

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية و الري
المرجع:

Thèse de Doctorat LMD
Spécialité : GENIE CIVIL
Option : MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Étude de la durabilité des briques de terre crue avec bio-stabilisants

Présentée par:

ZAIDI Amine

Soutenue publiquement le 03/07/2022.

Devant le jury composé de :

ZEGHICHI Leila	Professeur	Président	Université de Biskra.
GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
IZEMMOUREN Ouarda	MCB	Co-rapporteur	Université de Biskra
GHRIEB Abderrahmane	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université de Djelfa
TAALAH Bachir	Professeur	Examineur	Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Je remercie très sincèrement tous ceux qui ont apporté leur contribution directement ou indirectement à la finition de cette thèse.

Avant tout je tiens à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur GUETTALA Abdelhamid, Professeur à l'université de Biskra, pour son entière disponibilité, ses orientations, ses conseils tout le long de cette étude.

Je voudrais exprimer ma gratitude au Docteur IZZEMOUREN Ouarda, mon Co-encadreur de thèse, pour m'avoir confié ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour ses nombreux conseils, son attention, et bien évidemment pour ses connaissances et son expérience dans la recherche qu'il a su me transmettre, et qui j'en suis sûre me seront bénéfiques dans les années futures.

J'exprime mes vifs remerciements au président directeur général du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'industrie des Matériaux CETIM à Boumerdès (Algérie), pour son entière disponibilité, sa collaboration pour les essais de DRX.

J'adresse mes chaleureux remerciements au Madame ZEGHICHI Leila, Professeur à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance

Je tiens aussi à remercier Monsieur GHRIEB Abderrahmane, Maître de Conférences 'A' à l'université de Djelfa et Monsieur TAALAH Bachir, professeur à l'université de Biskra, d'avoir accepté d'être membres du jury de thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil pour leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Enfin, je remercie très chaleureusement ma femme (B.L), mes parents, ma sœur, mes frères, mes collègues, mes enseignants qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et collègues de travail et tous ceux qui m'ont aidé à finaliser ce travail

RESUME

La terre crue est l'un des principaux matériaux de construction utilisés depuis les temps les plus reculés. C'est un matériau abondant, qui nécessite peu d'énergie pour sa fabrication et qui ne génère pas de déchets. Dans une perspective de développement local durable, l'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de la stabilisation des briques d'adobe avec la chaux et le renforcement par les déchets de palmier dattier non traité et traité pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des briques vis-à-vis de l'eau, qui reste un problème majeur menaçant les constructions en terre, et en proposant des solutions permettant une large utilisation de ce matériau afin d'apporter des solutions concrètes à l'habitat des pays en voie de développement.

Dans ce cadre, on a utilisé quatre teneurs en déchets de palmier dattier non traité et traité (0.3, 0.6, 0.9 et 1.2 %) du poids du mélange sec. Les échantillons ont été soumis aux essais des résistances mécaniques de compression sèche et de traction par flexion, et aussi aux essais de la durabilité : absorption capillaire et totale, gonflement, l'érosion, l'abrasion, séchage/mouillage, attaque sulfatique externe.

Les résultats obtenus ont montré que les briques constituées de 70 % de sol et de 30 % de sable concassé et stabilisée par 12 % de chaux du poids du mélange sec, avec une cure à l'étuve pendant neuf jours à une température de 65°, ont donné une résistance meilleure. Les résultats indiquent aussi que lors de l'incorporation des déchets il y a une diminution de la résistance à la compression mais sans tomber au-dessous de la valeur recommandée par différentes normes internationales et une augmentation de l'absorption d'eau des briques. Par contre, il y a une amélioration de la résistance à la traction, l'abrasion, l'érosion, séchage/mouillage et l'attaque sulfatique externe. Les résultats obtenus ont montré aussi qu'il y a une légère amélioration des performances mécaniques et de la durabilité des briques lors de l'incorporation des déchets traités comparativement aux déchets non traités.

Mots Clés : briques d'adobe; déchets de palmier dattier ; résistance ; absorption d'eau; traitement, durabilité.

ABSTRACT

Raw earth is one of the main building materials used since ancient times. It is an abundant material, which requires little energy for its manufacture and does not generate wastes. In a perspective of sustainable local development, the main objective of this work is to study the effect of stabilization of adobe bricks with lime and reinforcement by untreated and treated date palm waste to improve the mechanical properties and durability of the bricks against water, which remains a major problem threatening earthen constructions, and by proposing solutions allowing a wide use of this material in order to initiate concrete solutions to the habitat of the developing countries

In this framework, four contents of untreated and treated date palm waste (0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 %) of the dry mix weight were used. The samples were subjected to mechanical resistance tests of dry compression and flexural tensile strength, and also to durability tests: capillary and total absorption, swelling, erosion, abrasion, drying / wetting, external sulfate attack.

The results obtained showed that the bricks constituted by 70 % of soil and 30 % of crushed sand and stabilized by 12 % of lime of the weight of dry mixture, with a cure in the oven during nine days at a temperature of 65°, gave a better resistance. The results also indicate that when incorporating the wastes there is a decrease in the value of compressive strength but without falling below the value recommended by different international standards and increase in water absorption. On the other hand, there is an improvement in the tensile strength and the resistance against abrasion, erosion, drying/wetting and external sulfate attack. The obtained results also showed that there is a slight improvement of the mechanical performances and durability of the bricks when incorporating the treated waste than the untreated waste.

Keywords: adobe bricks; date palm waste; strength; water absorption; treatment, durability

الملخص

التربة الخام هي واحدة من مواد البناء الرئيسية المستخدمة منذ العصور القديمة. وهي مادة وفيرة ولا تحتاج إلى طاقة كبيرة لصنعها ولا تنتج عنها نفايات. وبغية تحقيق التنمية المحلية المستدامة، يتمثل الهدف الرئيسي من هذا العمل في دراسة تأثير تثبيت الطوب بالجير وتعزيزه بنفايات النخيل غير المعالجة والمعالجة من أجل تحسين الخصائص الميكانيكية للطوب وديمومته خاصة ضد المياه، وهي مشكلة رئيسية لا تزال تهدد البناء بالطوب، مع اقتراح حلول تسمح باستخدام هذه المواد على نطاق واسع من أجل الشروع في حلول ملموسة لسكان البلدان السائرة في طريق النمو.

وقد استخدمنا لهذا الغرض أربعة نسب من نفايات النخيل غير المعالجة والمعالجة (0.3، 0.6، 0.9، 1.2%) من وزن الخليط الجاف. وقد خضعت العينات للتجارب الميكانيكية لمقاومة الضغط ومقاومة الشد في الحالة الجافة وكذلك لاختبارات الديمومة، الامتصاص الكلي والشعيري، والانتفاخ، والتآكل، والكشط، والتجفيف/الترطيب، والهجوم الخارجي بالكبريتات.

