 2006) , l'action stabilisatrice de la chaux repose sur cinq phénomènes principaux :

- **Hydratation et absorption d'eau :**

En présence d'humidité, la chaux vive s'hydrate en dégageant une quantité importante de chaleur (environ 300 kcal/kg), ce qui contribue à réduire la teneur en eau du sol.

- **Échange cationique :**

L'apport de chaux enrichit le milieu en ions calcium. Ceux-ci remplacent les cations échangeables présents dans le complexe argileux (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , H^+). L'intensité de ce processus dépend de la capacité d'échange cationique du sol.

- **Floculation et agglomération :**

À la suite de l'échange ionique et de l'augmentation de la concentration en électrolytes, les particules fines se regroupent en agrégats plus volumineux. Il en résulte une modification de la texture et de la structure du matériau.

- **Carbonatation :**

Une partie de la chaux réagit avec le CO_2 atmosphérique pour former des carbonates de calcium. Cette réaction consomme une fraction de la chaux disponible pour les réactions ultérieures.

- **Réaction pouzzolanique :**

Il s'agit du mécanisme déterminant pour l'amélioration des performances mécaniques. Dans un environnement fortement alcalin créé par la chaux, les minéraux argileux se dissolvent partiellement. La silice et l'alumine libérées réagissent avec le calcium pour former des composés cimentaires (silicates et aluminates de calcium hydratés) qui assurent la cohésion durable des particules. Pour que cette réaction soit efficace, il est nécessaire de maintenir un pH élevé et de respecter un temps de maturation suffisant.



(a)



(b)



(c)

Figure.II. 12 : (a) Bitume naturel, (b) Ciment poudre et (c) Poudre de chaux

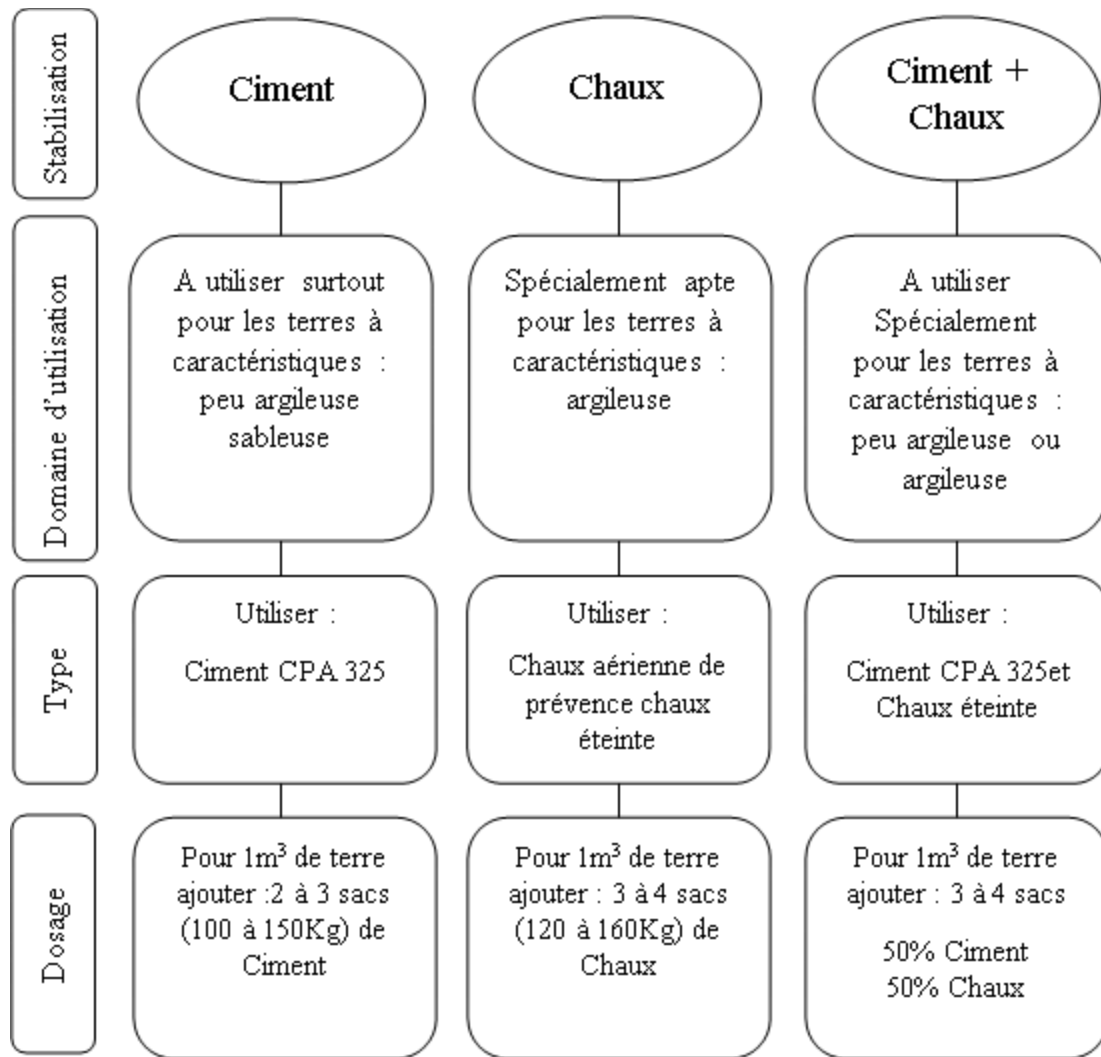


Figure.II. 13: Différents liants hydrauliques de stabilisation (H Houben et al., 2006).

II.3.8 Stabilisation par incorporation des fibres

Le principe de la stabilisation du sol est une action de la nature, on peut le voir à travers la présence des racines des plantes dans les sols. Les fibres constituant ces racines s'insèrent dans le sol et s'y orientent de manière aléatoire. Ces fibres végétales renforcent la cohésion du sol ainsi que la stabilité des versants naturels (Kaniraj et al., 2003). Par conséquent, le concept de stabilisation à l'aide de fibres a été identifié depuis plus de cinq mille ans. Par exemple, les civilisations antiques incorporent de la paille dans le matériau argileux afin de fabriquer des blocs de construction renforcés (Abtahi et al., 2009a). Plusieurs exemples de renforcement des sols existent, parmi lesquels la Grande Muraille de Chine constitue un cas emblématique, étant la première structure en terre renforcée utilisant des branches d'arbres comme éléments résistants à la traction (Rao, 1996).

Dans l'histoire contemporaine de la stabilisation des sols, le concept ainsi que le principe de renforcement des sols ont été élaborés par (Vidal, 1969a). Il a été établi que l'incorporation d'éléments de renforcement dans le sol améliore sa résistance au cisaillement. En conséquence, des initiatives visant à exploiter des matériaux fibreux ont été entreprises (Taallah et al., 2014).

Depuis l'introduction du concept de renforcement du matériau terre par (Vidal, 1969a), environ 4000 ouvrages ont été réalisés dans plus de trente-sept pays jusqu'à présent (Azeem et al., 1992a).

La fibre est un élément dont le diamètre ne dépasse pas un millimètre et dont la longueur est de l'ordre de quelques centimètres. Elle permet d'attribuer à la matrice des propriétés améliorées afin de constituer un composite présentant des caractéristiques mécaniques et physiques optimales.

II.4 Enduit, crépis naturel et système d'étanchéité

II.4.1 Définition

L'enduit de terre est un matériau de revêtement utilisé pour la protection et la finition des murs et plafonds, constitué principalement de terre crue. Il se distingue par son mode de durcissement, qui s'effectue par simple séchage sans réaction chimique, ce qui lui confère un caractère entièrement recyclable et réversible.

Ce matériau est largement utilisé dans les pratiques de construction durable en raison de sa faible énergie grise et de son intégration dans une logique d'économie circulaire (Gomes et al., 2022).

II.4.2 Composition de l'enduit

L'enduit de terre est généralement composé de :

- **Argile (liant)** : assure la cohésion du mélange
- **Sable (granulat)** : limite le retrait et améliore la stabilité
- **Eau** : permet la mise en œuvre

La teneur en argile joue un rôle déterminant dans la plasticité et les propriétés mécaniques de l'enduit (Hamard et al., 2011; Losini et al., 2019)

II.4.3 Types d'argiles utilisées

Différents types d'argiles peuvent être employés :

- **Kaolinite** : faible plasticité, faible retrait
- **Illite** : comportement intermédiaire
- **Smectite (montmorillonite)** : forte plasticité, fort retrait

Le choix du type d'argile influence directement la fissuration et la stabilité dimensionnelle de l'enduit.(Hamard et al., 2011; Tânia Santos et al., 2018)

II.4.4 Additives et améliorations

Des additifs peuvent être incorporés afin d'améliorer les performances :

- **Chaux** : amélioration de la résistance à l'eau

- **Fibres végétales** (paille, chanvre, alfa) :
 - Réduction de la fissuration
 - Amélioration de la cohésion

Cependant, ces ajouts peuvent augmenter la limite plastique et la demande en eau du mélange. (Hamard et al., 2011; Svoboda et al., 2012).

II.4.5 Propriété des enduits

a) Propriétés hygrothermiques

L'enduit de terre possède une forte capacité d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau, ce qui permet de réguler l'humidité relative intérieure et d'améliorer le confort thermique (Gomes et al., 2022)

b) Propriétés environnementales

- Faible énergie grise
- Recyclabilité totale
- Matériau local et biosourcé

II.4.6 Mise en Œuvre

L'efficacité de l'enduit dépend fortement de :

- La nature du support
- La formulation du mélange
- Les conditions d'application

Une mauvaise mise en œuvre peut entraîner des défauts tels que fissuration ou décollement (Confédération de la construction en terre crue., 2020).

II.4.7 Avantage des enduits

L'enduit de terre présente plusieurs avantages :

- Contribution à une économie circulaire grâce à sa recyclabilité
- Amélioration de la qualité de l'air intérieur
- Compatibilité avec l'architecture vernaculaire et patrimoniale
- Esthétique naturelle

Il est particulièrement adapté aux constructions traditionnelles et écologiques (Lima et al., 2020; Santos et al., 2020).

II.4.8 Inconvénient

Malgré ses nombreux avantages, l'enduit de terre présente certaines limites :

- Sensibilité à l'eau

- Nécessité d'entretien
- Dépendance à la qualité du sol

II.5 Crépis naturels

II.5.1 Définition

Le crépi naturel est un revêtement de finition à base de matériaux géosourcés ou biosourcés, appliqué sur les parois afin d'assurer à la fois une protection superficielle et une fonction esthétique. Contrairement aux revêtements synthétiques, il se caractérise par sa perméabilité à la vapeur d'eau, essentielle dans les constructions en terre.

Selon (Minke, 2006), Les revêtements naturels jouent un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre hygrométrique des bâtiments en terre.

II.5.2 Composition

Le crépi naturel est généralement composé de :

- **Liant** (chaux aérienne, chaux hydraulique ou terre)
- **Granulats fins** (sable)
- **L'eau de robinet**
- **Additifs naturels** (fibres, pigments)

L'utilisation de la chaux permet d'améliorer la résistance à l'eau tout en conservant une bonne perméabilité (Elert et al., 2023; Losini et al., 2019).

II.5.3 Types de crépis naturels

a) Crépi à la chaux

Offre une bonne durabilité et une résistance accrue aux intempéries, tout en restant compatible avec les supports anciens (Pacheco-Torgal et al., 2013).

b) Crépi en terre

Présente une excellente régulation hygrométrique mais une faible résistance à l'eau directe (Minke, 2006).

c) Crépi terre-chaux

Représente un compromis entre résistance mécanique et respirabilité, souvent recommandé pour les constructions en SEB (Hugo Houben et al., 1989).

II.5.4 Propriétés

a) Propriétés hygrothermiques

Les crépis naturels permettent la diffusion de la vapeur d'eau et contribuent à la régulation de l'humidité intérieure, améliorant ainsi le confort thermique (Gomes et al., 2022).

b) Propriétés mécaniques

Ils présentent une résistance modérée mais suffisante pour les applications de finition, leur performance dépendant fortement de la formulation et du support (M. R. Hall et al., 2012)

II.5.5 Avantages

- ✓ Faible impact environnemental
- ✓ Compatibilité avec les matériaux en terre
- ✓ Amélioration du confort intérieur
- ✓ Valorisation du patrimoine architectural

II.5.6 Inconvénients

- ✓ Sensibilité à l'eau en absence de protection
- ✓ Entretien nécessaire
- ✓ Résistance mécanique limitée

II.6 Systèmes d'étanchéité adaptés à la construction en terre

II.6.1 Définition

Les systèmes d'étanchéité regroupent les techniques visant à limiter l'infiltration de l'eau dans les structures. Dans le cas des constructions en terre, l'objectif n'est pas une étanchéité totale, mais une gestion contrôlée de l'humidité.

Selon CRATerre (2012), la durabilité des constructions en terre repose principalement sur la maîtrise de l'eau plutôt que sur son blocage.

II.6.2 Types des systèmes d'étanchéité

a) Étanchéité passive (architecturale)

- Débords de toiture
- Soubassements surélevés
- Protection contre les éclaboussures

Ces dispositifs constituent la première ligne de défense contre l'eau (Hugo Houben et al., 1989).

b) Étanchéités des soubassements

- Coupure capillaire
- Drainage périphérique

Ces solutions limitent les remontées capillaires, principales causes de dégradation des murs en terre (Avrami et al., 2008).

c) Étanchéités de surface

- Enduits stabilisés
- Badigeons à la chaux

- Traitements hydrofuges respirants

Ces techniques permettent de réduire la pénétration de l'eau tout en maintenant la perméabilité (Walker et al., 2005).

d) Systèmes moderne

- Membranes bitumineuses
- Membranes synthétiques (PVC, EPDM)

Leur utilisation doit être limitée, car elle peut empêcher la diffusion de la vapeur d'eau et provoquer des pathologies internes (Pacheco-Torgal et al., 2013).

II.6.3 Propriétés des recherches

Un système efficace doit :

- Limiter l'eau liquide
- Permettre la diffusion de la vapeur
- Être compatible avec les propriétés mécaniques de la terre

II.6.4 Mise en œuvre

Les facteurs critiques incluent :

- Continuité des couches
- Traitement des points singuliers
- Adaptation au climat

Une mauvaise conception peut entraîner condensation interne et dégradation (M. R. Hall et al., 2012).

II.6.5 Avantages

- Amélioration de la durabilité des structures
- Protection contre l'érosion
- Augmentation de la performance globale du bâtiment

II.6.6 Inconvénients

- Risque d'incompatibilité avec les matériaux en terre
- Coût des solutions modernes
- Nécessité d'une conception adaptée.

II.7 Additives végétales

L'emploi de fibres naturelles, en particulier végétales, en tant que renforts dans les matériaux composites, offre deux avantages majeurs. Premièrement, elles bénéficient d'une large disponibilité à moindre coût, et leur emploi dans le secteur de la construction ouvre de nouvelles

perspectives pour les matières agricoles. Par la suite, leur exploitation contribue à diminuer les impacts environnementaux comparativement aux composites traditionnels, étant donné qu'il s'agit de matières premières renouvelables, biodégradables, neutres en termes d'émissions de CO₂ et nécessitant une faible consommation énergétique lors de leur production (Baley, 2003).

II.7.1 Définition

Une fibre est une extension cellulaire non vivante, essentiellement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectines. Elle se présente soit de manière isolée, soit organisée en un faisceau avec d'autres éléments (Kurek, 2006).

Une fibre végétale est une extension cellulaire allongée, principalement constituée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectines.

Elle se présente sous deux formes : soit sous forme isolée, soit en association avec d'autres fibres. Une fibre unitaire désigne une cellule élémentaire fibreuse et constitue un faisceau de fibres lorsqu'elle est associée à d'autres (Figure 1.14). Dans ce faisceau, elles sont associées par l'intermédiaire de pectines et d'hémicelluloses (Hepworth et al., 2000). Une fibre végétale se distingue par son allongement considérable par rapport à son diamètre. Cet élancement se situe généralement dans une plage comprise entre 50 et 100 (Olesen et al., 1999)

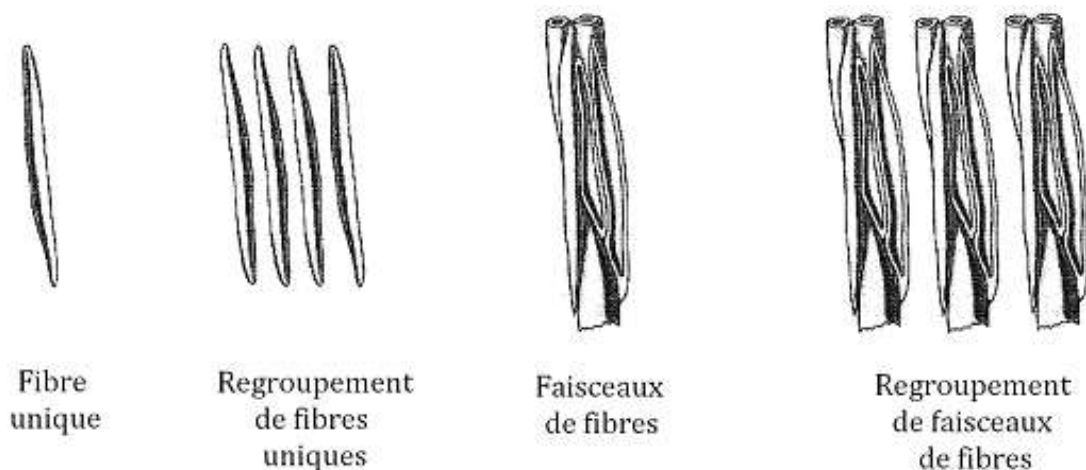


Figure.II. 14: Les différentes formes de fibres (MÜSSIG et al., 1999)

II.7.2 Classification des fibres végétales

Les fibres végétales se répartissent en cinq catégories : elles peuvent être issues des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe) ou des feuilles (Figure II.15).

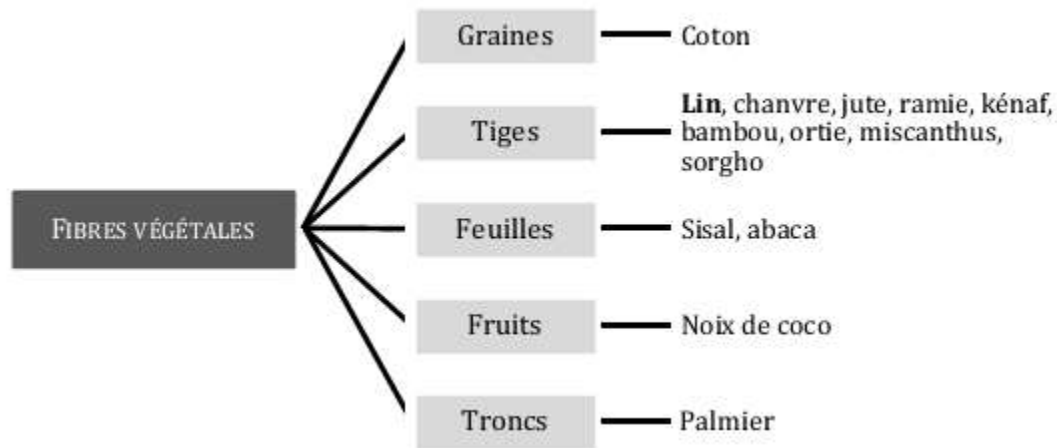


Figure.II. 15: Classification des fibres végétales (Page, 2017).

II.7.3 L'utilisation des fibres dans la construction

Le principe de la stabilisation des sols correspond à un phénomène naturel, caractérisé par la présence des racines végétales au sein des sols. Les fibres composant ces racines pénètrent et s'orientent dans le sol de façon aléatoire. Elles augmentent la résistance du sol ainsi que la stabilité des versants naturels (Kaniraj et al., 2003). Par conséquent, le concept de stabilisation par des fibres a été reconnu il y a plus de cinq mille ans. Les civilisations antiques associaient la paille à la terre pour fabriquer des blocs de construction renforcés (Abtahi et al., 2009b). Plusieurs exemples de renforcement du sol existent, parmi lesquels la Grande Muraille de Chine, qui constitue le premier cas documenté de terre consolidée par l'intégration de branches d'arbres en tant qu'éléments assurant la résistance à la traction (Rao, 1996).

Dans l'histoire contemporaine de la stabilisation des sols, la notion et le principe de renforcement des sols ont été élaborés par Vidal (Vidal, 1969b). Il a prouvé que l'incorporation d'éléments de renforcement dans le sol accroît sa résistance au cisaillement. En conséquence, ces initiatives visant à exploiter des matériaux fibreux ont été initiées (Taallah et al., 2014). Depuis l'invention par (Vidal, 1969b), près de 4000 structures ont été édifiées dans plus de 37 pays à cette date en appliquant la notion de renforcement du matériau terre (Azeem et al., 1992b).

Bien que les données de recherche soient limitées, certains professionnels ont consigné le problème de l'utilisation des fibres naturelles en tant qu'agent stabilisant ou renforçant dans la construction en terre. En ce qui concerne les types de stabilisants (Stulz et al., 1988), la paille (blé, seigle, orge, etc.) et les fibres végétales (sisal, chanvre, éléphant, coco et bagasse) sont reconnues comme une catégorie significative, bien qu'elles n'apportent pas de résultats scientifiques substantiels. Par conséquent, ces fibres régulent la fissuration dans les sols argileux et améliorent les propriétés isolantes, bien qu'un usage excessif doive être évité pour raison du risque accru d'absorption d'eau. (Rigassi, 1995) Il convient de noter qu'elles forment un réseau de fibres omnidirectionnelles, contribuant à l'amélioration de la résistance à la traction et au cisaillement, tout en limitant le retrait. De plus, l'auteur affirme, sans fournir de données de recherche, qu'elles sont incompatibles avec le processus de compression BTC en

raison de leur effet sur l'élasticité du mélange. (Minke, 2000) et avec (Rigassi, 1995) et observe que l'incorporation de fibres telles que les cheveux d'animaux ou humains, la fibre de coco, le sisal, l'agave, le bambou et la paille peut atténuer le taux de rétrécissement, car la proportion d'argile est diminuée et une partie de l'eau est absorbée par les pores de ces fibres. De surcroît, l'apparition des fissures diminue à mesure que la résistance adhésive du mélange est renforcée par les fibres.

II.8 Caractérisations mécaniques et thermiques

II.8.1 Caractérisations mécaniques

a) **Résistance à la compression :** La résistance à la compression de la terre constitue quasiment la seule caractéristique mécanique soumise à des exigences réglementaires strictes. Plusieurs études ont montré que, pour un type de sol donné, la résistance à la compression augmente avec la masse volumique. (Hugo Houben et al., 1989) (Olivier, 1994) (Morel et al., 2007) (BAHAR et al., 2004), (Kouakou et al., 2009), (Fontaine, 2004). Cependant, l'influence de la densité sur la résistance demeure peu évidente lors de la comparaison entre matériaux distincts. Hall et Allinson démontrent que, lorsque des mesures sont réalisées sur des sols reconstitués à partir des mêmes composants élémentaires combinés en proportions variables, les éprouvettes présentant une densité supérieure ne manifestent pas nécessairement une résistance accrue (M. Hall et al., 2004). La densité ne constitue donc pas un critère suffisant pour évaluer la résistance en compression d'un matériau terreux. (Moevus et al., n.d.) La composition minéralogique des argiles contenues dans le matériau influence significativement sa résistance. Par conséquent, les densités sèches des matériaux examinés par Myriam Olivier à base de montmorillonite sont nettement inférieures à celles obtenues avec le kaolin, bien que leurs résistances soient significativement supérieures (Olivier, 1994). Cela doit sans doute être attribué à la grande surface spécifique qui facilite l'apparition des forces capillaires. Ces constats peuvent être étendus à d'autres argiles : une surface spécifique importante ainsi qu'une capacité élevée d'échange cationique renforcent la cohésion du sol, et par conséquent, sa résistance à la compression. La nature physico-chimique du sable et des graviers influence vraisemblablement l'adhésion des argiles aux particules. Divers chercheurs ont analysé l'effet de l'humidité relative ou de la teneur en eau sur la résistance à la compression et ont constaté que des valeurs de résistance inférieures étaient associées à une hygrométrie ou une teneur en eau accrues. (Gelard, 2005; Jaquin et al., 2009; Olivier, 1994). Cette situation s'explique par la réduction de la succion lorsque la teneur en eau s'accroît. Ce phénomène fait l'objet d'études approfondies en mécanique des sols (Jaquin et al., 2009) et s'explique également par le rôle lubrifiant de l'eau aux points de contact entre les grains de l'empilement, entraînant une diminution du coefficient de frottement interne du matériau lorsque la teneur en eau s'accroît.