وأظهرت النتائج التي تم التوصل إليها أن الطوب المشكل من 70% من التربة و30% من الرمال المسحوقة والمثبت بنسبة أعطى 12% من الجير من وزن الخليط الجاف، مع علاج في الفرن لمدة تسعة أيام عند درجة حرارة 65 درجة مئوية، مقاومة أفضل. وتشير النتائج أيضا إلى أنه عند إدراج النفايات يكون هناك انخفاض في قيمة مقاومة الضغط ولكن دون أن تنخفض عن القيمة الموصى بها في مختلف المعايير الدولية وزيادة في امتصاص المياه. ومن ناحية أخرى، هناك تحسن في مقاومة الشد والتآكل والكشط، والتجفيف/الترطيب، والهجوم الخارجي بالكبريتات. كما أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أيضا أن هناك تحسنا طفيفا في الأداء الميكانيكي للطوب وديمومته عند إضافة النفايات المعالجة مقارنة بالنفايات غير المعالجة.

الكلمات المفتاحية: طوب، نفايات النخيل، المقاومة؛ امتصاص المياه؛ معالجة، ديمومة.

Table de matières

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
ABSTRACT	iii
الملخص	iv
Table de matières	v
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE	5
1 CHAPITER 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
1.1 Introduction	6
1.2 Avantages et inconvénients de la terre crue	6
1.3 Les techniques et les procédés de construction	6
1.4 L’adobe	8
1.4.1 Définition	8
1.4.2 La production	9
1.4.3 Modes de production de l’adobe	9
1.4.4 Les produits	10
1.4.5 Avantages de l’adobe et inconvénients	11
1.4.5.1 Les Avantages.....	11
1.4.5.2 Les Inconvénients :.....	12
1.4.6 Exemples de construction en adobes.....	12
1.5 La terre comme matériau de construction	15
1.5.1 Définition de la terre	15

1.5.2	Composition de la terre	15
1.5.3	Rappel sur les argiles.....	16
1.5.3.1	Les minéraux argileux	16
1.6	Les propriétés du matériau terre en construction.....	22
1.6.1	La texture ou granularité	22
1.6.2	La plasticité	23
1.6.3	La compressibilité	24
1.6.4	La matière organique.....	24
1.6.5	Sulfates	25
1.7	La stabilisation de la terre.....	25
1.7.1	Les procédés de stabilisation.....	26
1.7.1.1	La stabilisation mécanique	26
1.7.1.2	La stabilisation physique :	27
1.7.1.3	La stabilisation chimique.....	28
1.7.2	Stabilisation de la terre par la chaux	29
1.7.2.1	Différentes types de chaux	30
1.7.2.2	Fabrication de la chaux.....	31
1.7.2.3	Mécanismes d'action	32
1.7.2.4	Efficacité et dosage.....	34
1.7.3	Effet de la chaux sur la résistance a la compression des terres chaulées	35
1.7.4	Influence de la chaux sur la durabilité des terres chaulées.....	38
1.8	Les fibres	39
1.8.1	Différents types de fibres	40
1.8.2	Les déchets de palmier dattier	42
1.8.3	L'effet de la stabilisation par les déchets végétaux sur les propriétés d'adobe....	45
1.8.3.1	L'effet des déchets sur la densité apparente des briques d'adobe.....	47
1.8.3.2	L'effet des déchets sur la résistance a la compression des briques d'adobe	48

1.8.3.3	L'effet des déchets sur l'absorption d'eau des briques d'adobe	49
1.9	La durabilité des briques de terre renforcée par des fibres de palmier dattier.....	51
1.9.1	Mécanisme de dégradation des fibres végétales.....	51
1.9.2	Méthodes d'amélioration de la durabilité des fibres végétales	52
1.9.3	Traitement des fibres	52
1.9.4	Synthèse des travaux réalisés sur les fibres de palmiers dattier traitées	52
1.10	Conclusion	54
DEUXIÈME PARTIE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....		55
2	Chapitre 2 : Matériaux et méthodes expérimentales.....	56
2.1	Introduction	57
2.2	Les matériaux utilisés	57
2.2.1	Sol.....	57
2.2.1.1	Origine du sol	57
2.2.1.2	Caractéristiques physiques du sol.....	57
2.2.1.3	Analyse chimique et minéralogique du sol.....	59
2.2.1.4	La matière organique	61
2.2.1.5	Analyse physico-chimique	62
2.2.2	Sable concassé.....	62
2.2.3	La chaux	64
2.2.4	L'eau.....	64
2.2.5	Les déchets de palmier dattier	64
2.2.5.1	Traitement des déchets de palmier dattier	65
2.3	Préparation des briques.....	68
2.3.1	Matériels spécifiques.....	68
2.3.2	Composition des mélanges.....	68
2.3.3	Codification des mélanges	70
2.3.4	Préparation des mélanges	70

2.3.5	Mode de cure des briques	71
2.4	Propriétés mécaniques	73
2.4.1	Résistance à la compression sèche	73
2.4.2	Résistance à la traction par flexion	73
2.5	Essais de la durabilité	74
2.5.1	Absorption capillaire	74
2.5.2	Absorption totale	75
2.5.3	Gonflement.....	75
2.5.4	Résistance à l'abrasion	76
2.5.5	Résistance à l'érosion	77
2.5.6	Séchage/ mouillage	78
2.5.7	Attaque sulfatique externe.....	78
2.6	Conclusion	79
3	CHAPITRE 3 : Résultats et discussion	81
3.1	Introduction	82
3.2	Influence des dosages en chaux et temps de cure sur la résistance mécanique d'adobe	82
3.3	Effet de la teneur en déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques d'adobe :	84
3.3.1	La résistance à la compression sèche	84
3.3.2	La résistance à la par flexion.....	87
3.4	Effet des déchets de palmiers dattiers sur la durabilité des briques d'adobe	88
3.4.1	Absorption capillaire	88
3.4.2	Absorption totale	89
3.4.3	Gonflement.....	90
3.4.4	Résistance à l'abrasion	91
3.4.5	Résistance à l'érosion.....	92
3.4.6	Séchage/mouillage	93

3.4.7	Attaque sulfurique externe	94
3.5	Effet de traitement des déchets de palmiers dattiers sur la durabilité d'adobe.....	96
3.5.1	Les propriétés mécaniques des briques d'adobe	97
3.5.1.1	Résistance à la compression sèche	97
3.5.1.2	Résistance à la traction par flexion.....	99
3.5.2	La durabilité des briques d'adobe	101
3.5.2.1	Absorption capillaire	101
3.5.2.2	Absorption totale	102
3.5.2.3	Gonflement	103
3.5.2.4	Résistance à l'abrasion	104
3.5.2.5	Séchage/mouillage.....	106
3.5.2.6	Attaque sulfatique externe	108
3.6	Conclusion	109
CONCLUSION GÉNÉRALE		112
PERSPECTIVES.....		116
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		118
LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE ...		128

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma des différentes techniques de construction en terre	7
Figure 1.2 : Moulage et séchage des briques d'adobes	8
Figure 1.3 : Les cycles de production des briques d'adobes	9
Figure 1.4 : Différents moules des briques d'adobes	11
Figure 1.5 : Grande mosquée de Djenné, mali /1906-1907	12
Figure 1.6 : La citadelle de Bam, Iran V siècle.....	13
Figure 1.7 : Shibām, Yémen, époque préislamique	14
Figure 1.8 : Villa de Tombouctou, Mali	14
Figure 1.9 : L'extension d'une école, Gando, Burkina Faso, Kéré architecture, 2008	14
Figure 1.10 : schéma de la structure de la kaolinite	17
Figure 1.11 : vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	17
Figure 1.12 : photographie à microscope à balayage Électronique d'une kaolinite cristallisée de Georgie. La longueur du trait de lumière et de 5 μm	18
Figure 1.13 : schéma de la structure de la montmorillonite	19
Figure 1.14 : vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite	19
Figure 1.15 : photographie à microscope à balayage Électronique d'une montmorillonite sodique du Wyoming. La longueur du trait de lumière et de 5 μm	20
Figure 1.16 : Schéma de la structure de l'illite	21
Figure 1.17 : photographie à microscope à balayage Électronique d'une illite de Fithian, Illinois La longueur du trait de lumière et de 5 μm	21
Figure 1.18 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre	23
Figure 1.19 : Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre	24
Figure 1.20 : Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en sable.....	27
Figure 1.21 : Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPA.	28
Figure 1.22 : Influence de l'ajout de chaux hydratée sur les limites d'Atterberg d'un sol	35
Figure 1.23 : Résistance à la compression et consommation de la chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et du temps	36
Figure 1.24 : Evolution de la résistance en compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux.....	37

Figure 1.25 : Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0% chaux, (b) 4% chaux, (c) 6% chaux, (d et e) 10% chaux, (f) 12% chaux	37
Figure 1.26 : Influence de la stabilisation à la chaux sur deux murs en pisé (à gauche : pisé stabilisé à 5% de chaux hydraulique, à droite pisé non stabilisé)	38
Figure 1.27 : Influence de la proportion d'additifs sur le potentiel de gonflement d'une argile expansive	39
Figure 1.28 : Classification des différents types de fibres naturelles.....	40
Figure 1.29 : Forêt de palmier dattier.....	42
Figure 1.30 : Schéma d'une palme.....	43
Figure 1.31 : Arbre de palmier dattier.....	44
Figure 1.32 : La densité apparente de briques d'adobe renforcées avec différents déchets. ..	47
Figure 1.33 : La résistance à la compression des briques d'adobe renforcées par des différents types de déchets.....	49
Figure 1.34 : L'absorption d'eau des briques d'adobe renforcées par des différents types de déchets	50
Figure 1.35 : Résistance à la traction des fibres de palmier dattier.....	53
Figure 2.1: La courbe granulométrique du sol.	58
Figure 2.2 : Diagramme de plasticité.	59
Figure 2.3 : Le Diffractogramme de rayon X de sol	61
Figure 2.4 : La courbe granulométrique du sable concassé.	63
Figure 2.5 : Déchet de palmier dattier.....	65
Figure 2.6 : Traitement de déchets de palmier dattier par différents produits	67
Figure 2.7 : Les moules utilisés pour la confection des briques d'adobes.	68
Figure 2.8 : Préparation des briques d'adobe.....	72
Figure 2.9 : Essai de la résistance à la traction par flexion.	73
Figure 2.10 : Essai de l'absorption capillaire.....	74
Figure 2.11 : Essai de gonflement.....	75
Figure 2.12 : Essai de la résistance à l'abrasion.....	76
Figure 2.13 : Essai de la résistance à l'érosion	77
Figure 3.1 : Résistance à la compression d'ABSD en fonction du temps de cure et des dosages en chaux.....	83
Figure 3.2 : Résistance à la compression d'ABAD.....	85
Figure 3.3 : Analyse MEB des briques d'adobe sans déchets.....	86
Figure 3.4 : Analyse MEB des briques d'adobe avec déchets	86

Figure 3.5 : Résistance à la traction par flexion d'ABAD.	87
Figure 3.6 : Absorption capillaire d'ABAD.	89
Figure 3.7 : Absorption total d'ABAD.	90
Figure 3.8 : Gonflement d'ABAD.	91
Figure 3.9 : Résistance à l'abrasion d'ABAD.	92
Figure 3.10 : Résistance à l'érosion d'ABAD.	93
Figure 3.11 : Séchage/Mouillage d'ABAD.	94
Figure 3.12 : Attaque en sulfate d'ABAD.	96
Figure 3.13 : Attaque sulfatique externe d'ABAD, de gauche à droite 5, 10, 15% de concentration de sodium de sulfate	96
Figure 3.14 : Résistance à la compression des briques d'adobe.	98
Figure 3.15 : Résistance à la traction par flexion des briques d'adobe.	100
Figure 3.16 : Absorption capillaire des briques d'adobe.	102
Figure 3.17 : Absorption total des briques d'adobe.	103
Figure 3.18 : Gonflement des briques d'adobe.	104
Figure 3.19 : Résistance à l'abrasion des briques d'adobe.	106
Figure 3.20 : Séchage/Mouillage des briques d'adobe.	107
Figure 3.21 : Attaque sulfatique externe des briques d'adobe renforcées avec 1.2% de déchets	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Revue de la littérature sur les différents types de fibres étudiées.	45
Tableau 2.1 : les masses volumiques du sol	57
Tableau 2.2 : Les limites d’Atterberg du sol.....	59
Tableau 2.3 : L’analyse chimique du sol.	60
Tableau 2.4 : Composition minéralogique du sol.	60
Tableau 2.5 : Valeur du bleu de méthylène.	62
Tableau 2.6 : Caractéristique physique du sable concassé.	63
Tableau 2.7 : Composition chimique du sable concassé.....	63
Tableau 2.8 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive.....	64
Tableau 2.9 : Les propriétés physiques des déchets de palmier dattier.	65
Tableau 2.10 : Les propriétés mécaniques des déchets de palmier dattier.	65
Tableau 2.11 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude	69
Tableau 2.12 : Codification des mélanges	70

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A.S.T.M : American Society for Testing and Materials

AFNOR : Association française de normalisation

ATE : Absorption totale à l'eau

BTC : Bloc de terre comprimée

RCS : Résistance à la compression sèche

RTF : Résistance à la traction par flexion

DRX : Diffraction aux rayons X

MEB : Microscope à balayage électronique

ABSD : Adobe brique sans déchets de palmier dattier

ABAD : Adobe brique avec déchets de palmier dattier sans traitement

ABTE : Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par l'eau

ABTR : Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Résine

ABTF : Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Flintkote

ABTV : Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Vernis

ABTC : Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par la chaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années comme en témoignent les sites archéologiques découverts dans de nombreux endroits à travers la planète. La terre crue, comme d'autres matériaux naturels tels que la pierre et le bois, fait partie des premiers matériaux utilisés par l'homme dans la construction des logements d'habitations. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le ciment et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en voie de développement comme dans les pays industrialisés. Aujourd'hui on estime que l'habitat d'un tiers de l'humanité est encore en terre.

Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction tels que le béton et l'acier, nous assistons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans des pays du tiers monde comme dans les pays industrialisés. Une des raisons de l'utilisation de la terre en construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et sa bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en saison chaude et qui conserve la chaleur en saison froide.

Malgré tous les avantages reconnus aux constructions en terre crues, ce matériau souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité présente sous sa forme non stabilisée quelques défauts tels que : le déficit en résistance mécanique, la fissuration systématique due au retrait et surtout sa forte sensibilité à l'eau. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à corriger ses défauts en utilisant plusieurs moyens de stabilisation de la terre en vue d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau. Cette tentative a conduit à la naissance de plusieurs produits en terre : l'adobe, le pise, le torchis, la brique de terre comprimée (BTC) et autres. La technique des briques crues ou l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques avec de la terre à l'état plastique, qui peut également être mélangé à des fibres végétales, puis laisser sécher au soleil. Avec les briques d'Adobe on peut réaliser différentes parties d'un ouvrage, on peut construire les murs extérieurs et intérieurs ainsi que des voûtes et coupoles.

La valorisation des déchets d'origine végétale (fibres, tissus, tiges, ...) pour le développement du secteur de la construction vise plusieurs objectifs : économique, technique et environnemental. Leur disponibilité en abondance dans la nature, leurs propriétés physico-mécaniques et thermiques, permettent de les classer parmi les ressources stratégiques des énergies renouvelables qui peuvent être exploitées énormément dans la confection des matériaux destinés à des systèmes constructifs ou à des systèmes de remplissages réalisés à une cadence élevée surtout dans le domaine de l'habitat collectif et/ou individuel.

L'Algérie possède des ressources naturelles renouvelables très importantes et parmi ces ressources, les palmiers dattiers. Plus de 18 millions de palmiers dattiers produisant plus de 800 variétés de dattes existent dans les oasis du sud Algérien qui lui permettent d'être classé cinquième au monde. Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse avec cinq types de fibres: fibres de feuilles dans le pédoncule, fibre de la tige de pédoncule, fibre de liffe, les fibres de bois dans le tronc et les fibres de surface autour du tronc. L'entretien annuel des palmiers dattiers produit un gisement renouvelable estimé à 200 000 tonnes de déchets renouvelables constituent essentiellement de palmes sèches. Les déchets de palmier dattier sont de nature hydrophile, car elles sont dérivées de la cellulose, qui contient des groupes hydroxyles fortement polarisés. La mauvaise adhérence interfaciale déchets/matrice et les difficultés dans le mélange en raison de mauvais mouillage des déchets avec la matrice limitent l'utilisation de ces déchets comme matière de renforcement dans les matériaux bio-composites. En effet, il est question dans cette thèse de développer des matériaux de construction en utilisant des matières minérales (sol) et végétales (déchets de palmier dattier) disponibles localement en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de cout abordable et qui s'accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions de l'Algérie, et plus précisément la région sud du pays, et ceci pour améliorer la situation de la population face à la crise d'habitat surtout dans les zones rurales.

Dans ce cadre, cette thèse a pour objectif général d'étudier les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobes stabilisées par la chaux et renforcées par les déchets de palmiers dattier non traitées et traitées par différents produits pour améliorer la durabilité des briques. Les objectifs spécifiques consistent à :

- Étudier l'effet de la stabilisation des briques par différents dosages en chaux et différentes périodes de cure à l'étuve sur la résistance à la compression.
- Étudier l'effet de renforcement des briques par différentes teneurs en déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et la durabilité vis-à-vis de l'eau.
- Étudier l'effet de traitement des déchets de palmier dattier par différents produits sur les propriétés mécaniques et durabilité des briques d'adobes.

L'organisation du travail se fait de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre et en particulier les briques d'adobes, rappel sur les différents types d'argile, les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation. Ce chapitre présentera aussi les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la présence des fibres et particulièrement les fibres de palmier dattier sur les propriétés physiques, mécaniques et durabilités des briques de terre.

La deuxième partie, composée de deux chapitres (chapitre 2 et chapitre 3), est consacrée à l'étude expérimentale.

Le chapitre 2 fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable concassé, la chaux et les déchets de palmier dattier). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des briques, les traitements des déchets utilisés, les techniques de conservation des éprouvettes et finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.

Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre 3. Ces résultats montrent l'effet des différentes teneurs en déchets de palmier dattier (sans et avec traitement), sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'Adobe.

Une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives d'études complémentaires.

Enfin, nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à la valorisation des fibres végétales du déchet de palmier dattier au climat chaud et sec.

PREMIÈRE PARTIE

1 CHAPITER 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années, la terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. Plus de 50% de la population mondiale vit dans une habitation en terre crue, Elle représente 17% des édifices classés au patrimoine par l'UNESCO [1]. Aujourd'hui plusieurs études s'intéressent à l'étude des propriétés mécaniques et la durabilité du matériau terre afin d'atteindre ces performances.

1.2 Avantages et inconvénients de la terre crue

La terre crue offre beaucoup d'avantages. En effet c'est un matériau écologique à 100% recyclable, elle a aussi une bonne inertie thermique et acoustique et offre une bonne perméabilité à la vapeur d'eau ce qui lui permet d'être un régulateur naturel de la température. Dans les chantiers, la terre crue est simple pour la mise en œuvre, bon marché et a une faible dépense énergétique [2]. Cependant en construction deux problèmes majeurs font face à l'utilisation de la terre crue, l'industrialisation et sa résistance à l'eau. Effectivement, la fabrication des briques en terre crue par exemple demande beaucoup de temps et d'espace :

- La terre crue nécessite beaucoup de temps pour sécher.
- On ne peut pas empiler, ni ranger les briques en terre crue si elles ne sont pas sèches.

Par conséquent le temps et l'espace que demande sa fabrication influent souvent sur le cout des constructions, environ 30% plus chères que les constructions classiques [3]. Aussi l'eau est l'ennemi inconditionnel de la terre crue, par ses actions répétitives sur le matériau il cause beaucoup de dégâts (érosion de la surface, écoulement partiel, insalubrité due à un état humide durable, murs creusés en leurs bases...)