En synthèse, selon les connaissances actuelles, il demeure impossible d'estimer la résistance à la compression d'un sol sans recourir à une mesure expérimentale. La connaissance de la densité, de la teneur en eau ou en argile demeure insuffisante.

De nombreux autres facteurs interviennent dans les mécanismes de cohésion du sol qui conditionnent sa résistance. La relation entre la microstructure du sol et ses propriétés mécaniques à l'échelle macroscopique se révèle particulièrement complexe.

La résistance à la compression d'un sol employé dans la construction peut fluctuer entre 0,4 et 5 MPa. La valeur prédominante se trouve approximativement à 1,5 MPa.

Les normes prescrivent fréquemment des protocoles d'essai qui ne permettent pas d'évaluer la résistance intrinsèque du matériau, la mesure étant partiellement affectée par le dispositif d'essai. Cela résulte en partie de l'application des protocoles d'essais conçus pour les bétons à base de ciment à des normes relatives à la terre crue, bien que les caractéristiques mécaniques de ces deux matériaux diffèrent fondamentalement.

Les paramètres favorisant l'amélioration de la résistance à la compression sont les suivants (Moevus et al., 2013):

- Une densité importante - une faible teneur en eau - une proportion élevée d'argile et de limon - une concentration importante en montmorillonite
- Une homogénéité satisfaisante
- Des particules de dimensions réduites.

b) Résistance à la traction : La résistance à la traction des matériaux en terre crue est généralement très faible. En conséquence, les structures réalisées en terre sont le plus souvent conçues de manière à ce que le matériau soit principalement sollicité en compression. De ce fait, la détermination expérimentale de cette propriété reste peu fréquente et repose généralement sur des méthodes d'essai indirectes, telles que les essais de fendage ou de flexion en trois points. Parmi ces méthodes, l'essai de flexion en trois points est couramment utilisé pour estimer la résistance à la traction. Son interprétation repose sur les hypothèses classiques de la résistance des matériaux, notamment : l'assimilation de l'éprouvette à une poutre, l'application du principe de Saint-Venant, ainsi que le comportement en élasticité linéaire. La résistance à la traction peut alors être déterminée selon la relation suivante :

$$f_t = \frac{3.P_{max}.L}{2.l.e^2} \quad (II.1)$$

Où L représente la distance entre les appuis, tandis que e et l correspondent respectivement à la hauteur et à l'épaisseur de l'éprouvette.

D'un point de vue réglementaire, il n'existe généralement pas d'exigences spécifiques concernant la résistance à la traction des matériaux en terre, celle-ci étant considérée comme négligeable dans les calculs de dimensionnement. Néanmoins, certaines réglementations nationales introduisent des seuils minimaux. À titre d'exemple, la norme néo-zélandaise impose que la plus faible des résistances en flexion mesurées sur cinq éprouvettes soit supérieure à 0,25 MPa (Tableau II.7).

Tableau.II. 7: Critères réglementaires associés à la résistance à la traction

ft (MPa)	Réf	Technique	Commentaire
0.25	(New Zealand Standard, 1998)	BTC	La plus faible résistance à la flexion mesurée sur 5 échantillons doit être > 0,25 MPa.
0.2	(Walker, 2002)	Adobe	Valeur recommandée. Essai de terrain pour estimer la résistance en compression de manière indirecte
0.35	(Walker, 2002)	BTC	Valeur recommandée.

En l'absence de résultats expérimentaux, plusieurs normes, notamment australiennes, adoptent une hypothèse conservatrice en considérant une résistance à la traction nulle pour la terre. En revanche, la réglementation néo-zélandaise propose d'utiliser une valeur conventionnelle de 0,1 MPa pour la résistance caractéristique en flexion, ou de l'estimer à partir de la résistance caractéristique en compression (Maniatidis et al., 2008).

II.8.2 Caractérisations thermiques

Les propriétés du transfert thermique dépendent directement des constituants, de la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) ainsi que des interactions entre les divers modes de transfert présents dans le matériau. Du point de vue strictement thermique, un matériau se définit par quatre propriétés intrinsèques : la conductivité thermique, la capacité calorifique, la diffusivité thermique ainsi que l'effusivité thermique (Tlijani, 2016). Ces paramètres sont fonction des propriétés intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau ainsi que des conditions de conservation, notamment l'influence de l'eau.

A. Capacité thermique ou chaleur spécifique

La capacité thermique volumique C , exprimée en $\text{J/m}^3 \cdot \text{K}$, représente la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un mètre cube du matériau d'un kelvin. Elle est liée à la capacité thermique massique c , exprimée en J/kg , par l'équation suivante :

$$C = c \cdot \rho \quad (\text{II.1})$$

Dans cette expression, ρ représente la masse volumique du matériau. La capacité thermique peut être déterminée par calorimétrie, méthode qui consiste à appliquer une variation d'énergie à un échantillon et à enregistrer sa température, ou inversement, à soumettre l'échantillon à une élévation de température afin de quantifier la variation d'énergie correspondante.

La capacité thermique d'un matériau correspond à sa capacité à stocker de la chaleur. Elle se mesure en $\text{Wh/m}^3 \cdot \text{K}$ (wattheure par mètre cube et par kelvin). Selon «La conception bioclimatique» (Terre Vivante)¹⁵, une brique de terre compressée d'une épaisseur de 35 cm présente une capacité thermique de $275 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{K}$, comparativement à $163 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{K}$ pour un

mur en briques de terre cuite pleines de 25 cm d'épaisseur, 36 Wh/m³.K pour un béton cellulaire de 30 cm d'épaisseur, et 8 Wh/m³. K pour des plaques de plâtre isolées par 10 cm de laine de verre. L'augmentation de l'épaisseur du mur entraîne une amplification du déphasage thermique, qui atteint environ dix heures pour un mur d'une épaisseur de 35 cm. La capacité d'absorption thermique du mur augmente proportionnellement à son obscurité et à sa rugosité. Effectivement, une paroi de teinte noire absorbe la quasi-totalité du rayonnement. Une paroi comportant des irrégularités (redents, stries, etc.) accroît également sa capacité d'absorption.

Contrairement aux croyances courantes, la terre ne constitue pas un matériau isolant. En contrepartie, elle présente une inertie thermique remarquable. Cela se manifeste par une régulation des variations de température intérieure (fraîche en été, chaude en hiver). Valeur moyenne estimée à environ 1700 kJ·m⁻³·°C⁻¹. Cela implique que pour augmenter ou diminuer la température d'un degré Celsius d'un mètre cube de briques, il est nécessaire de fournir ou d'extraire 1700 kJ, ce qui correspond à l'énergie délivrée par un radiateur d'une puissance de 1 kW durant une demi-heure.

B. Conductivité thermique

La conductivité thermique λ représente la quantité de chaleur (en watts) transférée à travers un mètre carré de surface et une épaisseur d'un mètre de ce matériau, pour un gradient thermique de 1 kelvin entre la face externe et la face interne. Elle se mesure en watts par mètre-kelvin (W/m·K). Plus la valeur de λ diminue, plus le matériau présente des propriétés isolantes. L'efficacité de l'isolation thermique d'un bâtiment est déterminée par la conductivité thermique des matériaux employés ainsi que par leur épaisseur. Ces deux paramètres servent à déterminer la résistance thermique d'un mur :

$$R = e/\lambda \quad (II.2)$$

Son inverse : le coefficient de transfert thermique U. Une bonne isolation se traduit par une résistance thermique élevée ou un transfert thermique faible.

La densité du sol, ou plus précisément sa porosité, constitue un facteur fortement influent sur la conductivité thermique, sans toutefois en être le déterminant principal ; Hall constate qu'un des sols examinés, caractérisé par une faible densité, présente une conductivité thermique supérieure à celle d'un autre sol de densité plus élevée. Le paramètre exerçant une influence directe sur la conductivité paraît être la densité des contacts à l'intérieur du matériau, laquelle détermine les voies potentielles du transfert thermique (Matthew Hall et al., 2009; Laurent, 1987).

La brique en terre est un matériau dense, caractérisé par une inertie thermique très élevée. Cette caractéristique se révèle optimale pour l'accumulation des calories et joue un rôle majeur dans la gestion « passive » de l'habitat, tant en saison hivernale qu'estivale. Les calories accumulées durant les journées hivernales sont restituées pendant la nuit. À l'inverse, la fraîcheur emmagasinée durant les nuits estivales est restituée au cours de la journée. Grâce à son décalage thermique compris entre huit et douze heures, la biomasse thermique de chaleur participe ainsi à la régulation d'une température stable.

Étant donné que le sol constitue un matériau poreux insaturé comprenant une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse, le transfert thermique résulte de divers mécanismes : conduction à travers les phases solide, liquide et gazeuse, convection, rayonnement ainsi qu'évaporation et condensation. La caractérisation de la conductivité dans un tel matériau s'avère par conséquent complexe. La conductivité apparente désigne la valeur de conductivité obtenue par mesure, résultant de la combinaison de l'ensemble des mécanismes précédemment évoqués. La conductivité équivalente correspond à la conductivité d'un matériau homogène présentant un comportement thermique macroscopique identique à celui du matériau étudié.

C. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique, désignée par « a » et exprimée en mètres carrés par seconde (m^2/s), constitue la grandeur physique déterminant le comportement thermique d'un matériau en régime transitoire. Elle décrit la capacité du matériau à conduire la chaleur avec une vitesse variable. Cette grandeur est corrélée à la conductivité thermique ainsi qu'à la capacité calorifique volumique selon la relation suivante :

$$a = \lambda / \rho c \quad (\text{II.3})$$

D. Effusivité thermique

L'effusivité thermique E , exprimée en $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$, caractérise la faculté d'un matériau à transférer la chaleur avec son milieu environnant. De manière plus précise, cette caractéristique explique la dépendance de la température de surface d'un matériau à une variation du flux thermique incident sur cette surface. Par conséquent, un matériau à haute conductivité et forte capacité thermique présentera une température de surface peu affectée par les variations de flux, ce qui le rendra particulièrement effusif. Cette caractéristique est associée à la conductivité thermique ainsi qu'à la capacité calorifique volumique par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (\text{II.4})$$

La figure II.16 représente l'appareil de CT-mètre.



Figure.II. 16 : Appareil Ct-mètre

II.9 Durabilité

La problématique de la durabilité de la terre revêt une complexité notable, en raison de l'interaction entre les caractéristiques intrinsèques du matériau et les conditions environnementales extérieures. Bien que la terre paraisse moins résistante aux agressions extérieures comparativement à d'autres matériaux de construction, de nombreux exemples de bâtiments en terre crue édifiés il y a plusieurs siècles demeurent néanmoins en usage actuellement. Le Temple Hotyuji au Japon, édifié il y a plus de mille trois cents ans, constitue un exemple pertinent.

La pérennité d'un mur en terre est complexe à évaluer en raison de sa forte dépendance aux conditions d'exposition (décisions architecturales) et au climat local, ainsi qu'à la multiplicité des sources de dégradation (Moëvus et al., 2013) : impacts des gouttes de pluie, cycles d'humidification et de dessèchement, de gel et de dégel, agressions chimiques par des sels, déformations entravées (retraits, expansions) induisant des contraintes internes, entre autres.

II.9.1 Essais indirects

Certaines de ces expérimentations sont fréquemment employées, néanmoins il demeure complexe de localiser des publications scientifiques présentant les résultats obtenus. Nous examinons les divers essais ainsi que les rares données expérimentales rapportées dans la littérature.

A. Absorption de surface

L'essai intitulé « Initial Surface Absorption » est spécifié. Hall et ses collaborateurs l'ont légèrement modifié afin de permettre l'expérimentation de cubes de 10 cm présentant une surface mouillée de Ø80 mm (Matthew Hall et al., 2004). L'infiltration de l'eau dans l'échantillon est induite par la pression générée par une colonne d'eau de 200 mm (Figure II.17). L'épreuve s'étend sur soixante minutes avec une prise de mesure toutes les dix minutes.

L'épreuve s'avère rigoureuse : les trois échantillons présentant les rapports (surface spécifique / teneur en argile) les plus importants n'ont pas tenu. La cohésion s'avère insuffisante et la perméabilité excessive pour assurer la réussite du test. Les autres échantillons de sol non stabilisé présentent des vitesses d'absorption situées entre 2,5 et 4 ml/m²·s au terme de dix minutes, puis entre 1 et 2,5 ml/m²·s après une heure. Les chercheurs ont confronté les mélanges de terre à pisé à d'autres matériaux de construction (briques, béton) : les briques cuites présentent la plus forte absorption d'eau, atteignant un taux deux fois supérieur à celui des autres matériaux. Toutefois, à l'instar de ce qui a été observé précédemment, les sols non stabilisés se dégradent progressivement sous l'effet de l'eau, ce qui ne se produit pas pour les briques ni pour le béton.

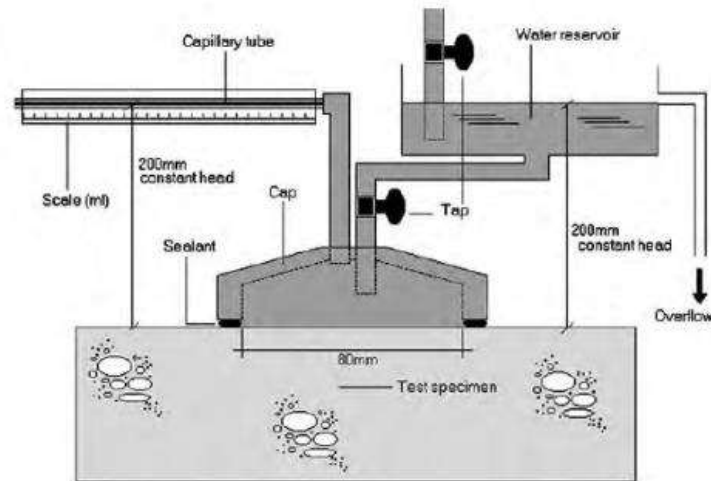


Figure. II. 17 : Test d'absorption de surface (Matthew Hall et al., 2004)

B. Test d'abrasion à la brosse métallique

Initialement, cet essai présenté dans la norme [ASTM D559] a été élaboré pour des mélanges sol-ciment employés dans la construction des chaussées. Il est désormais considéré comme une épreuve standard de résistance. La méthode consiste à frotter la surface des éprouvettes, préalablement immergées dans l'eau pendant cinq heures, au moyen d'une brosse métallique rigide exercée sous une pression verticale constante, afin d'éliminer l'ensemble des matériaux détériorés lors des cycles de séchage et d'humidification. Après douze cycles de séchage et d'humidification, les éprouvettes sont séchées en étuve, puis la perte totale de masse est quantifiée.

Plusieurs auteurs estiment que ce test manque de réalisme en raison de l'absence de corrélation avec les conditions observées sur le terrain (Bui, 2008; Walker, 2002). Par ailleurs, l'immersion d'échantillons non stabilisés s'avère impraticable.

Dans le manuel (CDE, 2000) relatif aux BTC, une autre épreuve à la brosse y est également présentée. Les éprouvettes ne sont pas plongées dans un liquide. Elles subissent 60 mouvements alternés en une minute d'une brosse métallique appliquée avec une pression verticale de 3 kg. Le coefficient d'abrasion est déterminé par le rapport entre la surface brossée et la masse perdue. Ce test présente une rigueur moindre que le précédent, tout en restant indépendant des conditions d'usure normale. Maniatidis a communiqué les résultats de cette étude portant sur des échantillons de pisé non stabilisés présentant une masse volumique de 1850 kg/m^3 : la résistance à l'abrasion s'élève à $4 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Maniatidis et al., 2008). Aucune autre valeur n'est disponible.



Figure.II. 18 : Test d'abrasion à la brosse métallique

C. Essais accélérés

Bui examine les principaux essais de laboratoire recensés dans sa bibliographie (Bui, 2008). À l'instar des essais indirects, les données expérimentales demeurent extrêmement limitées dans la littérature scientifique.

D. Essai d'érosion accélérée ou d'arrosage

Cette étude a été élaborée par le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) et est exposée dans (Walker, 2002) ainsi que dans (New Zealand Standard, 1998). L'échantillon est soumis à un jet d'eau délivré à une pression de 50 kPa, émis par une buse positionnée à une distance de 470 mm. L'irrigation s'effectue pendant une heure sur une surface circulaire d'un diamètre de 150 mm. Le taux d'érosion est déterminé en fonction de la profondeur d'érosion. Maniatidis évalue une vitesse d'érosion de 64 mm/h pour ses échantillons de pisé présentant une densité de 1850 kg/m³, ce qui équivaut à un indice d'érodabilité de 3 (Maniatidis et al., 2008). Un indice de cinq (équivalent à 120 mm/h) constitue un critère d'exclusion. Ogunye et ses collaborateurs (Ogunye et al., 2002) ont élaboré un protocole expérimental reproduisant les conditions de la pluie. La hauteur de chute des gouttes d'eau étant modulable, il est ainsi possible de déterminer l'énergie cinétique d'impact des gouttes. Les échantillons sont inclinés selon un angle compris entre 15° et 45°, afin de simuler un angle d'impact réaliste des gouttes de pluie sur une paroi (figure II.19).

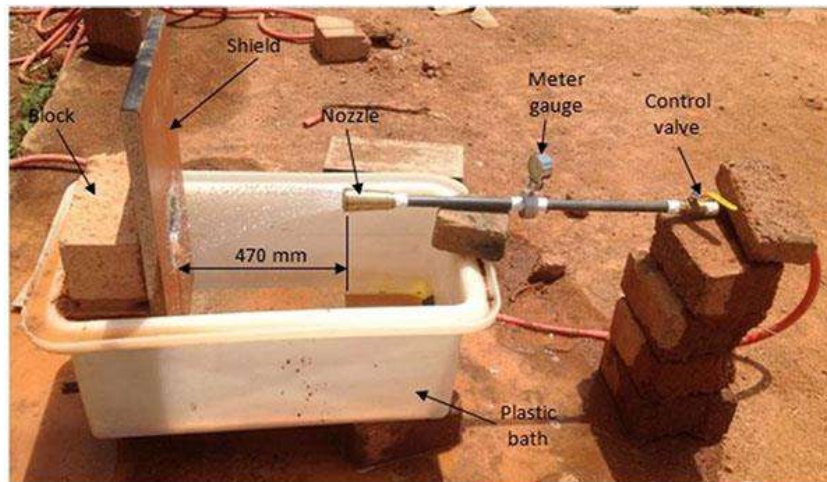


Figure.II. 19 : Essai d'érosion accélérée

E. Essai de goutte à goutte

Il convient de considérer un autre essai fréquemment employé. Des gouttelettes d'eau s'écoulent d'une hauteur de 400 millimètres sur un échantillon incliné selon un angle de 27° . Le diamètre des gouttelettes est déterminé par celui du tube dans lequel elles se forment, soit 16 mm. Un volume de 100 ml d'eau doit s'écouler sur une période comprise entre vingt et soixante minutes. La profondeur des perforations est évaluée. Selon Bui, cette expérience est valide dans les zones où les précipitations annuelles s'élèvent à environ 500 mm (Bui, 2008) .

F. Vieillissement

Hakimi et ses collaborateurs ont développé un protocole de vieillissement artificiel consistant en une immersion de vingt-cinq minutes, suivie d'un séchage à soixante-dix degrés Celsius avec une humidité relative de quarante pour cent durant trente-six heures, répétée sur un total de six cycles (Hakimi et al., 1996). Les résistances à la compression des éprouvettes « vieilles » sont confrontées à celles des éprouvettes « non altérées ». L'élaboration de l'essai ne repose pas sur l'intention de reproduire les conditions du vieillissement naturel. Il ne peut être appliqué qu'à des échantillons préalablement stabilisés.

G. Essai de gel-dégel

L'essai de gel-dégel défini par la norme NF P98-234-1, 1992) Consiste à saturer des cylindres de dix centimètres de diamètre et vingt centimètres de hauteur. Après quarante jours, vingt cycles de gel/dégel sont réalisés sur une période de vingt jours, comprenant dix-sept heures à -10°C (temps de gel inclus), suivies de sept heures à $+10^\circ\text{C}$ (temps de réchauffement inclus). Ensuite, la résistance à la compression est évaluée puis comparée à celle d'échantillons témoins d'âge identique.

Des recherches récentes suggèrent des méthodes alternatives visant à reproduire de manière plus fidèle les conditions environnementales. Par exemple, Hall a employé des chambres de simulation climatique permettant de soumettre des murets en pisé à des conditions climatiques réalistes (Matthew Hall et al., 2009). D'autres chercheurs analysent directement le

comportement des murets dans des conditions climatiques naturelles. (Guettala et al., 2006; Laurent, 1987). Ces méthodes paraissent nettement plus appropriées, bien qu'elles présentent également une complexité accrue tant dans leur mise en œuvre que dans leur analyse.

Tableau. II. 8: Synthèse bibliographique sur l'amélioration des comportements des briques de terre crue

Paramètre	Réf	Stabilisation chimique	Ajouts	Ratio	Résultats
Résistance à la compression (MPa)	(GANDIA et al., 2019)	/	Déchets de polymère renforcé de fibres de verre	+45 %	1.40 - 2.05
	(Ouedraogo et al., 2019)	/	Paille de fonio	23%	2.3-2.8
	(Assia et al., 2019)	Chaux 10% Ciment 10%	Date de palmier à fibres (0%,0.5%,1%,1.5%,3%)	10.53%, 3.07%, 4.40%, 18.65%	(1.71-1.63- 1.59-1.34) 1.89-1.68- 1.66-1.59
	(Idder et al., 2020)	Ciment (5%,10%)	Date de palmier à fibres (0%, 0,25%, 0,5%)	+90% +108.89% +137.5%	1-1.9 0.9-1.88 0.8-1.9
	(Bassoud et al., 2021)	/	Sable salin	36%	1.91-2.58
	(Babé et al., 2021)	/	Fibres de neem (Feuilles/Paille) 0, 1, 2, 3, 4%	+39.13% +40%	S: 4.6 – 6.4 L: 4 – 5.6
	(Akhzeroun et al., 2023)	/	Date de palmier à fibres	+12% +33.33% +40%	2.5-2.8 2.55-3.4 2.5-3.5
	(Benabdallah et al., 2025)	Ciment 10%	Sciure de bois et coque d'arachide (0.2.5.5.10%)	161.53% +159.29% 314,01% 186.77	2,21-5.78 2.21-5.73 2.57-10.64 2.57-7.37
Résistance à la flexion (MPa)	(Assia et al., 2019)	Chaux 10% Ciment 10%	Date de palmier à fibres (0%,0.5%,1%,1.5%,3%)	58.33%, 1.37%, 194.12%, 176.92%	(0.24-0-.27- 0.17-0.15- 0.13) 0.38-0.64, 0.50,0.36
	(Araya-Letelier et al., 2020)	/	Fibres de plumes de poulet	7%	0.54 - 0.58
	(Idder et al., 2020)	Ciment (5%,10%)	Date de palmier à fibres (0%, 0,25%, 0,5%)	+250% +275% +326.9%	0.22-0.77 0.2-0.75 0.171-0.73
	(Bassoud et al., 2021)	/	Sable salin	71 %	0.35 - 0.60

	(Babé et al., 2021)	/	Fibres de neem (Feuilles/Paille) 0, 1, 2, 3, 4%	+43.75 -43.75	0.16-0.09 0.16-0.23
	(Charai et al., 2022)	/	Fibres de Pennisetum setaceum	-71.43%	0.7-0.2
	(Akhzeroun et al., 2023)	/	Date de palmier à fibres	+12.76% +40% +2.7%	0.35-0.44 0.35-0.46 0.36-0.37
	(Benabdallah et al., 2025)	Ciment 10%	Sciure de bois et coque d'arachide (0.2.5.5.10%)	200% 115.38% +83.33% 75%	0.26-0.78 0.26-0.56 0.24-0.44 0.24-0.42
Conductivité thermique (W/m.k)	(GANDIA et al., 2019)	/	Renforcé par des fibres de verre	+26.47%	0.86 - 0.68
	(Charai et al., 2020)	/	Sciure de bois	+29.21	0.89 – 0.63
	(Bassoud et al., 2021)	/	Sable salin	+14 %	0.86 - 0.72
	(Babé et al., 2021)	/	Fibres de neem (Feuilles/Paille) 0, 1, 2, 3, 4%	+21.05% +54.73%	0.95-0.75 0.95-0.43
	(Charai et al., 2022)	/	Fibres de Pennisetum setaceum	+56.75%	0.770–0.333
	(Benabdallah et al., 2025)	Ciment 10%	Sciure de bois et coque d'arachide (0.2.5.5.10%)	+24.02% +23.65% 3.84% 5.11%	0.508-0,386 0,520-0,367 0.52-0.500 0.508-0.482

II.10 Conclusion

L'analyse des améliorations apportées aux briques en terre crue révèle que la composition des matériaux joue un rôle crucial dans leurs performances finales. L'incorporation de stabilisants, notamment le ciment ou de matériaux alternatifs, permet d'accroître de manière significative la résistance mécanique des blocs de terre comprimée en comparaison avec des formulations non stabilisées.

Simultanément, l'incorporation de fibres végétales (telles que la paille, les fibres de palmier ou d'autres végétaux locaux) influe, en fonction des proportions et de la nature des fibres, sur la résistance à la compression ainsi que sur la conductivité thermique des briques. Plusieurs recherches indiquent qu'une quantité optimisée de fibres favorise une amélioration mécanique concomitante d'une diminution de la conductivité thermique, bien que des concentrations excessives puissent compromettre l'intégrité structurelle.

Enfin, les analyses thermiques et les tests de durabilité démontrent que des formulations optimisées renforcent non seulement la résistance aux sollicitations mécaniques et aux cycles

d'humidification/dessiccation, mais également le confort thermique des parois édifiées avec ces briques. Ainsi, la combinaison de matériaux locaux, d'additifs naturels et de méthodes de stabilisation adéquates autorise la conception de briques en terre crue efficaces et conformes aux normes actuelles de performance et de durabilité.

B/ EXPERIMENTATION

Chapitre III : Essais de caractérisations

III.1 Introduction

La mise en œuvre et l'optimisation des matériaux de construction en terre crue repose sur une compréhension approfondie de leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques, thermiques et de durabilité. La caractérisation expérimentale constitue une étape indispensable pour déterminer la composition, les comportements et les performances des sols et des briques fabriquées à partir de ces matériaux. Cette démarche permet non seulement d'identifier les paramètres intrinsèques des matières premières (analyse chimique, granulométrie, limites d'Atterberg, etc.), mais aussi d'évaluer les réponses des matériaux face à des sollicitations mécaniques, thermiques et environnementales.

Ce chapitre débute par une série d'essais d'identification des matériaux visant à mesurer les propriétés de base des sols – telles que la granulométrie, la teneur en eau, la masse volumique, les limites d'Atterberg, l'indice bleu de méthylène, l'équivalent de sable et l'optimum Proctor – afin de déterminer leur aptitude à être transformés en briques en terre crue. Il présente ensuite les méthodes de fabrication des éprouvettes normalisées destinées aux essais. Enfin, ce chapitre examine l'étude du comportement mécanique (module d'élasticité, résistance à la compression et à la flexion), le comportement thermique (conductivité thermique, diffusivité et effusivité) ainsi que les essais de durabilité tels que la capillarité, le gel-dégel, les cycles d'humidification et les attaques chimiques, avant d'aborder les techniques de protection par enduits et systèmes d'étanchéité.

III.2 Essais d'identification des matériaux

Pour l'identification du matériau de terre utilisé, une campagne d'analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire a été effectuée, contenant les essais suivants :

- Analyse chimique (NF P 94-068, 1998).
- Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068, 1998).
- Essai granulométrique par tamisage (NF P 94-056, 1996).
- Essai granulométrique par sédimentation (NF P 94-057, 1992).
- Mesure de masses volumiques apparentes et absolues (NF P 18-554, 1982; NF P 18-555, 1982).
- Essai d'équivalent de sable (NF P 18-555, 1982).
- Limites d'Atterberg et indice de plasticité (NF P 94-051, 1993).

III.2.1 Analyse chimique

Elle permet de déterminer la teneur en éléments nocifs à l'utilisation de la terre à la fabrication du BTS. Elle est effectuée en quatre phases : % de carbonate (CO_3^{2-}), % de sulfate (SO_4^{2-}), % de matières insolubles (SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , ...), % de chlorure (Cl^-).

III.2.2 Essai au bleu de méthylène [NF P94-068]

Cet essai a pour but d'évaluer l'influence des fines d'origine argileuse contenues dans les sols et le grave d'origine naturelle ou artificielle. Ce test consiste à injecter, successivement, des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à saturation des particules d'argiles.

La valeur de bleu est exprimée par la formule suivante :

$$VBS = 100 \frac{V \times 0.01}{M} \quad (III.1)$$

Avec V : Volume de bleu méthylène absorbé ;

M : Masse de prise d'essai.



Figure. III. 1 : Essai de bleu de méthylène

III.2.3 Diffraction des rayons X

La composition minérale des coques d'arachide a été déterminée par une analyse de diffraction des rayons X. L'analyse par diffraction des rayons X a été effectuée au moyen d'un spectromètre (figure III.2) Bruker D8 Advance, doté d'un colorimètre et exploitant le rayonnement $K\alpha$ du cuivre ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$).



Figure. III. 2: Machine de Diffraction des Rayons X

III.2.4 Analyse granulométrique

a) Par tamisage

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé dans la partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



Figure. III. 3 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.

b) Par Sédimentométrie

Comme le tamisage n'est plus possible lorsque la dimension des particules est inférieure à 80 μm , on a recours à la sédimentométrie (figure III.4). Le but de cet essai est de mesurer sans commettre une grande erreur à différents instants à l'aide d'un densimètre. Il permet de tracer complètement la courbe granulométrique.



Figure. III. 4 : Appareillages de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Les pourcentages des tamis cumulés sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les diamètres des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique,

et les pourcentages des tamis en ordonnées sur une échelle arithmétique. D'après le tracé de la courbe de granulométrie de la terre étudiée (Figure. IV.1), en le superposant au fuseau de référence recommandé par le CRATERre, il est constaté qu'un pourcentage de 73%. Les pourcentages des tamis cumulés sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les diamètres des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages des tamis en ordonnées sur une échelle arithmétique.

c) Module de finesse [NF P 18-540]

Le module de finesse caractérise la granularité des sables. Il est égal au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur la série des tamis : 0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5 et 5 mm.

$$Mf = \Sigma [Rc (0.16) + Rc (2.5) + Rc (0.315) + Rc (0.63) + Rc (1.25) + Rc (5)] / 100$$

Selon les valeurs du module de finesse, le sol peut être classé de la manière suivante :

✓ $1,8 < Mf < 2,2$; Le sol est trop fin.

✓ $2,2 < Mf < 2,8$; Le sol est de meilleure qualité granulaire.

✓ $2,8 < Mf < 3,3$; Le sol est un peu grossier.

Le module de finesse du sol $Mf = 2.24$. ($2,2 < Mf < 2,8$) c'est-à-dire notre sol est de meilleure qualité granulaire.

d) Coefficient de courbure

Le coefficient de courbure C_c sert à quantifier la distribution des particules dans une courbe granulométrique. Il se présente sous la forme :

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$$

Avec :

- D_{30} : le diamètre effectif correspond au tamisât cumulé 30%.
- D_{60} : le diamètre effectif correspond au tamisât cumulé 60%.
- D_{10} : le diamètre effectif correspond au tamisât cumulé 10%.

Où :

- ✓ $0 < C_c \leq 1$: granulométrie graduée.
- ✓ $1 < C_c \leq 3$: granulométrie bien graduée.
- ✓ $C_c > 4$: granulométrie gravier

c) Coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité C_u défini l'étalement d'une courbe granulométrique, il est exprimé par l'expression suivante : $C_u = D_{60}/D_{10}$

Avec :

- D60 : le diamètre effectif correspond au tamisât cumulé 60%.
- D10 : le diamètre effectif correspond au tamisât cumulé 10%.

Où :

- ✓ $1 < Cu \leq 2$: granulométrie très uniforme.
- ✓ $2 < Cu \leq 5$: granulométrie uniforme.
- ✓ $5 < Cu \leq 20$: granulométrie peu uniforme.
- ✓ $Cu > 20$: granulométrie très étalée

III.2.5 Masse volumique

A) Masse volumique apparente

Elle est déterminée au laboratoire sur un échantillon séché à l'étuve à 105°C pendant 24h. Un récipient de volume et de poids connus est rempli de l'échantillon sec. On ne tasse pas l'échantillon dans le récipient, dont le bord est arasé avec précaution. Le récipient rempli est pesé.



Figure. III. 5 : Essai pour déterminer la masse volumique apparente

B) Masse volumique absolue



Figure. III. 6 : Essai pour déterminer la masse volumique absolue

III.2.6 Équivalence du sable

L'essai d'équivalent de sable, que l'on réalise, permet de caractériser globalement la proportion des particules fines ou très fines dans l'échantillon.

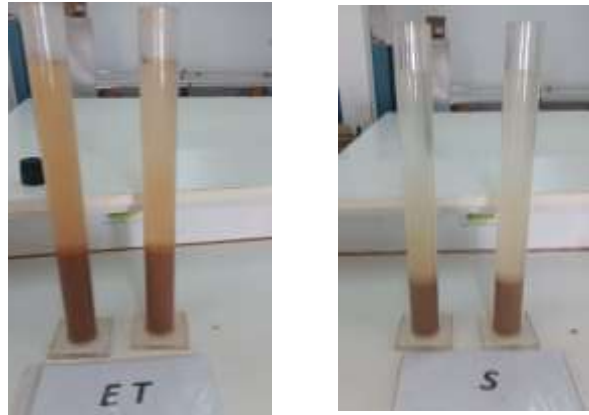


Figure. III. 7 : Essai d'équivalent de sable (sable de dunes + sol)

III.2.7 Limites d'Atterberg

Elles sont déterminées sur 500 g de matériau passant le tamis dont les mailles ont une ouverture de 0,4 mm.



Figure. III. 8 : Essais de limites d'Atterberg.

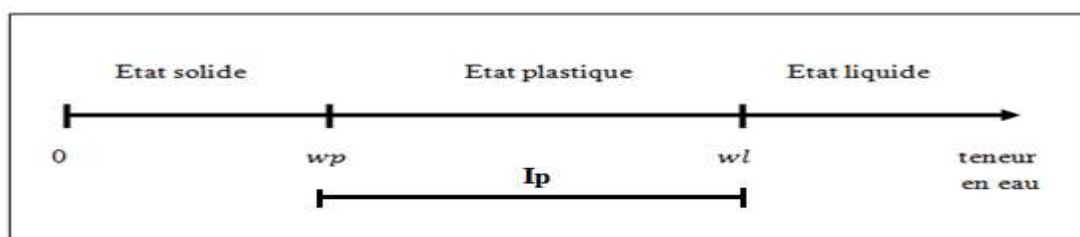


Figure. III. 9 : Présentation des limites d'Atterberg.

III.2.8 Absorption d'eau

L'absorption d'eau des coques d'arachide et de sciure de bois a été réalisée selon la méthode décrite par (CesarJuarezC. Juarez et al., 2009) et renouvelée par (Magniont Camille, 2010) pour les fibres. Les coques ont été séchées dans un four à 105 °C jusqu'à obtenir une masse stable. Six (06) échantillons d'environ 1 g ont été testés à chaque fois. Ils ont été immergés dans de l'eau distillée pendant 5, 15, 30 minutes, 24, 48 et 72 heures. À la fin de chaque période d'immersion, les coquilles ont été séchées superficiellement à l'aide de papier absorbant pour éliminer l'eau interne à la surface. La pesée a été effectuée à l'aide d'une balance précise de 10⁻² g. L'absorption d'eau des coquilles et des sciures est déterminée par la relation (III.3).

$$A (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

M₁ : masse sèche des coquilles / des sciures (g)

M₂ : masse saturée des coquilles/des sciures après immersion (g).

III.3 Protocoles de préparation des coquilles d'arachide et sciure de bois

Dans la présente étude, nous avons préparé les additifs organiques selon les méthodes suivantes : collecte, nettoyage, broyage :

III.3.1 Coques d'arachide

Les coques d'arachide sont classées comme des déchets environnementaux naturels. Comme illustré dans la figure 10, elles ont été lavées à l'eau du robinet pour éliminer les particules de saleté, puis séchées à l'air et stockées dans une pièce à 35 °C pendant cinq jours. Par la suite, ils ont été séchés au four à 50 °C pendant 24 heures. Après le processus de séchage, les coquilles ont été finement broyées à l'aide d'un moulin domestique et ensuite tamisées à travers un tamis avec une ouverture de 2 mm.

III.3.2 Sciure de bois

Les déchets de sciure de bois ont été obtenus auprès d'une scierie locale, comme illustré dans la figure 10. Initialement, le matériau a été nettoyé pour éliminer les contaminants tels que les pierres, les morceaux ou les clous. Il a ensuite été lavé à l'eau du robinet pour éliminer les particules de saleté, séché à l'air et stocké dans une pièce maintenue à 35 °C pendant cinq jours. Par la suite, la sciure a été séchée au four à 50 °C pendant 24 heures. Après séchage, le matériau a été broyé à l'aide d'un moulin domestique et tamisé à travers un tamis de 2 mm de diamètre. Une partie de la sciure a ensuite été irrégulièrement façonnée et préparée pour l'utilisation.

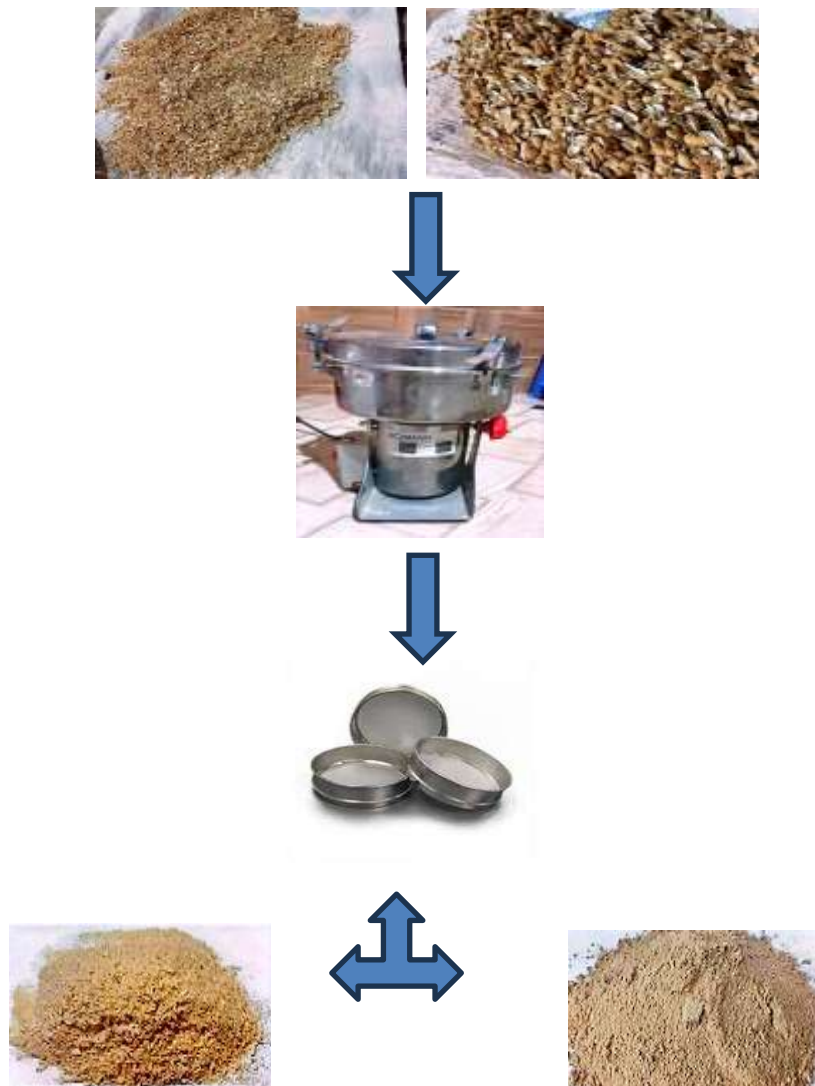


Figure. III. 10 : Étapes préparations des coquilles d’arachides et sciure de bois

III.4 Méthode de fabrication des éprouvettes normalisées (04×04×16) cm³ et (05×05×05) cm³ en BTS

III.4.1 Brique de terre crue recyclée

La terre utilisée pour cette étude provenait de sections endommagées de murs anciens. Elle a été concassée et tamisée (4 mm). Dans un second temps, elle a été mélangée à 10 % de ciment blanc, de sciure de bois, de coques d'arachide et d'eau. Le mélange a été coulé dans des moules, laissé durcir pendant 48 heures, puis conservé à 27-28 °C et à 30 % d'humidité relative. Plusieurs formulations de briques de terre stabilisées et renforcées ont été produites. La brique de terre témoin (T) a servi de référence. Les variantes TCBS contenaient du ciment blanc et de la sciure de bois (5 % et 10 %). Les formulations TCBP utilisaient du ciment blanc et des fines de coques d'arachide (5 % et 10 %). Les variantes TCBSP combinaient du ciment blanc, de la sciure de bois et des fines de coquilles d'arachide. Les formulations TCBSF contenaient du

ciment blanc, des fibres de sciure de bois et des fibres de coques d'arachide, ajoutés en proportion de la masse totale de terre. Les détails de ces formulations sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau. III. 1 : Formulation des briques de terre crue recyclée

N°	Designation	Terre %	Ciment %	Sciure de bois (fine)%	Coques d'arachide (fine)%	Sciure de bois (fibre) %	Eau %
1	T	100	0	0	0	0	30
2	TC	100	10	0	0	0	35
3	TCS ₅	100	10	5	0	0	40
4	TCS ₁₀	100	10	10	0	0	40
5	TCC ₅	100	10	0	5	0	40
6	TCC ₁₀	100	10	0	10	0	40
7	TCS _{2.5} C _{2.5}	100	10	2.5	2.5	0	40
8	TCS ₅ C ₅	100	10	5	5	0	40
9	TCC _{2.5} S ^F _{2.5}	100	10	0	2.5	2.5	40
10	TCC ₅ S ^F ₅	100	10	0	5	5	40

(%) Est ajouté à la quantité brute de terre.

III.4.2 Brique de terre crue nouvelle (adobe)

Nous humidifions l'argile pendant 24 heures pour fabriquer les unités Adobe, en utilisant seulement la moitié de l'eau de la procédure de mélange (Lamouri et al., 2022). Nous combinons ensuite les composants secs de dunes de sable, de ciment blanc, de poudre de coquille d'arachide et de fibres de sciure de bois. Puis, nous avons incorporé le mélange desséché et l'eau restante à l'argile hydratée. D'après les informations du tableau 3, nous avons déterminé le dosage précis de chaque composant pour réaliser plusieurs échantillons. Après avoir coulé le mélange dans les moules et laissé les échantillons se solidifier pendant 48 heures, nous avons procédé au démoulage avec soin. Les échantillons ont été conservés dans une pièce aux conditions environnementales normales, à une température d'environ 28 °C et une humidité relative d'environ 30 %.

Tableau. III. 2 : Brique de terre crue nouvelle (Adobe)

N°	Désignations	Argile %	Sable de dune%	Ciment %	Sciure de bois (fine)%	Coques d'arachide (fine)%	Sciure de bois (fibre) %	Eau %
1	A	30	70	0	0	0	0	30
2	AC	30	70	10	0	0	0	35
3	ACS ₅	30	70	10	5	0	0	40
4	ACS ₁₀	30	70	10	10	0	0	40
5	ACC ₅	30	70	10	0	5	0	40
6	ACC ₁₀	30	70	10	0	10	0	40
7	ACS _{2.5} C _{2.5}	30	70	10	2.5	2.5	0	40
8	ACS ₅ C ₅	30	70	10	5	5	0	40
9	ACC _{2.5} S ^F _{2.5}	30	70	10	0	2.5	2.5	40
10	ACC ₅ S ^F ₅	30	70	10	0	5	5	40

(%) Est ajouté à la quantité brute d'argile et de sable de dune.



Figure. III. 11 : Malaxage à sec de la terre avec le stabilisant

Puis, on ajoute 5, 10% de coquille d'arachide ou sciure de bois ou mix entre les deux de on mélange le tout manuellement pour la composition renforcée par additives



Figure. III. 12 : Ajout des additives au mélange et à l'eau optimal

Après l'ajout du pourcentage d'eau par rapport à la quantité de terre, on malaxe la pâte manuellement.

A la fin et avant de couler les compositions dans les moules, on prépare préalablement le moule par le graissage des parois pour faciliter le démoulage et assurer un bon surfaçage

Les moules utilisés sont les suivants :

- Moules normalisés $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (figure III.13a),
- Moules normalisés $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ (figure III.13b),



a)



b)

Figure. III. 13 : Moules destinés (a) aux essais mécaniques, (b) à l'essai thermique

Après le coulage du mélange dans les moules, le compactage se fait sur une table vibrante ($t = 30$ s) ; au dernier coup, on rase le niveau des moules pour un bon surfaçage.



Figure. III. 14 : Démoulage et séchage.



Figure. III. 15 : Stockage des éprouvettes

III.5 Étude du comportement mécanique

III.5.1 Mesure du module d'élasticité par ultrasons

Le contrôle par ultrasons par l'intermédiaire de la transmission est la technique la plus utilisée. La vitesse à laquelle l'onde ultrasonique se propage à travers le béton dépend du module de son élasticité et de sa densité [Chiu et al., 2013]. Le module d'élasticité dynamique peut être déterminé par l'équation suivante :

$$E = \rho s V_p^2 \quad (\text{III.3})$$

Où :

E : module d'élasticité (MPa).

ρs : Masse volumique du bloc

$$V_p = \frac{L}{T} \quad (\text{III.4})$$

Où :

V_p : vitesse de propagation du son (km/s).

L : longueur du parcours (mm).

T : durée de l'impulsion pour traverser la longueur (μs).



Figure. III. 16 : Essais ultrasoniques

III.5.2 Résistance à la flexion

Les essais mécaniques sont effectués selon les normes du mortier de ciment (NF EN 196-1) sur des éprouvettes prismatiques de 40 × 40 × 160 mm.

Afin de déterminer la résistance à la flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi-portée (flexion à trois points).

Les éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à rupture à un moment de flexion en appliquant une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte pendant le test est enregistrée.

Le dispositif de flexion standard (Figures III.17 et III. 18) est soumis à une vitesse de charge égale à 1,14 mm/min. Les résultats obtenus (Forces appliquées) nous permettent le calcul de la résistance à la flexion (en MPa) par le biais de la loi suivante :

$$F_s = \frac{1,5.F_f.L}{b^3} \quad (\text{III.5})$$

b : Côté de la section carrée du prisme.

F_f : Force appliquée au milieu du prisme.

L : Distance entre les supports.



Figure. III. 17 : Essai de traction par flexion à trois points.

III.5.3 Résistance à la compression

Les demi-prismes obtenus après le test de flexion ont été utilisés dans le test de compression sur les faces latérales de la section de moulage $40 \times 40 \times 16$ mm. La résistance à la compression a été calculée en utilisant la loi suivante :

$$\sigma_c = \frac{F}{S} \quad (\text{III.6})$$

Avec

F : la force enregistrée au moment de la rupture.

S : Surface du contact dans la presse.

Cette expérience nous montre que nous pouvons utiliser cette brique de terre pour des murs porteurs ou en tant que brique de remplissage.



Figure. III. 18 : Essai de compression sur les demi-prismes de la flexion

III.6 Étude du comportement thermique

III.6.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau est fonction de sa densité et de sa teneur en humidité. Elle caractérise la facilité avec laquelle la chaleur pénètre dans le matériau (Paulus, 2015).

L'expérience de la conductivité thermique a été réalisée au niveau du laboratoire énergétique selon la norme (EN 1745, 2002) et (*Document Technique Réglementaire D.T.R C 3-4*, 1998; Ministère de l'Habitat, 1997) Via l'appareil CT-mètre (figure III.19).



Figure. III. 19 : Appareil Ct-mètre

A. Principe de l'essai

La conductivité thermique est mesurée via un intermédiaire d'un CT-mètre et d'une sonde qui est placée entre deux briques dont la conductivité est à mesurer.