1.3 Les techniques et les procédés de construction

La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, plusieurs techniques de construction sont répandues à travers le monde, elles varient selon le lieu et ses contraintes, cultures ... etc. Parmi ces techniques les plus connues on retrouve :

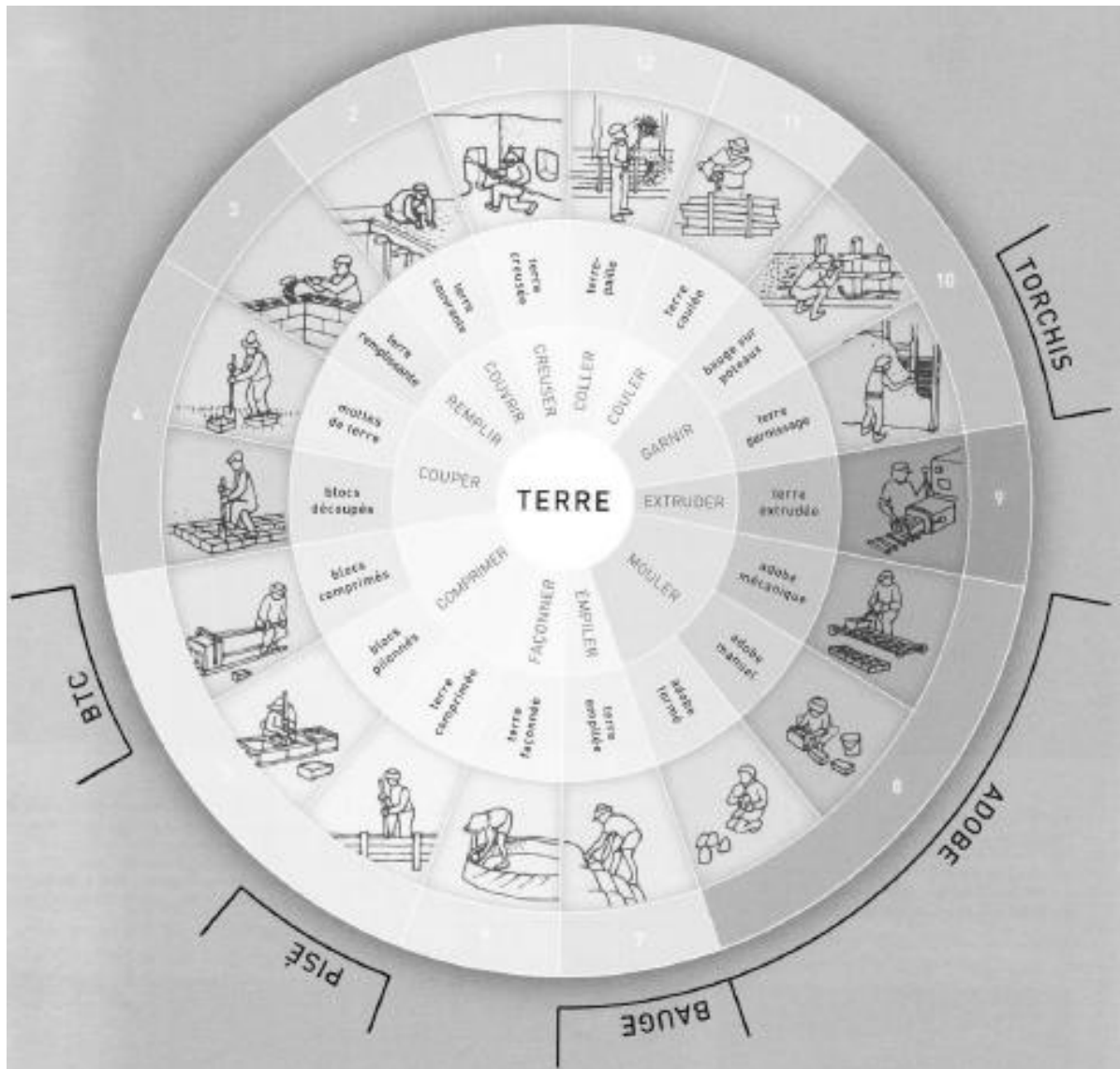


Figure 1.1 : Schéma des différentes techniques de construction en terre [4]

- Le pisé : le pisé est un procédé de mise en œuvre de la terre qui a été et reste employé dans le monde entier (Maroc, France, Danemark ...), au début, on construit un coffrage que l'on remplit de terre argileuse humide qui est damée couche après couche à l'aide d'un pilon [5]
- La bauge : la bauge est un système constructif de terre empilée, c'est une technique qui consiste à modeler des formes directement sans coffrage, en utilisant la plasticité des sols humides.
- Le torchis : le torchis est une technique de remplissage en terre crue, il s'agit d'une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille.

- Blocs de terre comprimée (BTC) : la terre est comprimée, sous forme de bloc, dans un moule. Auparavant, la terre était compactée dans un moule à l'aide d'un petit pilon, ou en rabattant avec force un couvercle très lourd dans le moule. Aujourd'hui on utilise des presses dont il existe une grande variété.

1.4 L'adobe

1.4.1 Définition

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelée 'Adobes', c'est une technique utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité de la paille hachée ou d'autres fibres. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine); mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi-ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle. Selon Richard et Makrim [6,7], le sable réduit la probabilité de microfissures dans les briques de terre, l'argile agglutine les particules. Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon à fabriquer des petits éléments de maçonnerie qui sont démoulés et séchés directement au sol (Figure 1.2). La construction en Adobe est a été employée dans le monde entier tels : la chine aux pays du monde orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, et au État unis d'Amérique.



Figure 1.2 : Moulage et séchage des briques d'adobes [7]

1.4.2 La production

La production des briques d'Adobe (figure 1.3) doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction.

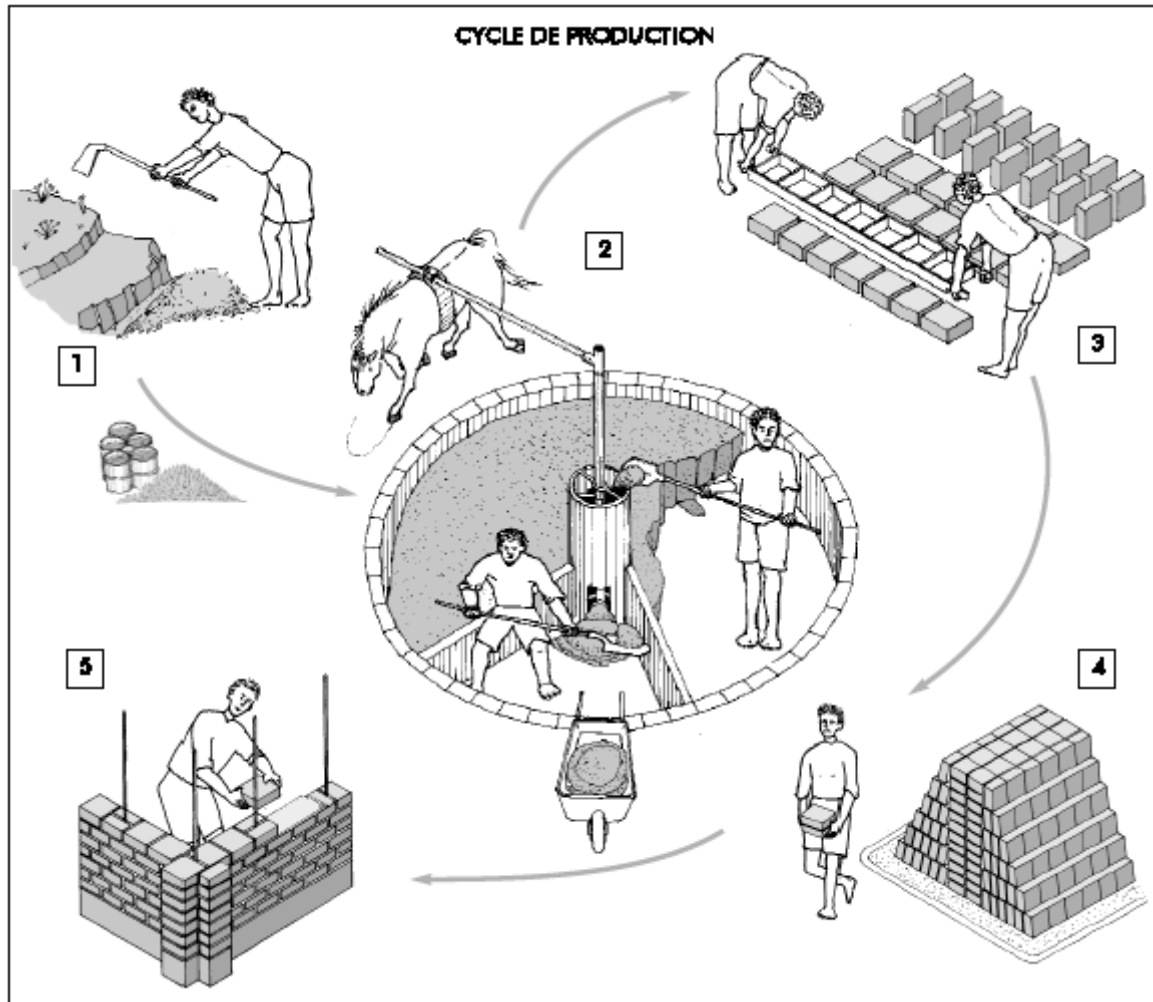


Figure 1.3 : Les cycles de production des briques d'adobes [8]

1.4.3 Modes de production de l'adobe

On distingue deux principaux modes de production d'adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé.

A. Le mode de production manuel

A.1 Moules simples

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule façonné à la main, la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi-ferme. La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi-molle et selon une méthode dite 'coup d'eau' (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le

démoulage), soit de forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite ‘coup de sable’ (le moule préalablement nettoyé et mouillé est saupoudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuels le rendement moyen de production se situe de 400 à 600 blocs par jour pour deux ouvriers [9, 10, 11]

A.2 Moules multiples

Il associait l’utilisation de grands moules à compartiment multiples, généralement en forme d’échelle ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l’état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxage qui est alors mobile et tracté par ou sur camion. Les moules doivent être manipulés facilement par deux ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d’y déverser la terre. Compte tenu de l’état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produits de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante.

Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L’organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, la production moyenne pour ce type d’organisation est de l’ordre de 8000 à 10000 blocs par jour [9, 10, 11]

B Le mode de production mécanisé

La production mécanisée de bloc d’Adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux États-Unis d’Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d’un système de trémie mobile au-dessus d’un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés, ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30000 blocs par jour [9, 10,11]

1.4.4 Les produits

Les produits de la fabrication des adobes manuelle ou mécanisée (Figure 1.4), sont extrêmement variés, ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs et aux dimensions d’emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules

utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de formes très variées [12]. Les dimensions les plus fréquentes de 30X30X15 cm ou 30X14X10 cm.

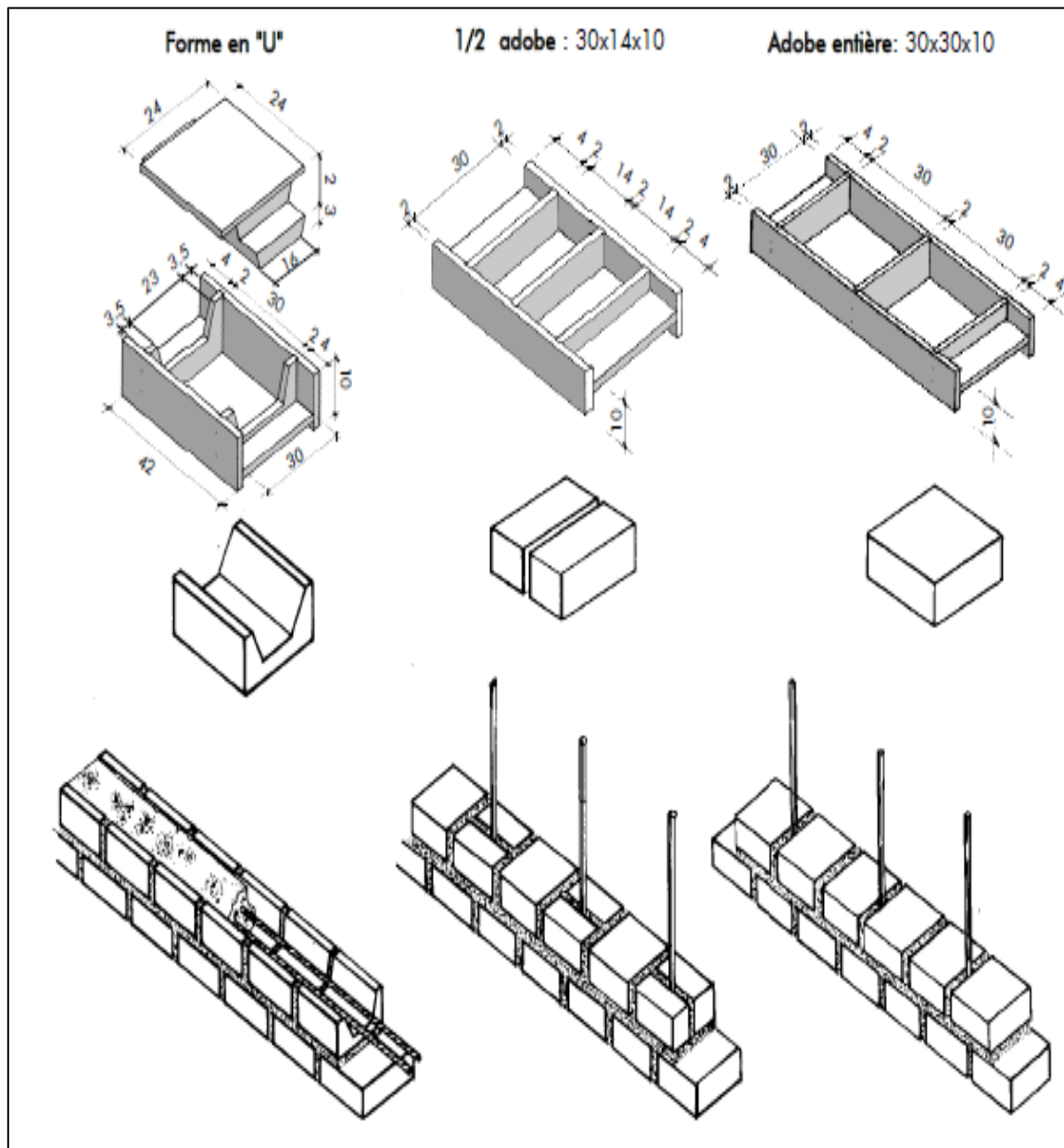


Figure 1.4 : Différents moules des briques d'adobes [13]

1.4.5 Avantages de l'adobe et inconvénients

1.4.5.1 Les Avantages

L'adobe possède plusieurs avantages qui se résument en :

- Matière première facilement et localement disponible.