Un paquet de puissance est envoyé à la sonde via le CT-mètre qui se propage à travers le matériau. Pendant le processus d'échauffement, toutes les deux secondes, l'appareil CT-mètre enregistre la température sur la surface de contact.

III.7 Durabilité

III.7.1 Remontée d'eau par capillarité

L'expérience d'absorption d'eau des BTS a été appliquée conformément à la norme NF P10-502. Elle est conçue pour déterminer la quantité d'eau absorbée par la capillarité ; elle est généralement utilisée pour les matériaux en terre cuite et pierres calcaires. Dans cette expérience, nous avons utilisé des moules avec les dimensions $40 \times 40 \times 160$ mm ; les briques sont mises en contact avec de l'eau (profondeur de 1 cm dans l'eau). La quantité d'eau absorbée est déduite par un simple calcul (figure III.20).

Les briques de terre non stabilisées sont très vulnérables à l'eau.

La quantité d'eau absorbée entre 20 et 30 minutes est considérée comme la référence de volume des plus gros capillaires (macrospores) situés sur la surface des BTS (Rabehi, 2013) ; ils sont considérés comme les plus efficaces.

Les façades latérales de la brique sont étanches à l'aide d'un papier isolant en plastique, ce qui oblige l'eau à prendre une direction verticale permettant d'éviter l'évaporation sur les côtés latéraux.

La quantité d'eau absorbée est déterminée par la pesée en série des échantillons à (0, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 h). Les résultats sont présentés par deux facteurs comme suit :

$Z(t)$: la hauteur du front d'imbibition capillaire

$\Delta m(t)/S$: la quantité d'eau absorbée dans l'unité de surface

Le taux d'absorption de l'eau ne doit pas être trop élevé pour éviter un gonflement de la fraction argileuse ou toute perte de cohésion de la brique de terre stabilisée.



Figure. III. 20 : Essai remontée d'eau par capillarité

III.7.2 Gel-dégel

En se basant sur les données climatiques de la région sud-ouest de l'Algérie (climat désertique), l'essai gel-dégel est effectué en deux phases : placer des éprouvettes dans un réfrigérateur à une température de -10°C pendant une période de 12 heures, puis enlever les éprouvettes pour les faire dégeler dans un environnement humide à une température de 55°C pendant une période de 11 heures. L'essai est répété pour 5 cycles de gel-dégel (figure III.21). La perte de poids ainsi que la résistance à la compression et à la traction sont alors calculées et rendues compte dans les diagrammes.



Figure. III. 21 : Conduite de l'essai de gel-dégel

III.7.3 Humidification (mouillage-séchage)

L'objectif de cette étude consiste à analyser la durabilité et la résistance en milieu humide du matériau de terre stabilisée lorsqu'il est exposé à des cycles pluviométriques alternés (saturation hydrique hivernale, dessiccation estivale). Les éprouvettes subissent cinq cycles alternés d'humidification et de dessiccation. Pour constituer un cycle, elles doivent être immergées dans l'eau pendant vingt-quatre heures, puis séchées en étuve durant vingt-trois heures à une température de cent cinq degrés Celsius (figure III.22). Lors du cycle final, elles seront soumises aux tests d'écrasement, incluant la compression et la traction par flexion.



Figure. III. 22 : Conduite de l'essai d'humification-séchage

III.7.4 Attaque chimique (SDS)

Cet essai est pour déterminer la résistance chimique du bloc de terre stabilisée vis-à-vis des solutions agressives. Les éprouvettes sont immergées dans une solution de concentration de 2 % de sulfate de sodium (Na_2SO_4), pendant 12 jours d'immersion continue (figure.III.23), après, elles seront soumises aux essais d'écrasement.



Figure. III. 23 : Éprouvettes immergées dans la solution de Na_2SO_4

III.7.5 Essai d'attaque de l'eau (H_2O)

C'est un essai complémentaire à l'essai d'attaque chimique, qui consiste à immerger totalement les éprouvettes dans un bassin d'eau potable pendant 12 jours (figure III.24), dans le but de faire une comparaison entre les dangers des deux milieux. Finalement, l'ensemble des éprouvettes est soumis aux essais d'écrasement.



Figure. III. 24 : Éprouvettes immergées dans la solution de H₂O

III.8 Conclusions

La série d'essais de caractérisation présentée dans ce chapitre a permis de définir de manière rigoureuse les propriétés fondamentales des matières premières et des matériaux élaborés à base de terre crue. Les essais d'identification, tels que l'analyse chimique, la granulométrie, les limites d'Atterberg, le test Proctor et les essais spécifiques comme l'indice de bleu de méthylène, ont fourni une évaluation précise de la composition et de la répartition fractions du sol, éléments essentiels pour comprendre le comportement des matériaux en conditions réelles.

L'étude expérimentale des comportements mécaniques et thermiques des éprouvettes a permis de quantifier des paramètres clés – tels que la résistance à la compression et à la flexion ainsi que la conductivité, la diffusivité et l'effusivité thermiques – qui conditionnent la performance des briques en terre crue dans des applications structurales et isolantes. En parallèle, les essais de durabilité (capillarité, gel-dégel, humidification, attaques chimiques) ont mis en lumière la sensibilité de ces matériaux aux facteurs environnementaux, soulignant la nécessité de solutions appropriées d'étanchéité ou d'enduit pour assurer leur longévité.

Dans l'ensemble, les résultats de ces essais constituent une base expérimentale solide qui guide à la fois le choix des formulations de matériaux et les stratégies de mise en œuvre pour optimiser les performances des briques en terre crue. Ils éclairent également les démarches de normalisation et d'intégration de ces matériaux durables dans la construction moderne.

Chapitre IV : Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction

À travers ce chapitre, nous présentons et interprétons les résultats à l'issue des essais d'identification et de caractérisation menés aux laboratoires de l'université d'Adrar, de l'université de Béchar, Laboratoire de LTPS, Laboratoire LTPO, Laboratoire d'Agriculture d'Adrar et de CNERIB.

Au premier temps, l'identification de la terre du ksar Tamantit, du sable de dune et de l'argile d'Adrar a été entamée et finalisée par une classification intéressante.

En second lieu, nous avons commencé par la caractérisation des compositions d'étude selon les trois propriétés : mécaniques, hydriques et thermiques. Puis, on a analysé le comportement mécanique de nos échantillons après l'application de différents essais de durabilité.

Ce chapitre est clos par une synthèse mettant en récapitulatif l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus.

IV.2 Essais chimiques

IV.2.1 Analyse chimique

Le tableau.IV.1, montre les résultats d'analyse chimique sommaire de la terre du Ksar Tamantit

Tableau. IV. 1 : Analyse chimique de la terre du Ksar Tamentit.

Echantillon	Carbonates CO_3^{2-}	Sulfate SO_4^{2-} (%)	Chlorure Cl^- (%)	Insoluble (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , ...) (%)
Terre	-	0.77	0.28	98.95
Argile	-	0.49	0.14	99.37

Ces résultats attestent que la terre du Ksar Tamantit est classée comme un matériau non calcaire, à raison de la teneur en carbonate de calcium est inférieur à 10% [NF P 94-048] et elle ne contient pas des éléments nocifs, car le dosage du sulfate obtenu est réparti dans la masse du matériau sous forme des grains fins (traces). L'existence du chlorure dans le matériau est se forme dissimulée. Le chlorure est un agent agressif, ces minéraux comportant Cl ne se brisent pas facilement ou en contact avec l'eau dans le sol, donc sa libération est très lente.

L'échantillon contient une quantité importante de silice, provenant généralement des silicates d'alumine et du quartz. Elle possède probablement aussi une forte concentration en Al_2O_3 , liée généralement aux minéraux argileux et contribue à l'obtention d'une bonne plasticité. La présence des oxydes de fer communique au matériau terre la couleur rouge.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.2.2 Bleu méthylène

La valeur au bleu de méthylène obtenue (VBS) est égale à 5,5 %, cela implique que la terre du ksar Tamantit est classée entre sol limoneux – argile et sol argileux NF 933-9.

L'argile d'Adrar indique une valeur de (VBS) égale à 8% alors son lassé comme sol argileux NF 933-9.

IV.3 Essais minéralogiques

IV.3.1 Diffraction des rayons X

Les figures IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, et IV.5 montrent les résultats d'analyse minéralogique sommaire de la terre du Ksar Tamantit, Argile d'Adrar, sable de dune, sciures de bois, et cocos d'arachide.

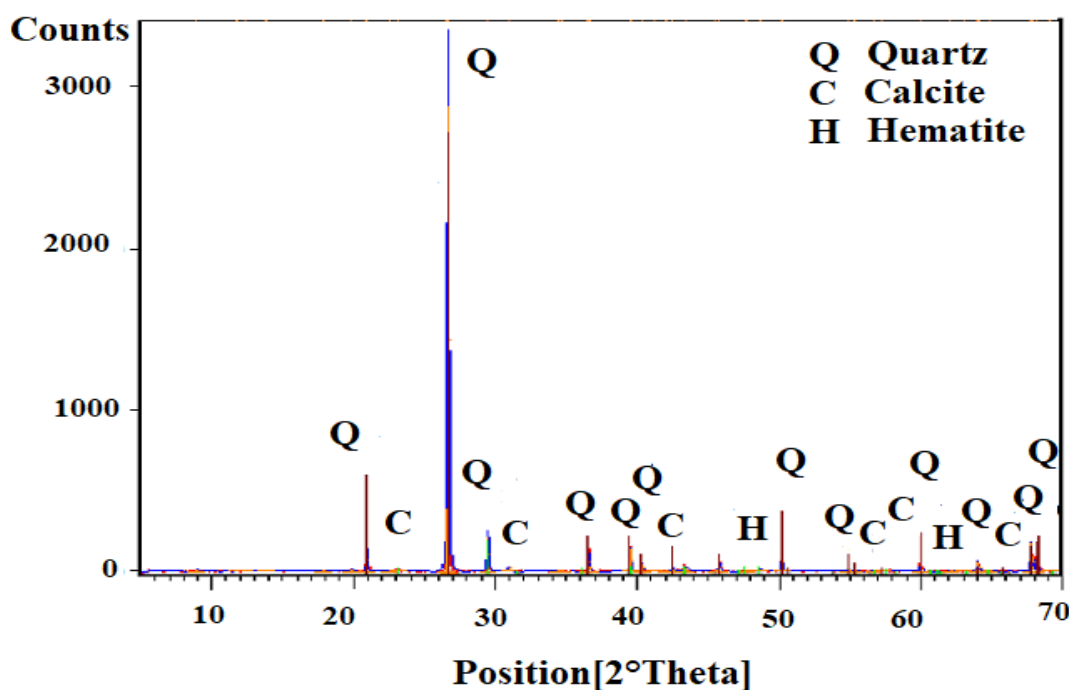


Figure. IV. 1 : Spectrographe de diffraction des rayons X (DRX) du sol, accompagné de l'identification des minéraux constitutifs.

La figure IV.1 révèle que le matériau est principalement constitué de quartz, avec des quantités modérées de calcite et de faibles concentrations d'halite.

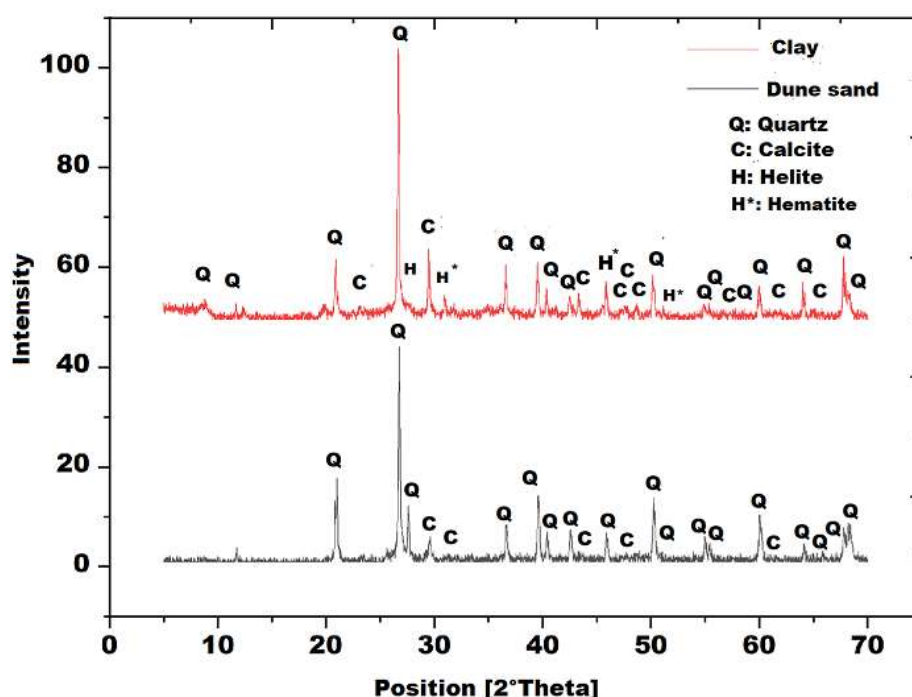


Figure. IV. 2 : Spectrographe de diffraction des rayons X (DRX) d'argile et du sable de dune, accompagné de l'identification des minéraux constitutifs.

La figure IV.2 révèle que l'argile est principalement constituée de quartz (SiO_2), avec des quantités modérées de calcite (CaCO_3) et de faibles concentrations d'halite (NaCl) et d'hématite (FeO_3). Par contre, le sable est très riche en quartz et en calcite.

La figure IV.3 présente le diagramme de diffraction des rayons X de la poudre de coque d'arachide qui a mis en évidence la présence d'un pic caractéristique de cellulose cristalline aux environs de $22^\circ 2\theta$. Par ailleurs, des signaux plus larges ont suggéré l'existence de régions amorphes. En comparaison, l'analyse de l'échantillon de sciure de bois a révélé un pic principal de cellulose à $22,6^\circ 2\theta$, ainsi que des pics additionnels observés de 15° à 18° et aux environs de 35° , lesquels correspondent principalement aux composants amorphes tels que l'hémicellulose et la lignine. Selon Edward M. Rubin (2008), les coques d'arachide, considérées comme des matériaux lignocellulosiques, se composent de cellulose (40–65 %), d'hémicellulose (3–15 %) et de lignine (26–36 %). En outre, le tableau 5 met en évidence que la densité de la sciure de bois est inférieure à celle des coquilles d'arachide.

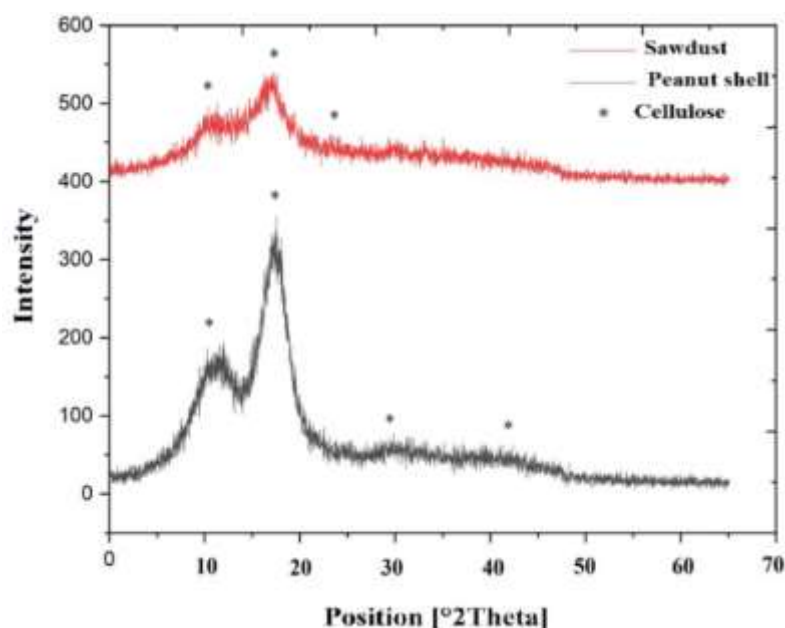


Figure. IV. 3 : Spectrographe de diffraction des rayons X (DRX) de coque d'arachide et de sciure de bois, accompagné de l'identification des minéraux constitutifs.

IV.4 Essais physiques

IV.4.1 Analyse granulométrique

La figure 4.4 révèle que la majorité de la courbe noire, qui représente le sol examiné, se situe à l'intérieur de l'intervalle défini par la norme (Afnor. XP P13–901, 2001) , tel que rapporté par (Akhzeroun et al., 2023; Taallah et al., 2014). En outre, l'analyse granulométrique présentée dans le tableau 4.2 révèle que le matériau de sol utilisé dans cette étude se compose de particules à granulométrie fine. Le tableau. IV. 5. Présente les propriétés physico-chimiques du sol, ainsi que les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité et indice de plasticité), lesquelles ont également été déterminées expérimentalement. Les données présentées dans le tableau IV.4 indiquent que le sol du site de Tamantit présente des caractéristiques compatibles avec une utilisation dans des applications exigeant une certaine plasticité, l'indice de plasticité (I_p) se situant entre 3 et 5,81 % et 15. Ce sol se révèle être un matériau adéquat pour la fabrication d'éléments de maçonnerie destinés aux murs et aux cloisons, en vue de résister aux contraintes et aux sections endommagées, en raison de sa densité élevée et de sa faible plasticité, conformément aux limites d'Atterberg.

Chapitre IV : Résultats et discussions

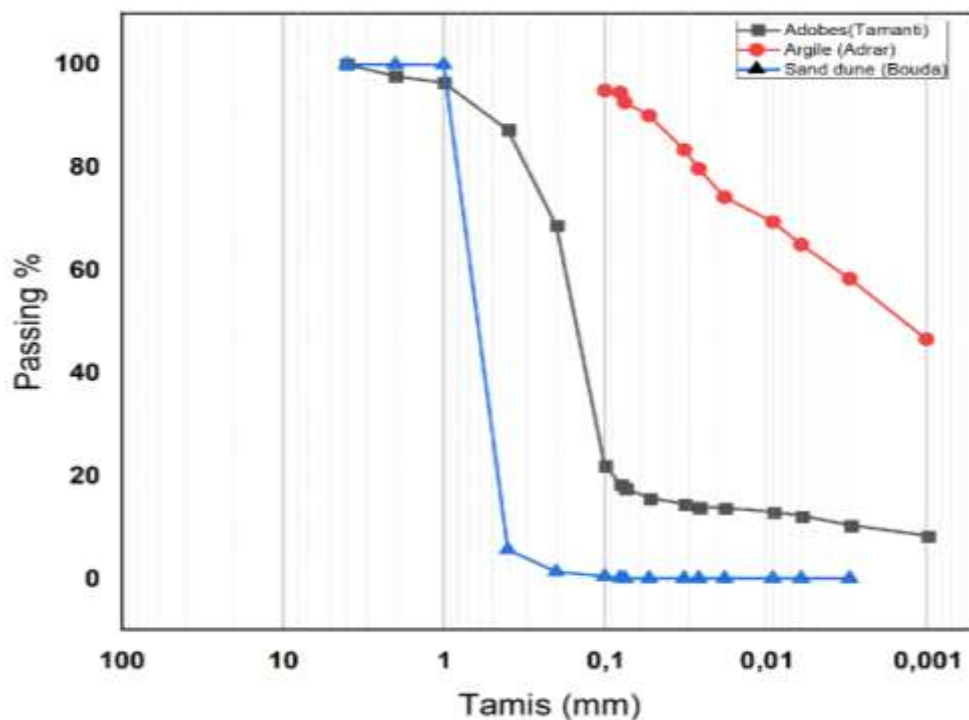


Figure. IV. 4 : Courbe granulométrique de la terre du Ksar Tamantit, argile, et sable de dune

Le tableau IV.2 résume les paramètres issus de cette courbe granulométrique.

Tableau. IV. 2 : Paramètres de la granulométrie de la terre du Ksar Tamantit

Paramètres	Valeur	Observation
Module de finesse	$Mf_{\text{Terre}} = 1.23$	-
	$Mf_{\text{Sable}} = 2.37 (2,2 < Mf < 2,8)$	Sol de meilleure qualité granulaire
Coefficient de courbure	$Cc = 2.2 (1 < Cc < 3)$	Granulométries bien graduée

IV.4.2 Masses volumiques

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau. IV. 3 : Résultats de la masse volumique apparente et absolue

Echantillon	Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)
Terre de ksar Tamentit	2.61	1.4
Sable de dune	2.64	1.5
Argile	2.58	-

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.4.3 Essai d'équivalent de sable

Tableau. IV. 4 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable.

Echantillon	Équivalent de sable visuel ESV _{moy} (%)	Équivalent de sable piston ESP _{moy} (%)
Terre de ksar Tamentit	45.84	40.26
Sable de dune	95	90

Ces pourcentages nous informent de la quantité importante de fines contenus dans la terre d'adobe du Ksar Tamentit.

IV.4.4 Limites d'Atterberg

Le tableau IV.5 expose les limites d'Atterberg, de même que l'indice de plasticité, l'indice de liquidité et l'indice de consistance correspondants à l'échantillon analysé. L'indice de plasticité (IP) correspond à l'écart entre la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP), représentant l'amplitude de la plage de plasticité et caractérisant la teneur en argile des sols. L'indice de liquidité à la norme XP CEN ISO/TS 17892-12, 2005). Il exprime le rapport entre l'écart de teneur en eau et la limite de plasticité, ainsi que la valeur de l'indice de plasticité. Il constitue un indicateur de l'état de consistance d'un sol ainsi que du degré d'adhérence entre les particules, ce que confirme également l'indice de consistance : $IL=1-IC$

Tableau. IV. 5 : Paramètres définis de l'état de consistance d'Adobe.

	Argile (%)	Terre de ksar T (%)
Limite de liquidité WL	60.21	19.23
Limite de plasticité Wp	32.42	13.42
Indice de plasticité Ip	27.79	5.81

IV.4.5 Absorption d'eau

L'absorption d'eau des coques d'arachide et de sciure de bois est l'un des paramètres déterminants pour une utilisation future comme renfort des adobes. La courbe d'absorption (Figure 6) montre qu'après 72 heures, l'eau absorbée représente environ 282,8 % en poids de la masse d'essai pour la sciure de bois et l'eau absorbée représente environ 187,2 % en poids de la masse d'essai pour la coquille d'arachide. Cette essentielle capacité des coques d'arachide à absorber l'eau pourrait être un avantage pour produire des adobes régulant l'humidité. L'absorption d'eau des coques d'arachide est supérieure à celle des fibres de palmier et de sisal

Chapitre IV : Résultats et discussions

(Laborel-Préneron et al., 2016), mais semblable à celle des fibres de datte et plus faible que l'absorption d'eau de la paille d'orge et des agrégats de bois (Laborel-Préneron et al., 2016).

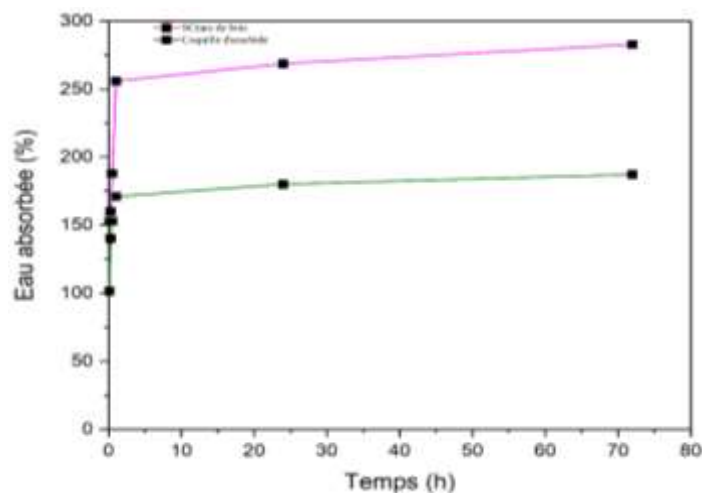


Figure. IV. 5 : Absorption d'eau par les coquilles d'arachide et la sciure de bois.

IV.5 Caractérisation physique (Masse volumique)

Les résultats exposés par la suite (figure IV.6) sont les moyens de mesure des masses volumiques de trois échantillons par composition (équivalant à 6 échantillons mesurés) :

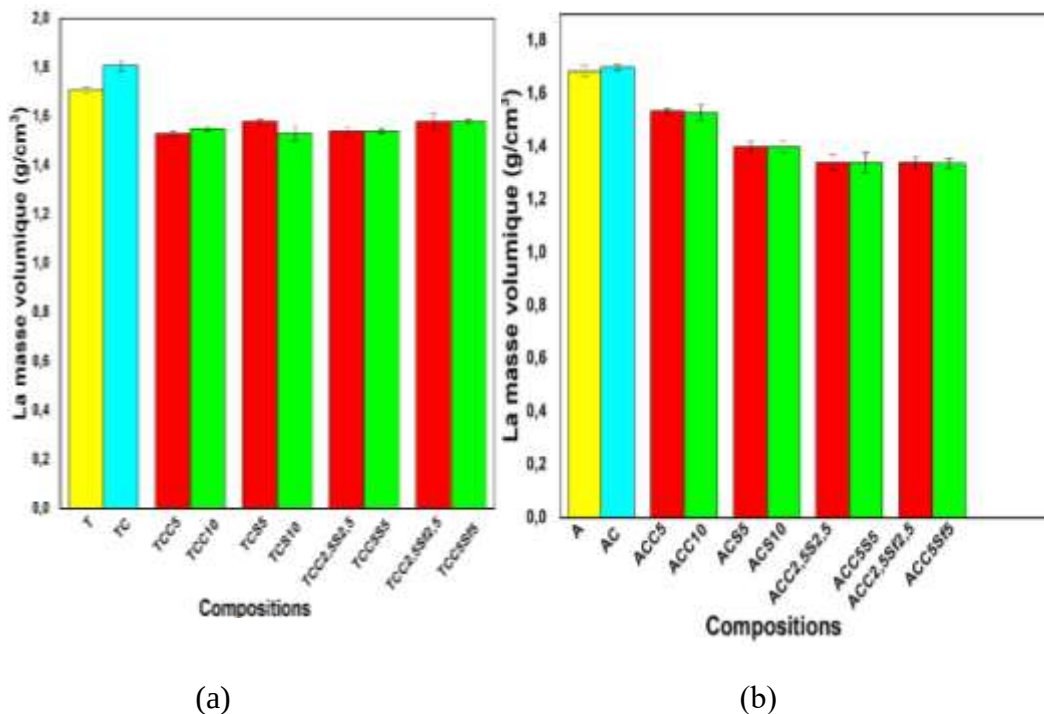


Figure. IV. 6 : Masses volumiques des différentes compositions du BTS (a) adobe recyclé, (b) nouveau adobe à 28 jours

Chapitre IV : Résultats et discussions

a) Pour brique de terre crue (Toub) recyclé

La densité des BTS a été mesurée conformément à la norme européenne (UNI EN 1015-10, 2007) (Figure IV.7), à partir d'échantillons séchés à l'étuve à 105 ± 5 °C. Trois échantillons de chaque type de mélange ont été évalués, et la densité a été déterminée en divisant la masse sèche (g) par le volume géométrique ($4 \times 4 \times 16$ cm³). L'ajout de 10 % de ciment blanc et de 5 % de coquille d'arachide (C) a entraîné une réduction de densité de 0,11 % pour TCC₅, tandis que TCC₁₀ n'a présenté aucune variation. Des diminutions de densité de 0,08 % et 0,11 % ont été enregistrées pour TCS₅ et TCS₁₀, respectivement. De plus, lorsque les mélanges contenaient à la fois de la coquille d'arachide (C) et de la sciure de bois (S), qu'elle soit fine ou fibreuse, la densité diminuait d'environ 0,1 % pour TCC_{2.5}S_{2.5}, TCC_{2.5}S_{2.5}^f et TCC₅S₅^f.

En résumé, la masse volumique de toutes les compositions s'échelonne entre 1,807 et 1,530 g/m³, soit 15,33 % de différence entre le min et le max. Cette proportion reste supérieure à 5 % en comparaison avec le témoin (adobe non stabilisé et non renforcé) ; ce qui confirme que l'ajout de stabilisant ou d'additifs organiques sous différentes formes influence directement la densité de l'adobe, notamment avec un taux acceptable d'additifs organiques. On souligne aussi, que cette légère différence de valeurs des densités obtenues pourra être liée à la mise en œuvre des éprouvettes et aux conditions des essais. En particulier, pour ce type de matériau, il est difficile d'avoir la même masse volumique après durcissement puisque le séchage se fait naturellement.

b) Pour brique de terre crue nouveau (Toub)

La première remarque qu'on peut tirer, est que les masses volumiques les plus faibles enregistrées sont celles des compositions stabilisées et renforcées avec de la sciure de bois comme fibre et de la coquille d'arachide ACC₅S₅^f (descente jusqu'au 1,336 g/m³), qui peuvent avoir créé une porosité élevée dans le matériau.

Il est observé aussi qu'en première position viennent les compositions non stabilisées et renforcées par des additifs organiques non traités (densités plus faibles). Ces résultats reflètent la quantité d'eau absorbée par les additives organiques.

Le tableau IV.6 ci-dessous résume les valeurs trouvées de la masse volumique :

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau. IV. 6 : Résultats de la masse volumique en [g/m³]

Compositions	Masse volumique (g/cm ³)	Compositions	Masse volumique (g/cm ³)
T	1,709	A	1,685
TC	1,807	AC	1,700
TCC ₅	1,582	ACC ₅	1,535
TCS ₅	1,534	ACS ₅	1,398
TCC _{2,5} S _{2,5}	1,537	ACC _{2,5} S _{2,5}	1,340
TCC _{2,5} S _{2,5} ^f	1,583	ACC _{2,5} S _{2,5} ^f	1,339
TCC ₁₀	1,550	ACC ₁₀	1,529
TCS ₁₀	1,530	ACS ₁₀	1,398
TCC ₅ S ₅	1,540	ACC ₅ S ₅	1,340
TCC ₅ S ₅ ^f	1,580	ACC ₅ S ₅ ^f	1,336

IV.6 Caractérisation mécanique avant les essais de durabilité

IV.6.1 Mesure du module d'élasticité par ultrasons

Les graphiques ci-dessus présentent l'évolution du module de Young (en MPa) de différentes compositions des briques de terre crue. On observe que, pour chaque série de compositions, l'ajout progressif de charges et/ou de fibres entraîne une diminution significative du module de Young, traduisant une réduction de la rigidité du matériau. Par exemple, dans la première série (à gauche), le matériau TC présente la valeur la plus élevée du module de Young (207,22 MPa), tandis que l'incorporation croissante de TCC et de TCCS entraîne une baisse marquée de ce paramètre, atteignant 23,75 MPa pour la composition TCC₅S₅^f. Une tendance similaire est observée pour la seconde série (à droite), où la composition AC montre également la rigidité la plus élevée (192,15 MPa), qui diminue progressivement avec l'ajout de charges et de fibres, jusqu'à 18,34 MPa pour ACC₅S₅^f.

Cette réduction du module de Young avec l'augmentation de la fraction massique des charges et/ou des fibres peut s'expliquer par la diminution de la cohésion matricielle et l'introduction de phases moins rigides, comme cela a été largement rapporté dans la littérature sur les bio-composites (George et al., 2001). En effet, l'incorporation de charges et de fibres naturelles dans une matrice polymère entraîne généralement une baisse du module de Young lorsque l'interface fibre/matrice n'est pas optimisée ou lorsque la fraction volumique de la phase rigide reste insuffisante pour compenser la perte de cohésion globale du matériau.

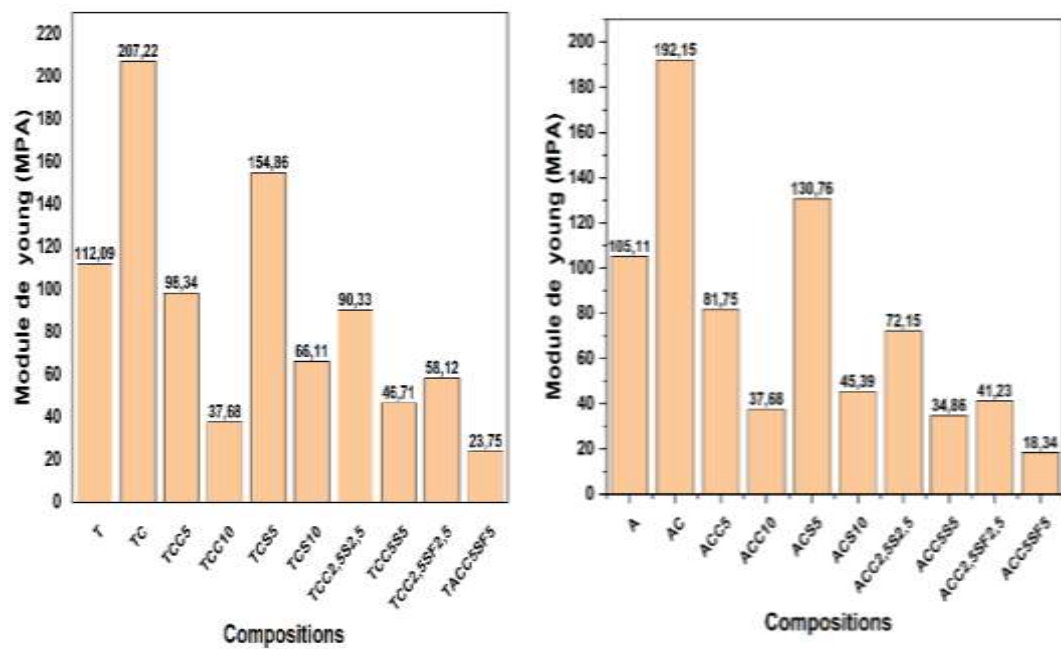


Figure. IV. 7 : Module de Young des différentes compositions du BTS (adobe recyclé), et nouvel Adobe après 28 jours

IV.6.2 Essai de traction par flexion

La figure.IV.8, représente les résultats de la moyenne de trois essais de traction par flexion à trois points :

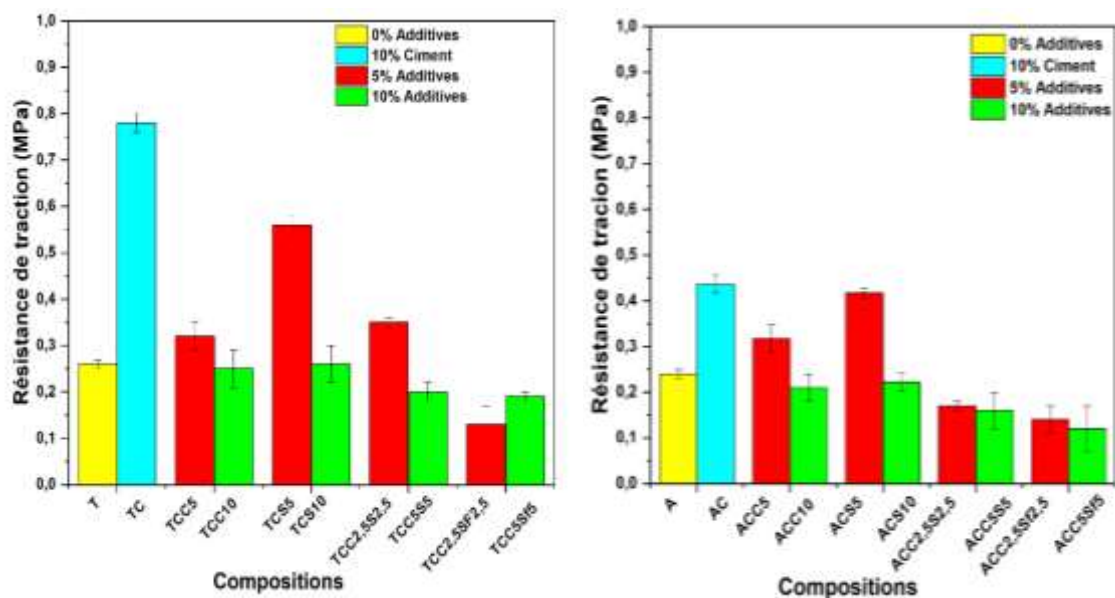


Figure. IV. 8 : Résistance à la traction par flexion trois points après 28 jours

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau. IV. 7 : Résultats de l'essai de traction après 28 jours

Compositions	Resistance à la traction (MPa)	Compositions	Resistance à la traction (MPa)
T	0,26	A	0,24
TC	0,78	AC	0,437
TCC ₅	0,32	ACC ₅	0,317
TCS ₅	0,56	ACS ₅	0,417
TCC _{2,5} S _{2,5}	0,35	ACC _{2,5} S _{2,5}	0,172
TCC _{2,5} S _{2,5} ^f	0,13	ACC _{2,5} S _{2,5} ^f	0,140
TCC ₁₀	0,25	ACC ₁₀	0,210
TCS ₁₀	0,26	ACS ₁₀	0,222
TCC ₅ S ₅	0,20	ACC ₅ S ₅	0,160
TCC ₅ S ₅ ^f	0,19	ACC ₅ S ₅ ^f	0,120

Les deux graphiques illustrent l'évolution de la résistance à la traction (gauche) et de la résistance à la flexion (droite) pour diverses compositions de composites à base de coquille d'arachide (p) et de sciure de bois (s), en fonction de l'ajout d'additifs, dont le ciment. On remarque que les matériaux de référence (T et A) présentent les performances mécaniques initiales les plus élevées en traction et en flexion. Cependant, pour la plupart des formulations à base de déchets lignocellulosiques (coque d'arachide et sciure), l'incorporation de 10 % de ciment (barres rouges) améliore notablement la résistance mécanique par rapport aux composites sans additif ou avec des additifs organiques. À l'inverse, l'ajout d'additifs organiques (5 % et 10 %) tend à réduire, voire à maintenir, les valeurs de résistance mécanique à des niveaux inférieurs.

Cette amélioration observée avec le ciment peut être attribuée à son rôle de liant, favorisant la cohésion entre les particules de coquille d'arachide et de sciure, limitant ainsi les défauts d'interface et la propagation des fissures sous sollicitation mécanique. De plus, ces résultats confirment que la valorisation des déchets agricoles (coquille d'arachide) et forestiers (sciure de bois) comme renforts dans des matrices cimentaires peut permettre d'obtenir des matériaux composites présentant des propriétés mécaniques accrues, à condition d'optimiser la formulation et les taux d'additifs organiques.

IV.6.3 Essai de compression

La figure.IV.9, représente les résultats de la moyenne d'au moins quatre essais de compression sur demi-prisme de 4×4×16 cm³ :

À travers une lecture générale de deux graphes (figures. IV.9), on remarque que :

Chapitre IV : Résultats et discussions

Pour 10% de ciment :

- L'ajout de stabilisant aux blocs non fibrés (TC), augmente les deux résistances par un taux atteignant 192,59 % et 314,01 % à la traction et à la compression respectivement.
- L'ajout de stabilisant aux blocs non fibrés (AC), augmente les deux résistances par des taux atteignant 8,79 % et 159,64 % à la traction et à la compression respectivement.

Pour 5% des additives :

- En remarquant la valeur excellente, c'est pour la sciure de bois (TCS₅) avec une valeur de 2,110 MPa et 7,370 MPa à la traction et à la compression respectivement.

Pour 10% des additives :

- La mixture de la sciure de bois comme fine (TCC₁₀) donne d'une valeur acceptable en traction 0,26 MPa et la coquille d'arachides (TCS₁₀) 3,151 MPa en compression

En résumé pour les deux types de briques de terre crue on sélectionne le brique recyclé c'est le meilleur dans la comparaison :

- L'ajout de 10% de ciment augmente les performances mécaniques de 2 570 à 10 640 MPa et de 0,26 à 0,78 MPa
- L'ajout des fines des sciures de bois à 5% à la formulation des briques de terre crue augmente la résistance de toutes les compositions à la compression (environ 186,770% d'augmentation) par rapport à la composition témoin (terre seule)

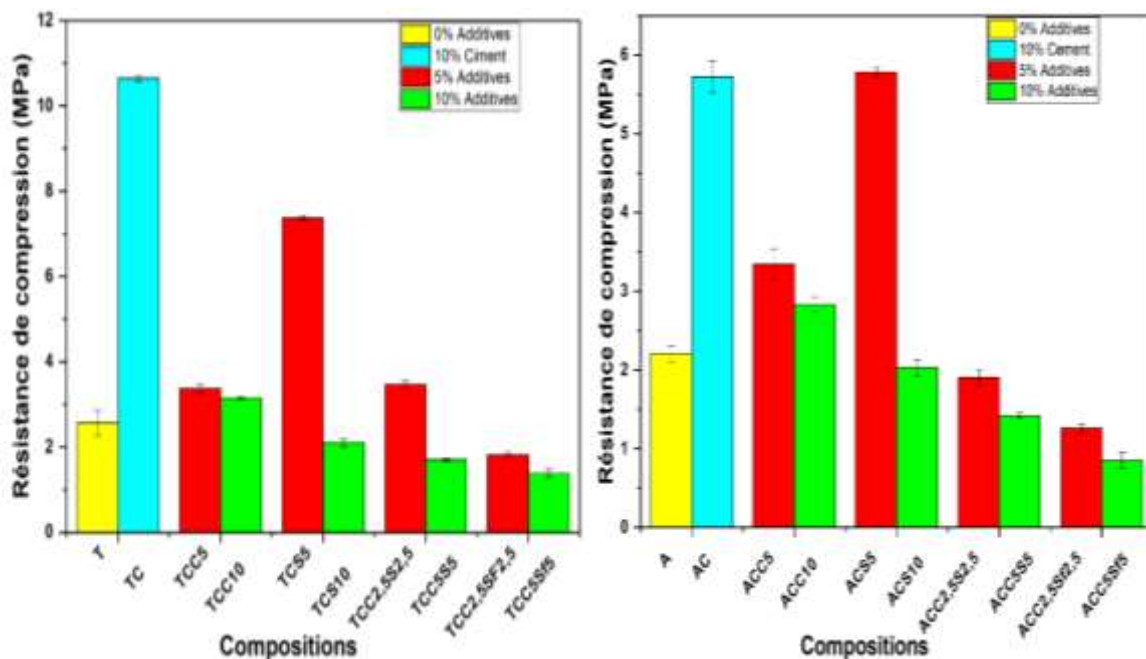


Figure. IV. 9: Résistance à la compression après 28 jours

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau. IV. 8 : Résultats de l'essai de compression simple après 28 jours

Compositions	Résistance de compression simple (MPa)	Compositions	Résistance de compression simple (MPa)
T	2,570	A	2,205
TC	10,640	AC	5,725
TCC ₅	3,370	ACC ₅	3,343
TCS ₅	7,370	ACS ₅	5,783
TCC _{2,5} S _{2,5}	3,470	ACC _{2,5} S _{2,5}	1,907
TCC _{2,5} S _{2,5} ^f	1,822	ACC _{2,5} S _{2,5} ^f	1,26
TCC ₁₀	3,151	ACC ₁₀	1,529
TCS ₁₀	2,110	ACS ₁₀	1,398
TCC ₅ S ₅	1,703	ACC ₅ S ₅	1,340
TCC ₅ S ₅ ^f	1,384	ACC ₅ S ₅ ^f	1,336

IV.7 Caractérisation thermique

IV.7.1 Conductivité thermique

Sur la figure.IV.8, nous avons présenté l'illustration graphique des résultats de mesures de la conductivité thermique effectuées sur l'ensemble des échantillons :

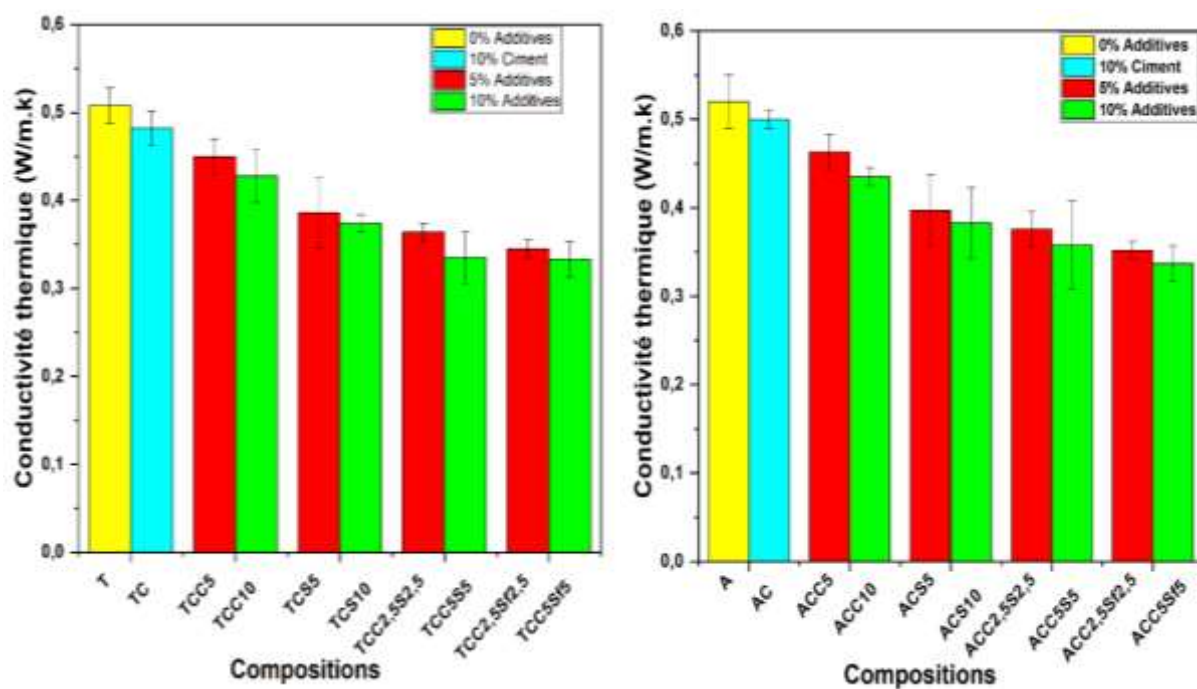


Figure. IV. 10: Conductivité thermique en W/m. K

Chapitre IV : Résultats et discussions

L'évolution de la conductivité thermique en fonction du type de brique de terre crue et des différents additifs est présentée :

- La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage d'additifs, passant de 0,520 à 0,337 W/m. K pour la brique de terre crue (nouvelle).
- La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage d'additifs à partir de 0,508 W/m. K (pour témoin) à 0,333 W/m. K pour la brique de terre crue (recyclée).
- L'ajout de la fibre de sciure de bois et les fines de coquille d'arachide en 10% donne
- Une bonne conductivité thermique.

IV.7.2 Chaleur spécifique

Les deux graphiques illustrent l'évolution de la chaleur spécifique ($\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$) de différents composites élaborés à partir de fine coquille d'arachide (C), de fine sciure de bois (S) et de sciure de bois fibre (S^f). On observe que le matériau témoin (TC et A) présente la valeur la plus élevée de chaleur spécifique (respectivement 1550,9 et 1530,3 $\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$). L'introduction de fines particules de coquille d'arachide et de sciure de bois dans la matrice entraîne généralement une légère diminution de la chaleur spécifique, avec des valeurs comprises entre 1203,6 et 1459,4 kJ/m^3 . Selon la composition.

Cependant, il est à noter que certaines formulations (par exemple TCC_5S_5^f ou ACC_5S_5^f) montrent une remontée de la chaleur spécifique, suggérant que la combinaison de différents types de renforts lignocellulosiques (particules et fibres) permet d'optimiser la capacité calorifique du composite. Ce comportement peut être attribué à la synergie entre la structure cellulosique des fibres et la dispersion homogène des particules fines, favorisant ainsi le stockage et la dissipation de la chaleur.

Ces résultats indiquent que l'utilisation de sous-produits agricoles et forestiers, tels que la fine coquille d'arachide et la sciure de bois (sous forme de particules ou de fibres), permet de moduler la capacité thermique des composites biosourcés, ouvrant ainsi la voie à des applications innovantes dans le domaine de l'isolation thermique durable.