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air et d'emmagasinier la chaleur.
- Réduire la consommation de l'énergie et ne produire aucune pollution.
- Construction peu coûteuse
- Combustible inutil et accessible à tous.

1.4.5.2 Les Inconvénients :

- Consomme beaucoup d'eau.
- Temps de séchage en fonction du climat.
- Faible résistance à l'eau.

1.4.6 Exemples de construction en adobes

On trouve aujourd'hui de nombreuses constructions en adobes à travers le monde. A titre d'exemple la grande mosquée de Djenné au mali (Figure 1.5), qui est le plus grand édifice du monde en terre crue adobe. Un premier édifice fut construit en ce lieu eut XIIIe siècle, mais la construction date seulement les environs de 1907.



Figure 1.5 : Grande mosquée de Djenné, mali /1906-1907 [13]

La figure 1.6 représente la citadelle de Bam, Iran V siècle, qui était le plus grand ensemble construit en Adobe du monde. Il est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 2004.



Figure 1.6 : La citadelle de Bam, Iran V siècle [14]

On peut citer encore la très ancienne ville de Shibām, Yémen, dans la première préoccupation humaine remontée à l'époque préislamique, est remarquable par son architecture en immeubles de brique de terre crue de plusieurs étages (jusqu'à 8 atteignant 30 mètres) (Figure 1.7), et villa de Tombouctou, Mali (Figure 1.8), et l'extension d'une école, Gando, Burkina Faso, Kéré architecture, 2008 (Figure 1.9)



Figure 1.7 : Shibām, Yémen, époque préislamique
[14]



Figure 1.8: Villa de Tombouctou, Mali
[13]



Figure 1.9: L'extension d'une école, Gando, Burkina Faso, Kéré architecture, 2008 [13]

1.5 La terre comme matériau de construction

1.5.1 Définition de la terre

Au niveau géologique la terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches-mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. A l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil ou encore le gel, les particules de roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petites, les sédiments. Les matières organiques présentes dans le sol contribuent également à sa dégradation. Au niveau microscopique la terre est constituée par nature de différentes phases. La première est la phase liquide contenant majoritairement de l'eau et quelque corps en solution, le second est la phase gazeuse, qui contient essentiellement de l'air. Enfin la phase solide comprend des matières minérales et organiques insolubles dans l'eau [14]

1.5.2 Composition de la terre

Les sols sont constitués de différentes proportions de quatre types de matériaux sous forme de grains. On retrouve dans un ordre granulométrique décroissant, les graviers, les sables, les limons et les argiles. Ces quatre types de grains se comportent de façon différente vis-à-vis des paramètres extérieurs comme l'hygrométrie. Les graviers et les sables sont stables, tandis que les limons et argiles subissent des variations liées à leur environnement. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire la capacité à résister à une humidité et à un dessèchement sans changement de propriétés, revête une importance fondamentale pour un matériau de construction.

- Les graviers de 2 à 20 mm : sont constitués de morceaux de roche originale de dureté variable. Ils forment le squelette stable du sol, leurs propriétés mécaniques ne subissent aucun changement détectable en présence d'eau et limitent donc retrait et capillarité.
- Les sables de 0,06 à 2 mm : également des constituants stables composés principalement de quartz et silice, ils manquent de cohésion à sec mais présentent une grande friction interne. Lorsqu'ils sont mouillés, ils présentent une cohésion apparente en raison de la tension superficielle de l'eau occupant les vides entre les particules, leur perméabilité et leur structure ouverte sont caractéristiques.

- Les silts de 0,002 à 0,06 mm: les fractions silteuses sont assimilables aux sables mais avec un diamètre moindre et une perméabilité plus élevée, lorsqu'ils sont exposés à différents niveaux d'humidité, ils gonflent et se rétrécissent, évoluant sensiblement en volume.
- Les colloïdes inférieurs à 2 μm : cette catégorie comprend majoritairement des argiles mais il existe en d'autres colloïdes composés des particules très fines cristallisées ou organiques.

La terre présente à la surface de notre planète peut-être transformée facilement pour constituer un matériau de construction idéal, les grains très fins peuvent être agglomérés entre eux lorsqu'on les mélange avec de l'eau et les met en forme. Les caractéristiques physiques et chimiques des argiles sont différentes de celles des autres constituants de la terre, elles contribuent de manière importante aux propriétés de la terre, elles lui apportent sa plasticité en condition très humide [14]

Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des briques d'adobes, il est nécessaire de connaître le comportement des argiles vis-à-vis de l'eau et leurs structures.

1.5.3 Rappel sur les argiles

La taille des particules d'argile est inférieure à 0,002 mm (2 μm). Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques. Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires. Physiquement, les argiles sont très souvent de forme plate et allongée, lamellaire. Leur surface spécifique est infiniment plus grande que celle des particules grossières de forme sphérique ou anguleuse, les argiles sont notoirement sujettes au gonflement et au retrait [15]

1.5.3.1 Les minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont des très petits cristaux colloïdaux (de diamètre inférieur à 1 μm), qu'on ne peut voir qu'au microscope électronique. Les cristaux ressemblent à de minces plaques ou plaquettes, des études par diffraction de rayons X, ont permis aux chercheurs d'établir que ces plaquettes sont un empilement de feuillets à structure atomique répétée, en réalité, il n'existe que deux types de feuillets de cristaux de base, les feuilles en tétraèdre ou de silice et les feuillets en octaèdre ou d'alumine. Leur constitution se différencie par le mode d'empilement de ces feuillets et par les divers liants et ions métalliques contenus dans le treillis cristallin. On dénombre un très grand nombre d'espèces

d'argile mais les trois types les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, le chlorite.

- la kaolinite : la kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (silice) et de feuillets en octaèdre (aluminium ou gibbsite). à cause de l'empilement d'une couche de chacun des deux feuillets de base (Figure 1.10), les deux feuillets sont liés de telle manière que les sommets du feuillet de silice et ceux d'une des couches du feuillet en octaèdre ne forment qu'une seule et même couche, comme le montre la Figure 1.11, cette couche a une épaisseur d'environ 0,72 nm, et elle s'étend indéfiniment dans les deux autres directions. Un cristal de kaolinite est donc constitué d'un empilement de quelques couches de base de 0,72 nm d'épaisseur, les couches de base successives sont maintenues ensemble par les liens d'hydrogène entre les hydroxyles du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Les liens d'hydrogène étant très forts, ils empêchent l'hydratation, ce qui permet un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grandes dimensions, un cristal de kaolin peut être constitué d'une succession de 70 à 100 couches [16], la Figure 1.12 représente une photographie au microscope à balayage électronique de la kaolinite.