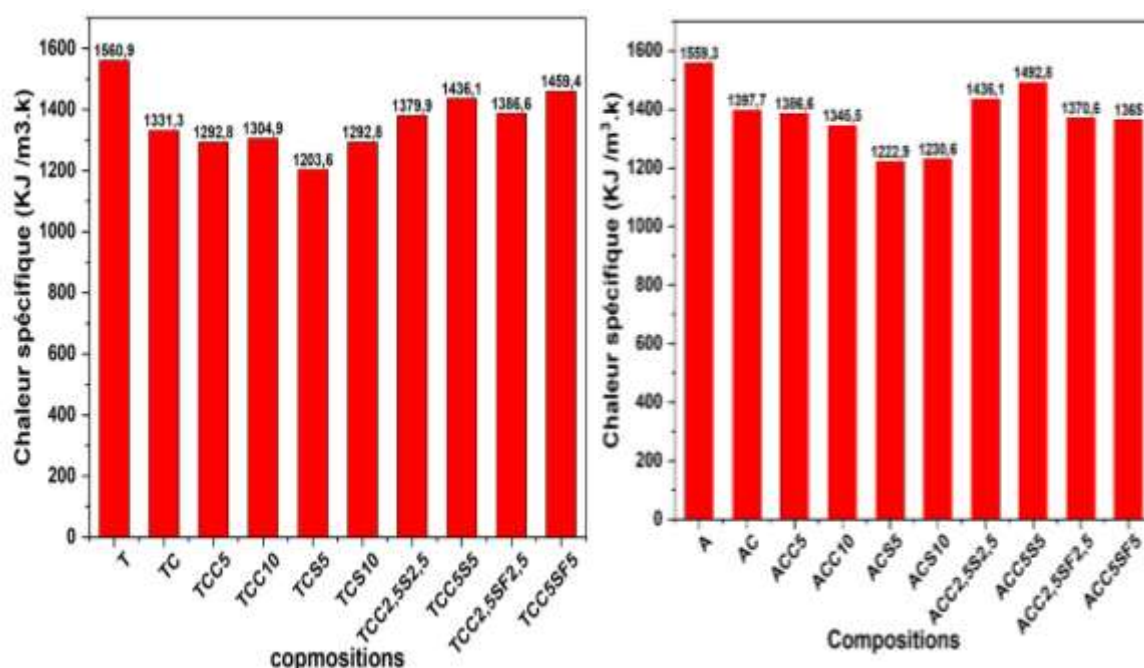


Figure. IV. 11 : Chaleur spécifique en kJ/m³. K

IV.8 Caractérisation physique après 120 jours

IV.8.1 Remontée d'eau par capillarité

Les deux graphiques (Figure. IV.12) représentent l'évolution de la masse d'eau absorbée (g/cm²) en fonction du temps pour différentes formulations de composites intégrant de la fine coquille d'arachide (C), de la fine sciure de bois (S) et de la sciure de bois fibre (S^f). Globalement, tous les composites montrent une augmentation de l'absorption d'eau avec le temps, caractéristique typique des matériaux lignocellulosiques en raison de la présence de groupes hydrophiles dans leur structure.

Sur le premier graphique (TC et ses dérivés), on observe que l'incorporation de particules et fibres de sciure de bois et de coquille d'arachide accentue la capacité d'absorption d'eau du composite, en particulier pour les formulations à plus forte teneur en renforts (ex. TCC₅S₅^f). Cette élévation est attribuée à l'augmentation de la porosité et à la présence de canaux capillaires favorisés par la structure fibreuse des ajouts.

Le second graphique figure IV. 11(AC et autres compositions) confirme la tendance générale, avec des composites contenant une plus forte proportion de fibres de sciure (ACC₅S₅^f) affichant également une absorption d'eau maximale. Les composites à faible taux de renfort ou sans fibre (ex. ACC₅S₅, ACC_{2.5}S_{2.5}) présentent une moindre absorption, traduisant un effet barrière plus important de la matrice d'origine.

Ces résultats mettent en évidence l'impact du type et du pourcentage de renforts biosourcés sur la perméabilité à l'eau des composites. L'optimisation du procédé et des traitements de surface

Chapitre IV : Résultats et discussions

pourrait être envisagée pour limiter l'absorption d'eau, augmenter la durabilité et ouvrir la voie à des applications dans le bâtiment ou d'autres secteurs exposés à l'humidité.

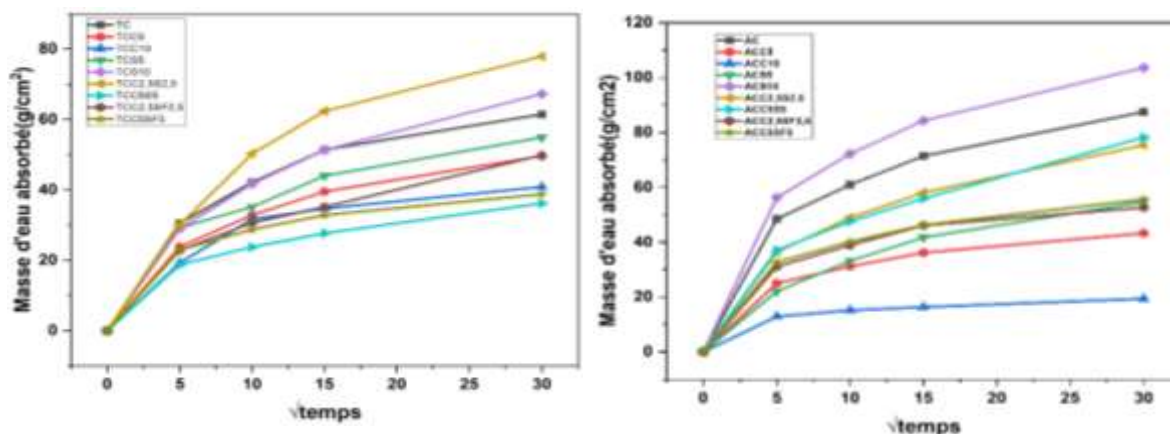


Figure IV. 12: Masse d'eau d'absorption



Figure IV. 13: Délitement des éprouvettes de béton de terre non stabilisé après l'immersion dans l'eau

IV.9 Caractérisation mécanique après essais de durabilité

IV.9.1 Essai de gel-dégel

A) Résistance à la traction

Le tableau IV.9 regroupe les résultats de la résistance à la traction des éprouvettes étudiées après l'application de cinq cycles de gel-dégel sur ces éprouvettes :

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau. IV. 9 : Résultats de l'essai de traction après l'essai de gel-dégel

Compositions	Resistance à la traction (MPa)	Compositions	Resistance à la traction (MPa)
T	0,27	A	0,3
TC	0,85	AC	0,602
TCC ₅	0,29	ACC ₅	0,33
TCS ₅	0,59	ACS ₅	0,557
TCC _{2.5} S _{2.5}	0,3	ACC _{2.5} S _{2.5}	0,18
TCC _{2.5} S _{2.5} ^f	0,11	ACC _{2.5} S _{2.5} ^f	0,12
TCC ₁₀	0,24	ACC ₁₀	0,19
TCS ₁₀	0,23	ACS ₁₀	0,26
TCC ₅ S ₅	0,25	ACC ₅ S ₅	0,15
TCC ₅ S ₁₀ ^f	0,1	ACC ₅ S ₅ ^f	0,12

A partir de la figure IV.14 ci-dessous, il ressort que :

- La différence entre les valeurs de résistance avant et après le passage des éprouvettes dans les cinq cycles de gel-dégel est très faible pour le cas des briques de terre crue témoin (T, A), aussi bien pour les deux types de briques que pour les cas d'ajout de 10 % de coquilles d'arachide et de sciure de bois, d'une forme différente, ainsi que pour les assemblages entre les deux additifs organiques.
- Pour les cas 10% de ciment en remarque une petite augmentation de résistance dans le brique de terre crue recyclé à partir 0.78 à 0.85 MPa

En résumé, l'ajout de sciures de bois et de coquilles d'arachide aux briques de terre crue stabilisées ou non stabilisées par le ciment n'a pas d'effet sur le comportement mécanique de l'adobe après les cycles de gel-dégel. Par contre, parfois on observe un effet positif de leurs ajouts aux compositions stabilisées par ciment seul.

Chapitre IV : Résultats et discussions

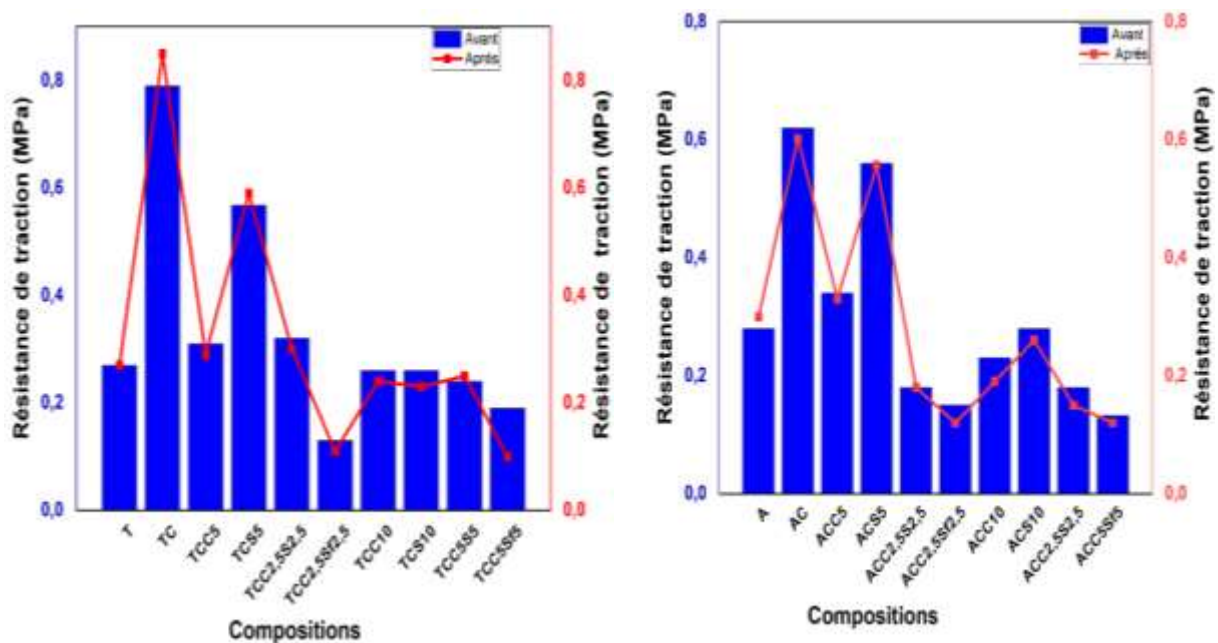


Figure. IV. 14: Résistance à la traction avant et après l'essai de gel-dégel

B) Résistance à la compression

Les résultats de cet essai sont ordonnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau. IV. 10 : Résultats de compression après l'essai de gel-dégel

Compositions	Résistance de compression (MPa)	Compositions	Résistance de compression (MPa)
T	2,53	A	1,77
TC	11,465	AC	6,2
TCC ₅	3,14	ACC ₅	2,98
TCS ₅	7,31	ACS ₅	5,96
TCC _{2.5} S _{2.5}	2,265	ACC _{2.5} S _{2.5}	2,45
TCC _{2.5} S _{2.5} ^f	1,85	ACC _{2.5} S _{2.5} ^f	1,335
TCC ₁₀	3	ACC ₁	2,73
TCS ₁₀	1,755	ACS ₁₀	2,98
TCC ₅ S ₅	1,76	ACC ₅ S ₅	1,92
TCC ₅ S ₅ ^f	1,46	ACC ₅ S ₅ ^f	1,325

En comparaison des résultats obtenus avec ceux des échantillons sains, on obtient la figure.IV.15, permettant de souligner les points suivants :

Chapitre IV : Résultats et discussions

- Les compositions stabilisées par le ciment ont eu une augmentation considérable de la résistance à la compression après le passage de cinq cycles de gel-dégel. Cette augmentation est due à la carbonatation du ciment ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui se carbonate par absorption du dioxyde de carbone de l'air. Il se forme du carbonate de calcium, CaCO_3 . Cette réaction forme une croûte superficielle de carbonate de calcium. Quand le bloc se craquelle, le ciment sous-jacent se retrouve à son tour à l'air et se carbonate. Cette réaction n'est possible qu'en présence d'eau.

Pour 5% des additifs la meilleure valeur :

- En remarquant que la résistance reste à peu près stable, c'est pour sciure de bois (TCS_5) et (ACS_5) avec une valeur de 7,31 MPa et 5,396 MPa.

Pour 10% des additives :

- Tous les types des briques de terre crue diminuer à cause des différent des températures

En résumé, pour les deux types de briques de terre crue, on sélectionne la brique recyclée : c'est le meilleur dans la comparaison avec la composition témoin (terre seule).

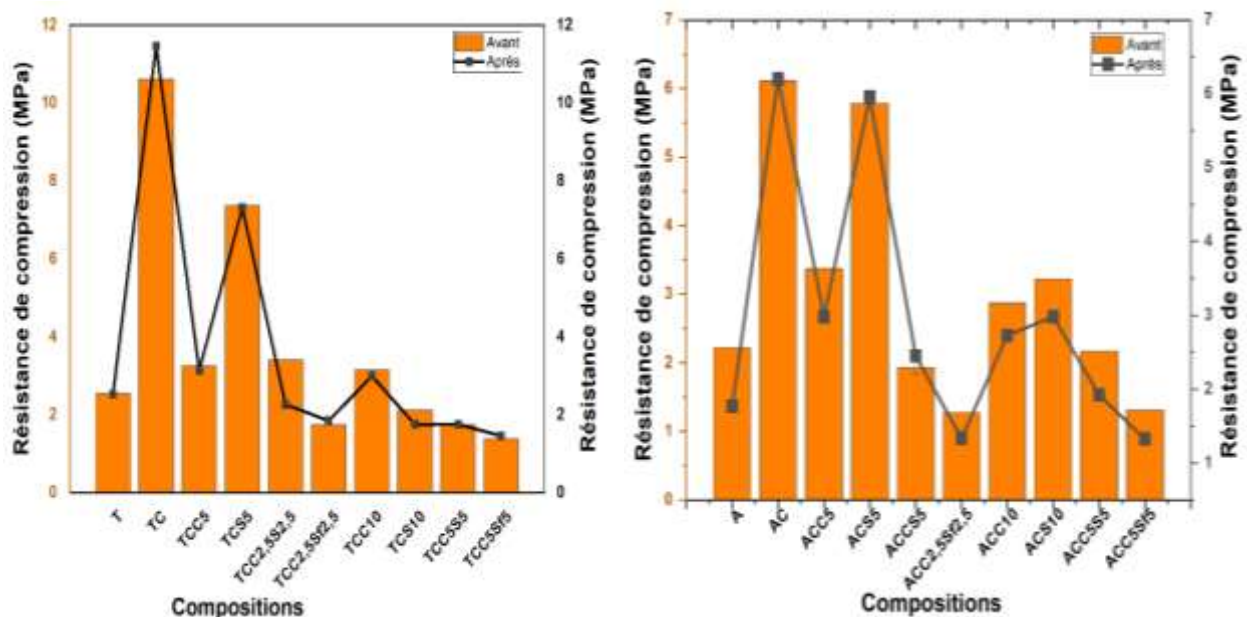


Figure. IV. 15: Résistance à la compression avant et après l'essai de gel-dégel

IV.9.2 Humidification (mouillage-séchage)

A) Résistance à la traction

Les graphiques analysent la résistance à la traction (Figure.IV.16) des briques de terre crue (toub) selon différentes compositions, avant et après un traitement (probablement lié à l'humidité ou au vieillissement). On constate que les valeurs maximales de résistance, tant en

Chapitre IV : Résultats et discussions

traction qu'en flexion, sont systématiquement observées pour les briques témoins (TC et AC), c'est-à-dire sans ajouts organiques.

L'ajout progressif de fine coquille d'arachide, de sciure de bois et de fibres de sciure entraîne une diminution nette des résistances mécaniques, particulièrement marquée après traitement. Ce comportement s'explique par la nature hydrophile et la porosité accrue apportées par ces ajouts lignocellulosiques, favorisant l'absorption d'eau, la perte de cohésion interne et une sensibilité accrue au cycle humide-séchant.

Cependant, il est intéressant de noter que certaines formulations à base de fibres (TCC_{2.5}S^f_{2.5}, ACC_{2.5}S^f_{2.5}) montrent une meilleure conservation relative des propriétés mécaniques, suggérant que l'incorporation modérée de fibres peut contribuer à améliorer la ductilité et à limiter la propagation des fissures.

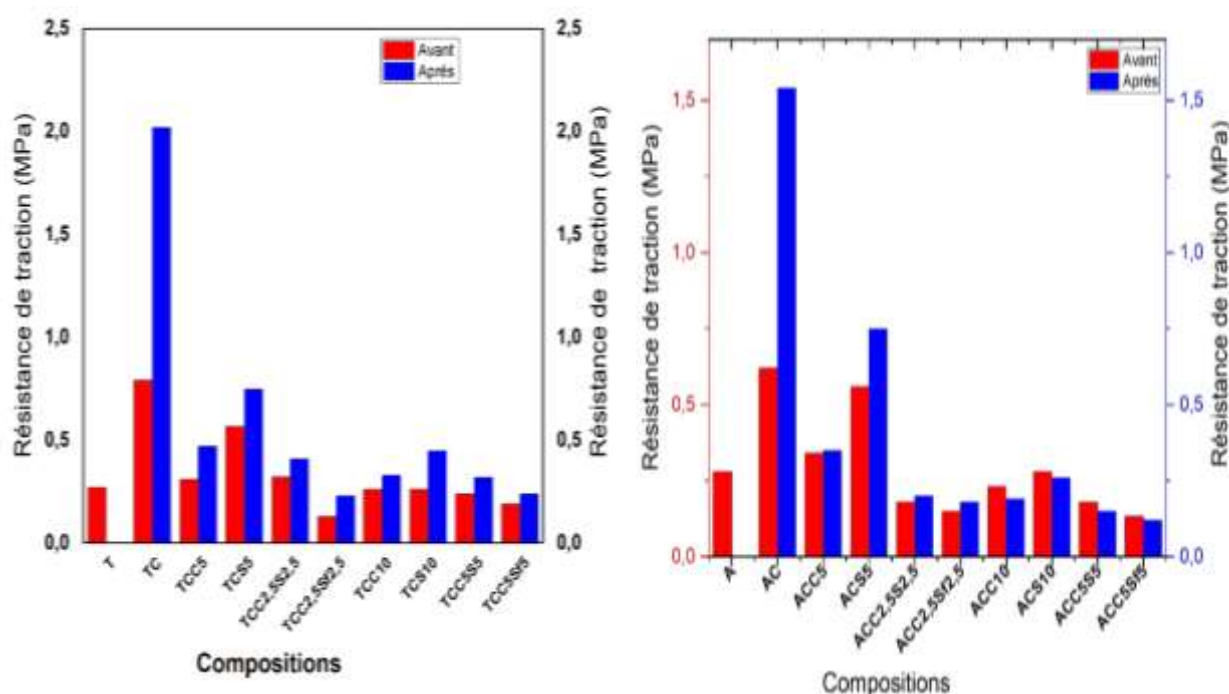


Figure. IV. 16 : Résistance à la traction avant et après l'essai de mouillage/séchage

B) Résistance à la compression

Les graphiques montrent la résistance à la compression (en MPa) des briques de terre crue, avant et après un traitement d'Humidification (MS), pour diverses compositions intégrant des pourcentages croissants d'Humidification.

Dans les deux séries (TC : toub recyclé, AC : toub nouveau), les briques témoins (T et A) présentent la résistance à la compression la plus élevée avant traitement ; par exemple, T atteint environ 14 MPa et A environ 9 MPa. On observe une diminution progressive de la résistance à

Chapitre IV : Résultats et discussions

la compression, qui devient plus marquée à 10 % d'ajout (TCC_{10} , TCC_{5S_5} , $TCC_{5S_5^f}$ et équivalents AC).

Après exposition au traitement (après MD), toutes les formulations montrent une baisse de résistance, cependant, les briques contenant un faible pourcentage d'ajouts organiques (5 %) conservent des propriétés mécaniques suffisantes pour des applications non porteuses. Cette diminution est principalement liée à la nature hydrophile des ajouts lignocellulosiques, qui favorise l'absorption d'eau, la création de porosité, et la dégradation des liaisons au sein de la matrice terreuse sous l'effet de l'humidité.

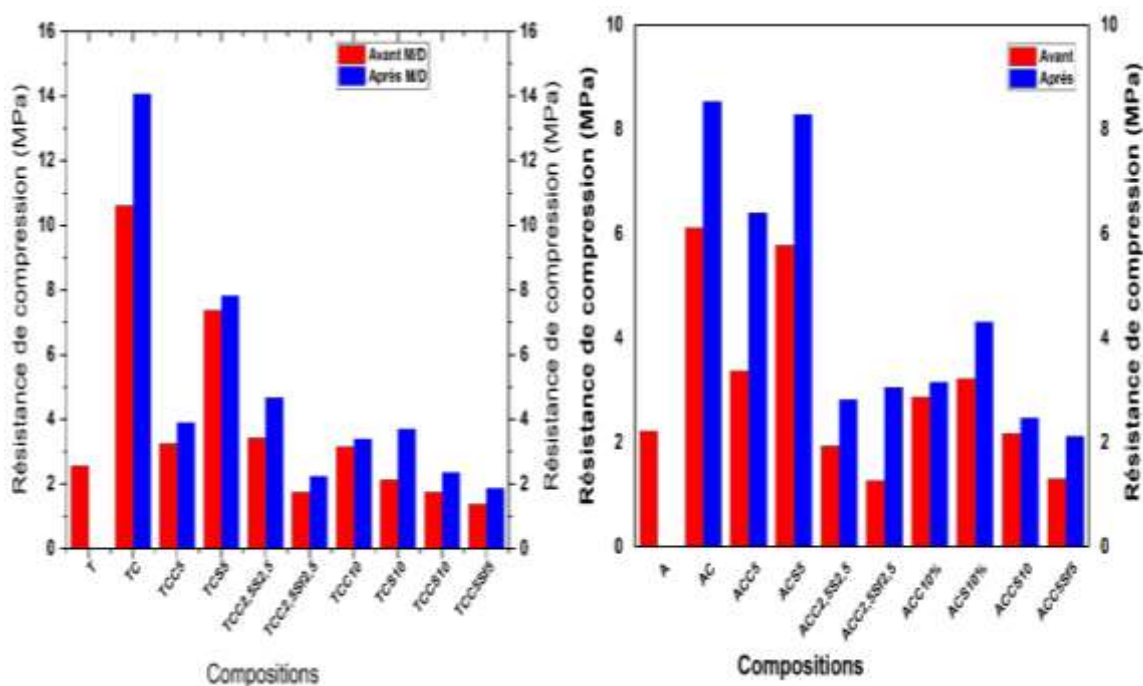


Figure. IV. 17 : Résistance à la compression avant et après l'essai de mouillage/séchage



Figure. IV. 18 État des échantillons de nouveaux types de briques à base de toub recyclée et d'argile et de sable de dune après l'essai d'attaque chimique de Na_2SO_4

IV.9.3 Attaque chimique

A) Résistance à la traction

La figure IV.19 présente l'évolution de la résistance à la traction des briques de terre crue (toub) avant et après une attaque chimique, pour différentes formulations. Les compositions testées comprennent :

Les résultats montrent que la résistance à la traction diminue significativement après exposition à l'attaque chimique, quel que soit le pourcentage d'ajouts organiques. Par exemple, la résistance de la brique témoin TC chute de 2,27 MPa avant l'attaque à 0,79 MPa après, tandis que pour la composition TC, la résistance passe de 0,85 MPa à 0,26 MPa. Une tendance similaire est observée pour les échantillons à base de toub nouveau (AC), avec une diminution marquée pour tous les pourcentages d'ajouts.

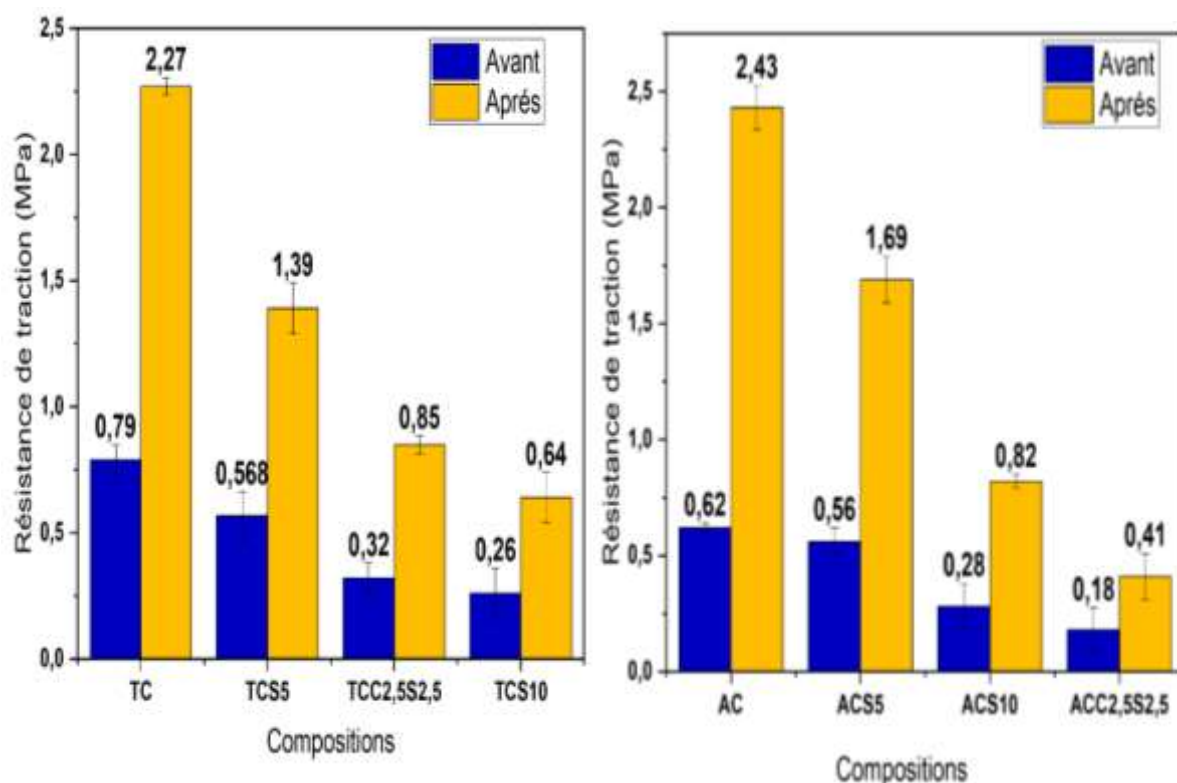


Figure. IV. 19 : Résistance à la traction avant et après l'essai d'attaque chimique

Cette réduction est plus prononcée lorsque le pourcentage de matières organiques augmente, ce qui s'explique par la sensibilité accrue des ajouts lignocellulosiques (coquille d'arachide, sciure de bois) aux agents chimiques. Ces matières favorisent la porosité, l'absorption des solutions agressives et la dégradation des liaisons au sein de la matrice terreuse. Néanmoins, l'incorporation modérée (5 %) permet de maintenir une résistance mécanique minimale tout en valorisant des déchets agricoles et en rendant possible la fabrication de matériaux plus légers et écologiques.

Chapitre IV : Résultats et discussions

Ces observations rejoignent les études récentes qui montrent que l'optimisation du taux d'ajouts naturels, associée à des traitements de stabilisation ou à l'utilisation de fibres, peut améliorer la durabilité des briques de terre crue tout en réduisant leur impact environnemental, sous réserve de maîtriser la perte de performance face aux agents agressifs.

B) Résistance à la compression

La figure IV.20 illustre la résistance à la compression des briques de terre crue avant et après une attaque chimique, pour différentes formulations :

TC, TCS₅, TCC_{2,5}S_{2,5}, TCS₁₀ : toub recyclés avec respectivement 0 %, 5 % de fine coquille d'arachide, 5 % de fine coquille d'arachide + 5 % de sciure de fibre, 10 % de fine coquille d'arachide.

AC, ACS₅, ACC_{2,5}S_{2,5}, ACS₁₀ : toub nouveaux avec respectivement 0 %, 5 % de fine coquille d'arachide, 5 % de fine coquille d'arachide + 5 % de sciure de fibre, 10 % de fine sciure de bois.

Dans chaque cas, la résistance à la compression diminue après l'exposition à l'attaque chimique. Par exemple, la résistance pour TC passe de 18,525 MPa (avant) à 10,61 MPa (après), et la formulation TC tombe de 5,64 MPa à 2,12 MPa. Une tendance similaire est observée pour les compositions à base de toub nouveau : AC chute de 12,51 MPa à 6,11 MPa, tandis que ACS₁₀ passe de 5,045 MPa à 2,5 MPa.

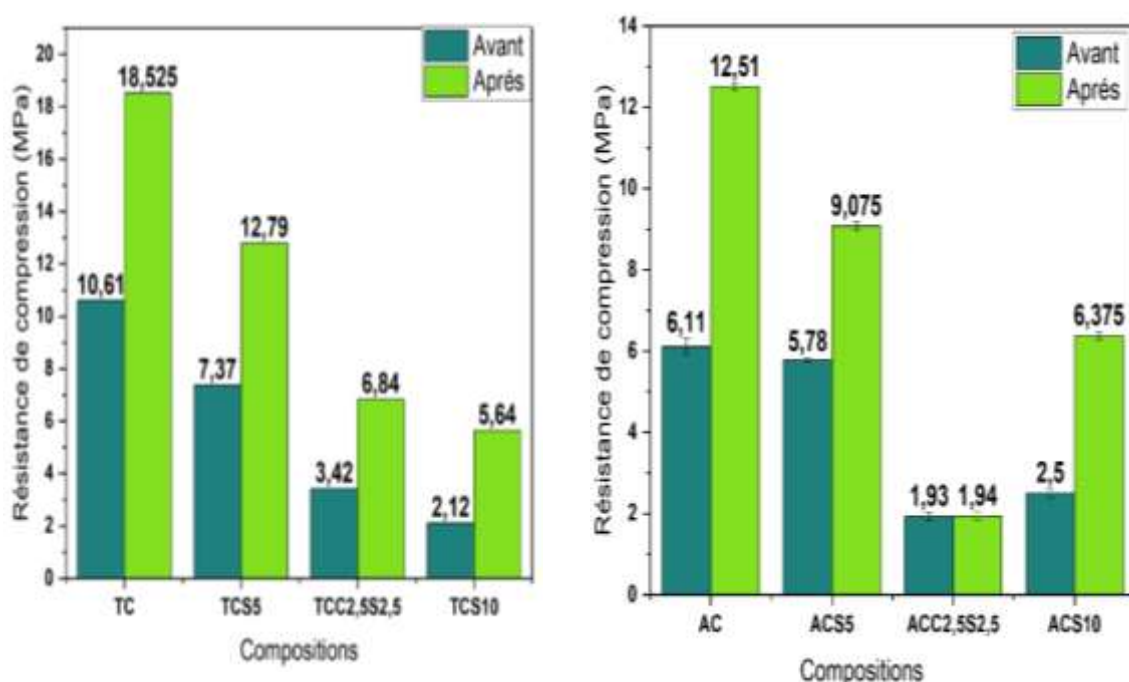


Figure. IV. 20 : Résistance à la compression avant et après l'essai d'attaque chimique

Chapitre IV : Résultats et discussions

Cette diminution est d'autant plus marquée que la proportion d'ajouts organiques augmente, ce qui s'explique par la nature hydrophile et la sensibilité chimique des particules végétales (coquilles d'arachide, sciures de bois, fibres). Ces ajouts favorisent l'absorption des agents agressifs, la dégradation des liaisons au sein de la matrice terreuse et la perte de cohésion mécanique. Toutefois, pour des pourcentages faibles ou modérés (5 %), une partie des propriétés mécaniques est conservée, ce qui rend ces formulations adaptées à des applications non structurelles ou nécessitant une durabilité environnementale accrue.

IV.9.4 Attaque d'eau

Analyse de l'influence des ajouts organiques et du ciment sur le comportement des briques de terre crue soumises à une attaque d'eau

Les résultats expérimentaux relatifs aux résistances mécaniques (traction et compression) des briques de terre crue (BTC) modifiées par l'incorporation de ciment (10 %), de sciure de bois (S/S^f) et de fines de coque d'arachide (C) mettent en évidence des évolutions significatives avant et après un essai d'attaque d'eau.

De manière générale, une augmentation des résistances mécaniques après l'essai d'attaque d'eau est observée pour l'ensemble des formulations. Ce comportement, a priori contre-intuitif pour des matériaux terreux, peut être attribué principalement à la poursuite des réactions d'hydratation du ciment, conduisant à la formation de produits cimentaires (C-S-H) responsables d'une amélioration de la cohésion interne et de la densité de la matrice (Houben & Guillaud, 1994 ; Walker et al., 2005). Par ailleurs, l'alternance imbibition-séchage peut favoriser un réarrangement des particules fines et une réduction de la porosité capillaire, contribuant ainsi à une meilleure résistance mécanique.

A) Résistance à la traction

Concernant la résistance à la traction de la figure IV.21, les compositions de référence (TC et AC) présentent une augmentation notable après immersion, traduisant l'effet stabilisant du ciment. L'ajout de fibres de sciure de bois entraîne une diminution des résistances à l'état initial, en raison de l'augmentation de la porosité et de la faible rigidité intrinsèque des particules lignocellulosiques. Toutefois, après l'attaque d'eau, une amélioration est observée, notamment pour des teneurs modérées (5 %), suggérant un rôle de pontage des microfissures et de redistribution des contraintes.

En revanche, à des teneurs plus élevées (10 %), la résistance demeure limitée, ce qui s'explique par une discontinuité accrue de la matrice terre-ciment. Les compositions intégrant des fines de coquilles d'arachide présentent globalement des performances comparables, voire légèrement supérieures après immersion. Cela peut être attribué à une meilleure compatibilité granulométrique et une rigidité plus élevée des particules de coquille par rapport à la sciure.

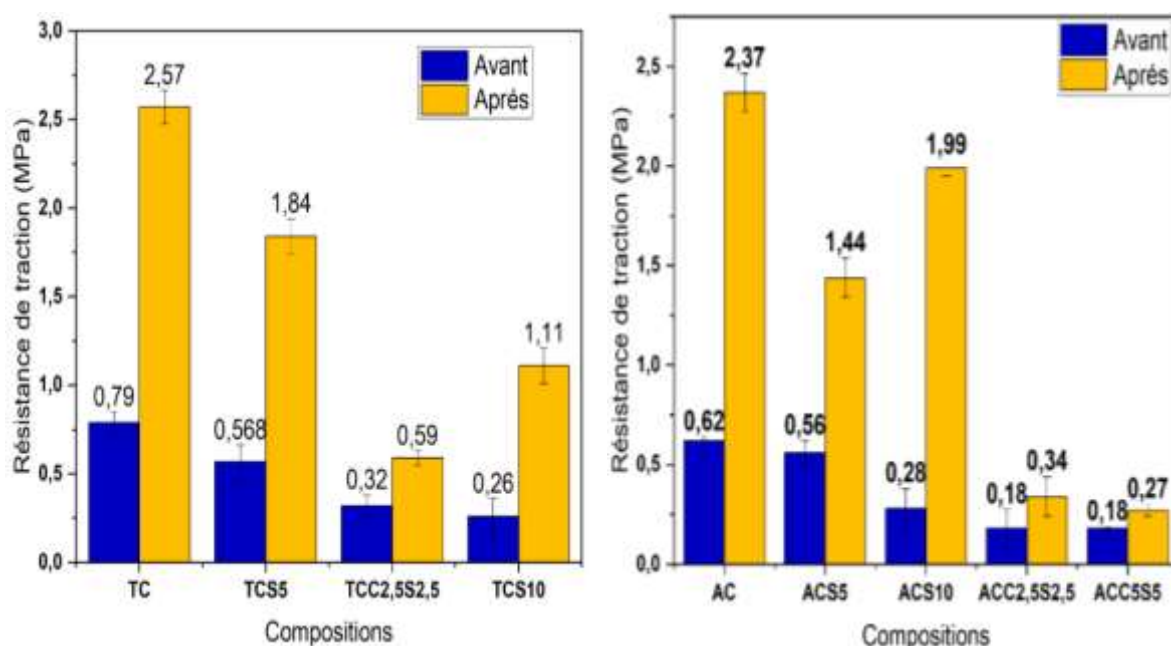


Figure. IV. 21 : Résistance à la traction avant et après l'essai d'attaque d'eau

B) Résistance à la compression

Les résultats en compression de la figure IV.22 confirment les tendances observées en traction. Les briques témoins stabilisées au ciment présentent une augmentation significative de la résistance après l'essai d'attaque d'eau, atteignant des valeurs élevées, ce qui confirme le rôle déterminant du ciment dans la durabilité des BTC en milieu humide.

L'incorporation de sciure de bois induit une réduction des résistances initiales, liée à une augmentation de la porosité et à une diminution de la densité apparente. Néanmoins, après immersion, les résistances augmentent de manière notable, en particulier pour une teneur de 5 %, indiquant un compromis optimal entre légèreté et performance mécanique. À 10 %, l'excès de matière organique engendre une dégradation des propriétés mécaniques en raison d'une structure trop poreuse.

Les formulations à base de coquilles d'arachide présentent un comportement similaire, mais avec une meilleure résistance résiduelle après immersion, ce qui suggère une plus grande stabilité vis-à-vis de l'eau. Cette amélioration peut être liée à la nature plus dense et moins compressible des particules de coquille, favorisant une meilleure transmission des efforts au sein de la matrice.

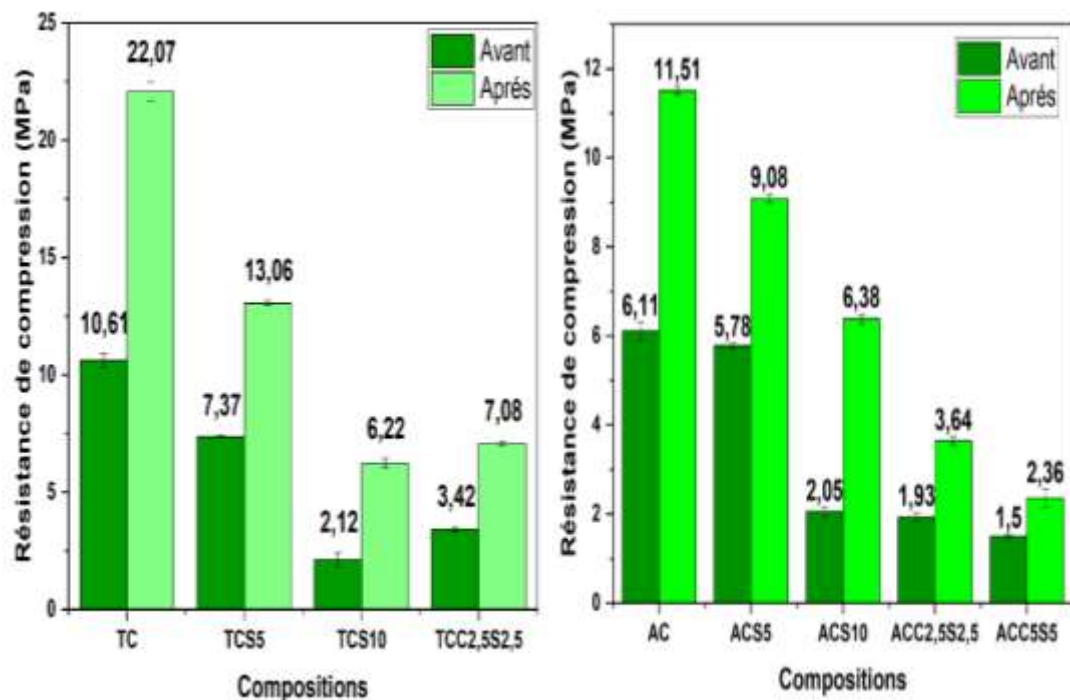


Figure. IV. 22 : Résistance à la compression avant et après l'essai d'attaque d'eau



Figure. IV. 23 : État des échantillons de nouveaux types de briques

IV.10 Enduit, crépis naturel et système d'étanchéité

À partir des tendances observées (résistances mécaniques avant et après attaque d'eau, effet des ajouts et de leur teneur), le choix des formulations doit être fait non pas en maximisant uniquement la résistance, mais en l'adaptant à la fonction recherchée : adhérence, respirabilité, résistance à l'eau ou imperméabilité.

a) . Enduit de terre (couche de base / corps d'enduit)

L'enduit de terre nécessite :

- ✓ Une bonne adhérence au support,
- ✓ Une déformabilité suffisante pour éviter la fissuration,
- ✓ Une perméabilité à la vapeur d'eau (respirabilité).

Chapitre IV : Résultats et discussions

Formulation recommandée : TCS₅ (terre + ciment 10% + 5% sciure de bois)

✓ Justification :

La sciure (5%) améliore la cohésion interne et limite la fissuration grâce à son effet fibreux.

Les résistances après eau restent suffisantes (traction et compression en nette augmentation).

La porosité induite favorise la régulation hygrométrique.

Le ciment (10%) assure une stabilisation minimale sans rigidifier excessivement.

b) Crépi naturel (couche de finition)

Le crépi naturel doit :

- ✓ Offrir une bonne résistance superficielle,
- ✓ Présenter une texture homogène et esthétique,
- ✓ Conserver une certaine perméabilité.

Formulation recommandée : ACS₅ (terre + ciment 10% + 5% coquille d'arachide)

✓ Justification :

Les coquilles d'arachide donnent une granulométrie plus stable que la sciure.

Meilleure résistance à la traction après eau (~1,44 MPa → amélioration notable).

Surface plus compacte et moins fibreuse, donc adaptée à une finition.

Bonne résistance à l'érosion superficielle.

c) Système d'étanchéité (couche exposée à l'eau)

Un système d'étanchéité exige :

- ✓ Une faible porosité,
- ✓ Une résistance élevée après immersion,
- ✓ Une stabilité durable en eau.

Formulation recommandée : TC ou AC (terre + ciment 10% sans ajout organique)

Justification :

- Résistances maximales :
- Compression jusqu'à 22 MPa (TC) après eau
- Traction jusqu'à ≈2,5 MPa
- Absence de matières organiques → moins de vides → meilleure étanchéité
- Matrice plus dense et continue

Chapitre IV : Résultats et discussions

- Meilleure durabilité à long terme en milieu humide

IV.11 Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus dans ce chapitre a permis de caractériser de manière approfondie les propriétés physico-chimiques, minéralogiques, mécaniques, thermiques et de durabilité des briques de terre crue issues du Ksar de Tamantit, modifiées par l'ajout de ciment et de déchets lignocellulosiques (sciure de bois et coquilles d'arachide).

Les analyses physico-chimiques ont montré que la terre étudiée est faiblement calcaire ($\text{CaCO}_3 < 10 \%$) et exempte d'éléments nocifs, ce qui confirme sa compatibilité avec les exigences normatives (NF P 94-048). Sa richesse en silice et en aluminosilicates, associée à une plasticité modérée ($I_p \approx 5,81 \%$), la rend particulièrement adaptée à la fabrication de matériaux de construction en terre, notamment les briques d'adobe.

Les investigations minéralogiques (DRX) ont mis en évidence une prédominance du quartz, accompagnée de calcite et de traces d'halite, tandis que les ajouts organiques présentent une structure lignocellulosique caractéristique. Ces éléments influencent directement le comportement mécanique et hydrique des composites.

Sur le plan physique, l'incorporation des additifs organiques entraîne une diminution de la masse volumique et une augmentation de la porosité, ce qui contribue à améliorer les performances thermiques, notamment par la réduction de la conductivité thermique. Toutefois, cette amélioration thermique s'accompagne d'une réduction de la rigidité mécanique, comme l'indique la diminution du module de Young.

Les résultats mécaniques ont montré que :

L'ajout de 10 % de ciment améliore significativement les résistances mécaniques, confirmant son rôle de stabilisant efficace.

L'incorporation d'additifs organiques (5 % et 10 %) entraîne une diminution des résistances mécaniques initiales, due à l'augmentation de la porosité et à la faible rigidité des fibres.

Une teneur de 5 % constitue un compromis optimal, permettant d'améliorer certaines propriétés (ductilité, limitation de fissuration) tout en conservant des performances mécaniques acceptables.

Les essais de durabilité (gel-dégel, mouillage-séchage, capillarité et attaques chimiques) ont révélé que :

Les formulations stabilisées au ciment présentent une meilleure résistance aux agressions environnementales.

Les ajouts lignocellulosiques augmentent la sensibilité à l'eau et aux agents chimiques, en raison de leur nature hydrophile.

Chapitre IV : Résultats et discussions

Cependant, des teneurs modérées ($\approx 5\%$) permettent de maintenir une durabilité acceptable pour des applications non structurelles.

Un résultat notable concerne l'essai d'attaque d'eau, où une augmentation des résistances mécaniques après immersion a été observée. Ce phénomène est attribué à la poursuite de l'hydratation du ciment et à la densification de la matrice.

Enfin, l'analyse fonctionnelle des formulations a permis de proposer des applications adaptées TCS₅ pour les enduits (bonne respirabilité et résistance à la fissuration),

ACS₅ pour les crépis (meilleure stabilité superficielle),

TC/AC pour les systèmes d'étanchéité (forte compacité et durabilité à l'eau).

Ainsi, ce chapitre met en évidence l'importance d'un compromis entre propriétés mécaniques, thermiques et hydriques, en fonction de l'usage final du matériau.

Conclusion générale

V : Conclusion générale

Dans cette thèse, il a été question de contribuer au développement des matériaux de construction en utilisant des matières minérales locales (toub recyclé, sable de dune, argile) et des additifs végétaux (coque d'arachide, sciure de bois) disponibles localement en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s'accommodent avec les conditions climatiques sévères de la région Sud-ouest d'Algérie, Et d'améliorer la situation de la population ksourienne, face à la pénurie d'habitat surtout dans les zones rurales d'un côté et d'un autre pour participer à la fabrication d'un nouveau modèle d'adobe durable en conservant son avantage écologique ainsi que son confort hygrothermique.

La revue bibliographique a permis de mettre en évidence le regain d'intérêt des matériaux à faible impact environnemental. Dans le domaine de la construction en terre crue, il existe plusieurs manières d'utiliser la terre. Elle peut être compactée, moulée ou extrudée. La terre crue possède des résistances mécaniques faibles. Ces résistances peuvent être améliorées par l'ajout de stabilisants à faibles proportions (ciment, chaux...). La terre crue dispose intrinsèquement d'une masse volumique importante, de bonne capacité d'inertie et de régulation d'hygrothermique. Cette synthèse bibliographique a été étayée par un état de l'art sur les principaux travaux antérieurs réalisés sur la durabilité et l'étude du comportement hydro-thermo-mécanique des matériaux de construction à base de terre ;

Dans la deuxième partie de la thèse, un protocole expérimental un peu complexe a été suivi afin de caractériser dans un premier temps l'ensemble des éprouvettes étudiées sur les quatre plans : physique, hydrique, thermique et mécanique. Au second lieu, quatre essais de durabilité connue dans la littérature ont été choisis pour mieux simuler les conditions environnementales sévères de la région Sud-Ouest Algérien. Précisément, cette thèse avait comme objectifs : - Étudier le comportement hygro-thermo-mécanique des blocs de terre stabilisés par des liants hydrauliques et renforcés par des additifs végétaux de coquille d'arachide et de sciure de bois. - Analyser la durabilité de ces blocs de terre en prenant en compte les exigences du contexte environnemental. De la région de Tamentit (le site d'étude) et l'argile d'Adrar plus le sable de dune de Bouda (même région Touat). En pratique, les essais au laboratoire ont permis d'identifier et de caractériser la terre prélevée sur le site d'étude (Ksar Tamentit-Adrar). Puis, nous avons confectionné des blocs de terre stabilisée à 10% de ciment blanc et incorporé à 0,0% et 10% de coquille d'arachide et de sciure de bois. Les éprouvettes confectionnées sont des éprouvettes prismatiques ($04 \times 04 \times 16 \text{ cm}^3$) destinées aux tests mécaniques, capillarité, et physiques et ($05 \times 05 \times 05 \text{ cm}^3$) destinées aux tests thermiques.

Ce travail de recherche a porté sur la valorisation de la terre locale du Ksar de Tamantit dans la fabrication de briques de terre crue améliorées, en intégrant des stabilisants (ciment) et des déchets biosourcés (sciure de bois et coquilles d'arachide), dans une optique de développement durable et d'optimisation des performances des matériaux de construction.

Les résultats obtenus ont permis de démontrer que la terre étudiée possède des caractéristiques intrinsèques favorables à son utilisation en construction, notamment grâce à sa composition minéralogique dominée par le quartz et les aluminosilicates, ainsi que sa plasticité adaptée.

V : Conclusion générale

L'ajout de ciment à hauteur de 10 % s'est révélé déterminant pour améliorer significativement les performances mécaniques et la durabilité, en particulier face aux sollicitations hydriques.

Par ailleurs, l'incorporation de déchets lignocellulosiques a montré un double effet :

Positif, en réduisant la densité, en améliorant les performances thermiques et en limitant la fissuration, négative, en augmentant la porosité et la sensibilité à l'eau et aux agents chimiques.

L'étude a permis d'identifier une teneur optimale de 5 % d'additifs organiques, offrant un compromis entre légèreté, performance mécanique et durabilité. Au-delà de ce seuil, les propriétés mécaniques et la résistance aux agressions environnementales se dégradent de manière significative.

Les essais de durabilité ont confirmé que la stabilisation au ciment reste essentielle pour garantir la pérennité des briques de terre crue, tandis que les ajouts organiques doivent être utilisés de manière contrôlée selon l'application visée. Dans cette perspective, une approche fonctionnelle a été adoptée pour proposer des formulations adaptées aux différents usages dans le bâtiment (enduits, crépis, étanchéité).

En définitive, cette étude contribue à :

La valorisation des ressources locales et des déchets agricoles,

Le développement de matériaux de construction écologiques et à faible impact environnemental, et l'amélioration des performances des briques de terre crue dans des contextes climatiques arides.

Des perspectives de recherche peuvent être envisagées, notamment :

- ✓ Réaliser une maison prototype en utilisant des formulations développées.
- ✓ Optimisation des traitements des fibres végétales pour améliorer leur durabilité,

Références bibliographies

Références bibliographiques

1. Abdelkader, B., Hamid, K., Mejedoub, M. A., Bada, A., & Moulay-Ali, A. (2024). Influence of the dosage and length of palm fibers on the mechanical properties of reinforced adobe. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, 5(2), e6769. doi: 10.54021/seesv5n2-102
2. Abtahi, M., Okhovat, N., & Hejazi, M. (2009a). Using textile fibers as soil stabilizers--new achievements. In 1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran.
3. Abtahi, M., Okhovat, N., & Hejazi, M. (2009b). Using textile fibers as soil stabilizers--new achievements. *1st Int and 7th Nat Conf Text Eng, Rasht, Iran*.
4. Adam, E., & Agib, A. (2001). Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan. *France, Paris: Printed by Graphoprint for UNESCO*, 32–55.
5. Afnor. *XP P13–901: Blocs de terre comprim'ee pour murs et cloisons: d'efinitions –Sp'ecifications – M'ethodes d'essais –. Conditions de r'ception 2001.* (n.d.).
6. Akhzeroun, A., Semcha, A., Bezazi, A., Boumediri, H., Reis, P. N. B., & Scarpa, F. (2023). Development and characterization of a new sustainable composite reinforced with date palm stems for rehabilitation and reconstruction of earthen built heritage. *Composite Structures*, 316. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117015
7. Araya-Letelier, G., Gonzalez-Calderon, H., Kunze, S., Burbano-Garcia, C., Reidel, U., Sandoval, C., & Bas, F. (2020). Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures: Physical, mechanical, damage and durability performance assessment. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122806.
8. Assia, Z., Fazia, F., & Abdelmadjid, H. (2019). Sustainability of the stabilized earth blocs under chemicals attack's effects and environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 212, 787–798. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.324
9. Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (n.d.). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*.
10. Azeem, A., & Ati, A. (1992a). *Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings*. Calcutta: Ind geotech conf, .
11. Azeem, A., & Ati, A. (1992b). *Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings*. Ind Geotech Conf, Calcutta.
12. Babé, C., Kidmo, D. K., Tom, A., Mvondo, R. R. N., Kola, B., & Djongyang, N. (2021). Effect of neem (*Azadirachta Indica*) fibers on mechanical, thermal and durability properties of adobe bricks. *Energy Reports*, 7, 686--698.
13. BAHAR, R., BENAZZOU, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*, 26, 811–820.
14. Baley, Christophe. (2003). *Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin*.

Références bibliographiques

15. Bassoud, A., Khelafi, H., Mokhtari, A. M., & Bada, A. (2021). Effectiveness of salty sand in improving the adobe's thermomechanical properties: Adrar case study (south Algeria). *Trends in Sciences*, 18(19). doi: 10.48048/tis.2021.6
16. Bechchar, H. (2021). *Procédés de fabrication des carreaux céramiques et études des facteurs influençant la résistance à la flexion des carreaux crûs*.
17. Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223--237.
18. Benabdallah, C., Djafari, D., Talhaoui, A., Akacem, M., & Bakhadda, R. (2025). Investigate the usage of sawdust and peanut shells in producing stabilized earthen bricks for desert buildings: A case study, Adrar, South Algeria. *Revista Ingenieria de Construcción*, 40(3). doi: 10.7764/RIC.00158.21
19. Bérengère, P. (2015). Pisé or not pisé ? Problème de définition des techniques traditionnelles de la construction en terre sur les sites archéologiques. *Environnement et Exploitation Des Ressources*.
20. Bobet, O., Nassio, S., Seynou, M., Remy, B., Zerbo, L., Sanou, I., Sawadogo, M., Millogo, Y., & Gilles, E. (2020). Characterization of Peanut Shells for Their Valorization in Earth Brick. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 08(04), 301–315. doi: 10.4236/jmmce.2020.84018
21. Bourouiba, R. (1983). *Architecture Militaire de l'Algérie Médiévale*. publications universitaires L'Algérie.
22. Bui, Q.-B. (2008). *Stabilité des structures en pisé: durabilité, caractéristiques mécaniques*. Lyon, INSA.
23. Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2017). Experimental research on the recyclability of the clay material used in the fabrication of adobe bricks type masonry units. *Procedia Engineering*, 181, 363--369.
24. CesarJuarezC. Juarez, GerardoFajardoG. Fajardo, & PedroValdezP. Valdez. (2009). Caractérisation microstructurale des fibres naturelles pour des matériaux composites à base de ciment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(3), 449–462.
25. Charai, M., Salhi, M., Horma, O., Mezrhab, A., Karkri, M., & Amraoui, S. (2022). Thermal and mechanical characterization of adobes bio-sourced with Pennisetum setaceum fibers and an application for modern buildings. *Construction and Building Materials*, 326, 126809. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126809>
26. Charai, M., Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., Elhammouti, K., & Nasri, H. (2020). Thermal Performance and Characterization of a Sawdust-Clay Composite Material. *Procedia Manufacturing*, 46, 690–697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.098>

Références bibliographiques

27. Charis, G., Danha, G., & Muzenda, E. (2019). A review of timber waste utilization: Challenges and opportunities in Zimbabwe. *Procedia Manuf*, 35, 419–429.
28. Document Technique Réglementaire D.T.R C 3-4, (1998).
29. Confédération de la construction en terre crue. (2020). *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*. Paris.
30. Costi de Castrillo, M., Ioannou, I., & Philokyrou, M. (2021). Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. *Construction and Building Materials*, 294. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123516
31. CRATerre. (1986). *Des Architectures de Terre ou l'Avenir d'une Tradition Millénaire*. Paris: Centre Georges Pompidou.
32. Davis, J. P., & Dean, L. L. (2016). Peanut composition, flavor and nutrition. In *Peanuts* (pp. 289–345). Elsevier.
33. Duc, P. A., Dharanipriya, P., Velmurugan, B. K., & Shanmugavadivu, M. (2019). Groundnut shell-a beneficial bio-waste. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101206.
34. Dwivedi, S. P., Maurya, M., Maurya, N. K., Srivastava, A. K., Sharma, S., & Saxena, A. (2020). Utilization of groundnut shell as reinforcement in development of aluminum based composite to reduce environment pollution: A review. In *Evergreen* (Vol. 7, Issue 1, pp. 15–25). Novel Carbon Resource Sciences. doi: 10.5109/2740937
35. Echeverría-Maggi, E., Flores-Alés, V., & Martín-Del-Río, J. J. (2022). Reuse of banana fiber and peanut shells for the design of new prefabricated products for buildings. *Revista de La Construcción*, 21(2), 461–472. doi: 10.7764/RDLC.21.2.461
36. Edward M Rubin. (2008). Genomics of cellulosic biofuels. In *Nature* (Vol. 454, Issue 7206, pp. 841–845). Nature Publishing Group. doi: 10.1038/nature07190
37. Elert, K., Alaminos, R. A., Benavides-Reyes, C., & Burgos-Ruiz, M. (2023). The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders. *Cement & Concrete Composites*, 139, 1015012.
38. EN, 1745: masonry and masonry products. Methods for determining design thermal values, CEN, (European Committee for Standardization), Brussels, Belgium, 2002, (2002).
39. FAO. (2021, April 12). *FAOSTAT Data*.
40. Fontaine, L. (2004). *Cohésion et comportement mécanique de la terre comme matériau de construction*.
41. GANDIA, R. M., GOMES, F. C., ORRÊA, A. A. R., Andrade, A. Aparecida Ribeiro and Rodrigues, M. C. and M. R. F. journal={Construction and B., Rodrigues, M. C., & Mendes, R. F. (2019). Physical, mechanical and thermal

Références bibliographiques

- behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials*, 222, 168–182.
42. Gelard, D. (2005). *Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation*. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
43. George, J., Sreekala, M., & Thomas, S. (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 41(9), 1471--1485.
44. Gomes, M. I., & Miranda, T. (2022). Indoor air quality for sustainability, occupational health, and classroom environments through the application of earth plaster. P. and Sustainability. Culture (Ed.), International Conference on Vernacular Heritage: Culture, People and Sustainability. Proceedings HERITAGE 2022.
45. Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119--127.
46. Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). REPORT DEFINITION OF CLAY AND CLAY MINERAL: JOINT REPORT OF THE AIPEA NOMENCLATURE AND CMS NOMENCLATURE COMMITTEES. In *Clays and Clay Minerals* (Vol. 43, Issue 2).
47. H_Abdne. (2007, June 2). *Site Web*. https://www.routedesvoyages.fr/travel/fr/algeria/airport_touat_cheikh_sidi_mohamed_belkebir_airport/photo_2530459-ancien-hgpital-dadrar.html.
48. Hadjri, K., Osmani, M., Baiche, B., & Chifunda, C. (2007). Attitudes towards earth building for Zambian housing provision. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability. In Thomas Telford Ltd (Ed.), *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (3rd ed., Vol. 160, pp. 141–149).
49. Hakimi, A., Yamani, N., & Ouissi, H. (1996). Rapport: Ré}sultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée. *Materials and Structures*, 29(10), 600--608.
50. Hall, M., & Djerbib, Y. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, Vol. 18, 281-286.
51. Hall, M. R., Lindsay, R. a, & Krayenhoff, M. (2012). Overview of modern earth building. In *Modern earth buildings* (pp. 3–16). Elsevier}.
52. Hall, Matthew, & Allinson, D. (2009). Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment*, 44(9), 1935--1942.

Références bibliographiques

53. Hall, Matthew, & Djerbib, Y. (2004). Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction. *Construction and Building Materials*, 18(4), 269–280.
54. Hamard, E., Morel, J.-C., Salgado, F., Marcom, A., & Meunier, N. (2011). A procedure to assess suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Transactions on The Built Environment*, 118, 507–516.
55. Hepworth, D., Bruce, D., Vincent, J., & Jeronimidis, G. (2000). The manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites. *Journal of Materials Science*, 35(2), 293–298.
56. Hibouche, A. (2013). *Sol traités aux liants: performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques: application en BTP*. Le Havre.
57. Houben, H., & Guillaud, H. (2006). *Traité de construction en terre* (3ème Ed). Parenthèses.
58. Houben, Hugo, & Hubert Guillaud. (1989). *Traité de construction en terre. Edition Parentheses, , Paris, I.*
59. Idder, A., Hamouine, A., Labbaci, B., & Abdeldjebar, R. (2020). The porosity of stabilized earth blocks with the addition plant fibers of the date palm. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(3), 478–494. doi: 10.28991/cej-2020-03091485
60. Internet. (2026, April 14). *Internet*.
61. Jaquin, P. A., Augarde, C., Gallipoli, D., & Toll, D. G. (2009). The strength of unstabilised rammed earth materials. *Géotechnique*, 59(5), 487–490.
62. JORA (Journal Officiel de la République Algérienne). (2014, February 12). N° 06, 08–09.
63. Kaniraj, S. R., & Gayathri, V. (n.d.). *Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions*.
64. Kaniraj, S. R., & Gayathri, V. (2003). Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(3), 123–149.
65. Kerkhoff, B. (2007). *effects-of-substances-on-concrete-and-guide-to-protective-treatments-tcm77-2204808*. Portland Cement Association.
66. Kisan, U., Dubey, V., Sharma, A. K., & Mital, A. (2021). Synthesis of Groundnut Shell/Rice Husk Hybrid Composite—A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1116(1), 012001. doi: 10.1088/1757-899x/1116/1/012001
67. Kouakou, C. H., & Morel, J.-C. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44(1–2), 27–34.
68. Kumar, M., Rai, D., Bhardwaj, G., Upadhyay, S. N., & Mishra, P. K. (2021). Pyrolysis of peanut shell: Kinetic analysis and optimization of thermal degradation process. *Industrial Crops and Products*, 174, 114128. doi: 10.1016/J.INDCROP.2021.114128

Références bibliographiques

69. Kurek, B. (2006). Les fibres naturelles: originalités, propriétés, qualités et défauts. *Journée Technique: Matériaux Renforcés Fibres Naturelles et Matériaux Issus de Ressources Renouvelables, Appliqués En Plasturgie., Pole Européen de Plasturgie, Bellignat.*
70. Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 111, pp. 719–734). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119
71. Lachowicz, H., Wróblewska, H., Wojtan, R., & Sajdak, M. (2019). The effect of tree age on the chemical composition of the wood of silver birch (*Betula pendula* Roth.) in Poland. *Wood Science and Technology*, 53(5), 1135–1155. doi: 10.1007/s00226-019-01121-z
72. Laurent, J.-P. (1987). Propriétés thermiques du matériau terre. *Cahiers Du CSTB*, 279, 2156.
73. Lesbet, D. (1985). *La Casbah d'Alger: gestion urbaine et vide social.*
74. Lima, J. T., Faria, P., Faria, P., & Silva, A. S. (2020). Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(7), 948–963.
75. Lopez, Y. M., Paes, J. B., Gustave, D., Gonçalves, F. G., Méndez, F. C., & Nantet, A. C. T. (2020). Production of wood-plastic composites using cedrela odorata sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products—A sustainable approach for cleaner production in Cuba. *J. Clean. Prod.*, 244, 118723.
76. Losini, A. E., Stampino, P. G., Dotelli, G., Bellotto, M., Grillet, A. C., Caruso, M., Sabbadini, S., & Outin, J. (2019). *Evaluation of different raw earthen plasters stabilized with lime for bio-building exploitation.* 37(2), 176–183.
77. Madaci, N. (2013). *L'architecture de terre passé, présent et devenir : Cas du bassin de Ferdjioua.* eBox Editions.
78. Magniont Camille. (n.d.). *Magniont C. Contribution `a la formulation et `a la caract'erisation d'un 'eco mat'ériau de construction `a base d'agro ressources* [Phd thesis]. Toulouse 3.
79. Maini, S. (2005). Earthen architecture for sustainable habitat and compressed stabilised earth block technology. *The Auroville Earth Institute, Auroville Building Center-India*, 14(4), 112–128.
80. Maniatidis, V., & Walker, P. (2008). Structural capacity of rammed earth in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 230–238.
81. Matsuoka, Y., Miura, T., Terazawa, M., Horisawa, S., Sunagawa, M., Tamai, Y., Terazawa, • M, & Matsuoka, • Y. (1999). *Sakae Horisawa • Masahide Sunagawa • Yutaka Tamai Biodegradation of nonlignocellulosic substances II: physical and chemical properties of sawdust before and after use as artificial soil* (Vol. 45).

Références bibliographiques

82. Meukam, P. (2004). *Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments*. Cergy-Pontoise.
83. Ministère de l'Habitat. (1997). Réglementation thermique des bâtiments d'habitation . *Règles de Calcul Des Déperditions Calorifiques DTR C 3- 2 ''*, Doc. Tech. Règlementaire, Ministère l'habitat, Algérie, s. , 72.
84. Minke, G. (2000). Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture. *Minke2000earth*.
85. Minke, G. (2006). *Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Berlin, Boston: Birkhäuser. doi: doi:10.1007/978-3-7643-7873-8
86. Moevus, M., Anger, R., & Fontaine, L. (n.d.). *Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review*. Retrieved from <https://hal.science/hal-01005948v1>
87. Moevus, M., Fontaine, L., Anger, R., & Doat, P. (2013). *Projet: Béton d'Argile Environnemental (BAE)*.
88. Mokolopi, B. (2022). Groundnut Shells as a Potential Feed Supplement for Ruminants on Pastures: A Review . *Indian Journal of Animal Research*, 56(5).
89. Morel, J.-C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309.
90. Moriset, S. (2011). Rénover & construire en pisé dans le Parc naturel régional Livradois. *Parc Naturel Régional Livradois-Forez*.
91. Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53–63. doi: 10.1016/j.cscm.2016.07.001
92. MÜSSIG, J., Harig, H., Bremen-FIBRE, F., & Brême, A. (1999). Caractérisation des fibres de chanvre. *Journée Scientifique Du Chanvre*.
93. Mwangi, A., & Kambole, C. (2019). Engineering characteristics and potential increased utilisation of sawdust composites in construction—A review. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 7(3), 59–88.
94. New Zealand Standard. (1998). *Materials and workmanship for earth buildings*.
95. NF P 18-554, *Granulats - Fid'elit'e des m'ethodes d'essais - Mesure de la masse volumique apparente*, Avril 1982. (n.d.).
96. NF P 18-555, *Granulats - Fid'elit'e des m'ethodes d'essais - Mesure de la masse volumique absolue*, Avril 1982. (n.d.).
97. NF P 94-051, *Sols: reconnaissance et essais - D'etermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidit'e `a la coupelle - Limite de plasticit'e au rouleau*, Mars 1993. (n.d.).
98. NF P 94-056, *Sols: reconnaissance et essais - Analyse granulom'etrique - M'ethode par tamisage `a sec*, Mars 1996. (n.d.).

Références bibliographiques

99. NF P 94-057, *Sols: reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par sédimentation*, Mai 1992. (n.d.).
100. NF P 94-068, *Sols: reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache*, Octobre 1998. (n.d.).
101. NF P 94-068, *Sols: reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache*, Octobre 1998. (n.d.).
102. Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel des matériaux traités aux liants hydrauliques - Partie 1 : essai de résistance au gel-dégel des graves et sables traités, (Avril 1992).
103. Ngo, C. (2017). *DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX TITRE Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales- Etude du comportement mécanique et de durabilité*.
104. Olesen, P. O., & Plackett, D. (1999). Perspectives on the performance of natural plant fibres. In *Proceedings of the International Conference Natural Fibres Performance Forum*. May (pp. 27–28).
105. Olivier, Myriam. (1994). *Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en bloc sur terre*. Lyon, INSA.
106. OTTOU, J. (1987). *Contribution à l'étude de la stabilisation des sols latéritiques par association compactage dynamique liant hydraulique en vue de l'élaboration de blocs pour la construction*. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.
107. Ouedraogo, M., Dao, K., Millogo, Y., Aubert, J.-E., Messan, A., Seynou, M., Zerbo, L., & Gomina, M. (2019). Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*). *Journal of Building Engineering*, 23, 250–258.
108. Pacheco-Torgal, F., & Labrincha, J. (2013). The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. *Construction and Building Materials*, 40, 729–737.
109. Page, J. (2017). *Page, J. (2017). Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée*. Normandie Université.
110. Paulus. (2015). *Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou*. Mémoire de Master en Ingénieur Civil Architecte sous la direction de Courard L., Université de Liège.
111. Penna, I. (2010). *Understanding the FAO's Wood Supply from Planted Forests' Projections*. Centre for Environmental Management, University of Ballarat Ballarat, Australia.

Références bibliographiques

112. Perea-Moreno, M. A., Manzano-Agugliaro, F., Hernandez-Escobedo, Q., & Perea-Moreno, A. J. (2018). Peanut shell for energy: Properties and its potential to respect the environment. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9). doi: 10.3390/su10093254
113. Pettersen, R. C. (1984). The chemical composition of wood. *The Chemistry of Solid Wood, American Chemical Society Washington, DC*, 206, 57–126.
114. Pratha, A. A., & Prabakar, J. (2020). Defluoridation potential of rice husk, groundnut shell as a conventional alternative for fluoride removal-A review. *J. Pharm. Res. Int* , 32, 124--131.
115. Rabiâ, A. (2019). *Thèse_Abdel_Après*. Université de TAHRI Mohamed Bechar.
116. Rao, J. (1996). Jute geotextile for improving the performance of highway embankment on soft marine soil. In: Proc nat sem jute based geotextile. *Proc Nat Sem Jute Based Geotextiles, New Delhi, India*.
117. Rigassi, V. (1995). Blocs de terre comprimée. *Volume I. Manuel de Production, CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne*, 104.
118. Santos, T., & Faria, P. (2020). Characterization of earthen plasters – Influence of formulation and experimental methods. *Gremium*, 7(14), 151–168.
https://Run.Unl.Pt/Bitstream/10362/111958/1/Rini_Santos_Faria_earth_plasters_formulation_test_methods_Gremium2020.Pdf, 7(14), 151–168.
119. Sathiparan, N., & De Zoysa, H. T. S. M. (2018). The effects of using agricultural waste as partial substitute for sand in cement blocks. *Journal of Building Engineering*, 19, 216–227. doi: 10.1016/j.jobee.2018.04.023
120. Seevaratnam, V., Uthayakumar, D., & Sathiparan, N. (2020). Influence of rice husk ash on characteristics of earth cement blocks. *MRS Advances*, 5(54–55), 2793--2805.
121. Shukla, A., Tiwari, G., & Sodha, M. (2009). Embodied energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34(3), 755--761.
122. soutien67. (2026). *soutien67*.
123. Statista. (2022, April 14). *Production Share of Peanuts Worldwide in 2020, by Leading Country, 2022*.
<https://www.statista.com/statistics/1030846/major-producers-ofpeanut-worldwide>. Statista.
124. Stulz, R., & others. (1988). Appropriate building materials: a catalogue of potential solutions. *Skat*.
125. Svoboda, P., & Procházka, M. (2012). Outdoor earthen plasters. Organization, Technology and Management in Construction. *International Journal*, 4(1), 420–423.

Références bibliographiques

126. Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., & Kriker, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161–168. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058
127. Tânia Santos, Maria Idália Gomes, Flávia Coelho, & Paulina Faria. (2018). Eco-efficient earth plasters: influence of clay content, sand particle size and support. *Polytechnic Institute of Lisbon, University of Lisbon*, 1(1).
128. Tlijani, M. (2016). *Contribution à la caractérisation thermophysique de matériaux bio-isolants: valorisation des déchets de bois de palmier*. Université Paris-Est.
129. Vidal, H. (1969a). The principle of reinforced earth. *Highway Research Record*, 282.
130. Vidal, H. (1969b). The principle of reinforced earth. *Highway Research Record*, 282.
131. Vignesh, N. P., Mahendran, K., Arunachalam, N., & Ali, M. (2020). Effects of Industrial and Agricultural Wastes on Mud Blocks Using Geopolymer. *Advances in Civil Engineering*, 2020. doi: 10.1155/2020/1054176
132. Wafer, R.-P. (2010). L'adobe, une solution durable pour la construction d'habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili. *Université de Sherbrooke, Québec, Canada*, 73.
133. Walker, P. (2002). *The Australian earth building handbook*. SAI Global Limited.
134. Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 12 : Détermination des limites d'Atterberg, (2005).
135. Yogananth, Y., Thanushan, K., Sangeeth, P., Coonghe, J. G., & Sathiparan, N. (2019). Comparison of strength and durability properties between earth-cement blocks and cement--sand blocks. *Innovative Infrastructure Solutions*, 4(1), 50.
136. Zaaba, N. F., & Ismail, H. (2019). A Review on Peanut Shell Powder Reinforced Polymer Composites. In *Polymer-Plastics Technology and Materials* (Vol. 58, Issue 4, pp. 349–365). Taylor and Francis Inc. doi: 10.1080/03602559.2018.1471720
137. Zhang, Q., Li, Y., Yu, C., Qi, J., Yang, C., Cheng, B., & Liang, S. (2020). Global timber harvest footprints of nations and virtual timber trade flows. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119503.