La kaolinite est la principale composante de la porcelaine, on l'utilise également dans l'industrie du papier, de la peinture et de la pharmacie.

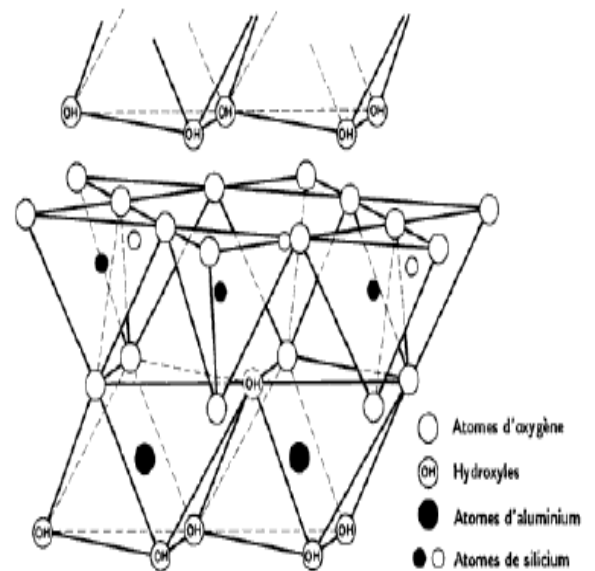
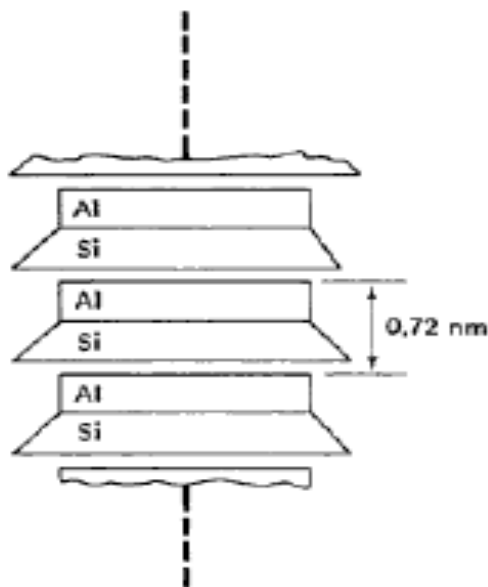


Figure 1.10 : schéma de la structure de la kaolinite [16] Figure 1.11 : vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [16]

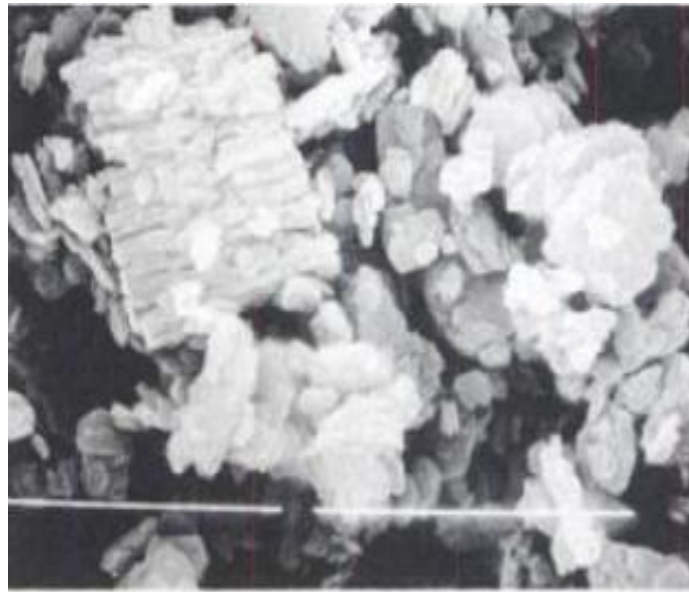


Figure 1.12: photographie à microscope à balayage Électronique d'une kaolinite cristallisée de Georgie. La longueur du trait de lumière est de 5 μm [16]

- La montmorillonite : parfois appelée smectite, est un minéral argileux important, composée de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine (gibbsite)(Figure 1.13), le feuillet en octaèdre se trouve entre deux feuillets de silice et les sommets des tétraèdres se confondent avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche, comme à la Figure 1.14, l'épaisseur de chaque couche est d'environ 0,96 nm, à l'instar de la kaolinite, les couches peuvent se prolonger indéfiniment dans les deux autres directions, les forces de van der Waal qui soude les sommets des feuillets de silice sont faibles, cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans le feuillet en octaèdre. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. Bien que les cristaux de montmorillonite puissent être très petits (Figure 1.15), ils ont une forte affinité avec l'eau, les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente, les pressions de gonflement qui en résultent peuvent facilement causer les dommages aux structures légères et aux pavages, la montmorillonite est la principal composant des boues de forage et des litières pour chats, on la rencontre aussi fréquemment dans les produits industriels et pharmaceutiques, elle entre même dans la fabrication du chocolat [16]

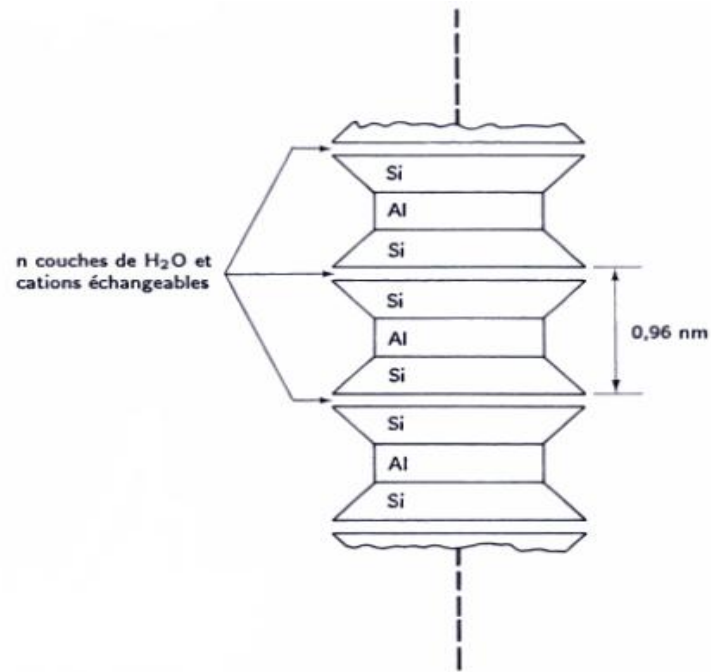


Figure 1.13: schéma de la structure de la montmorillonite [16]

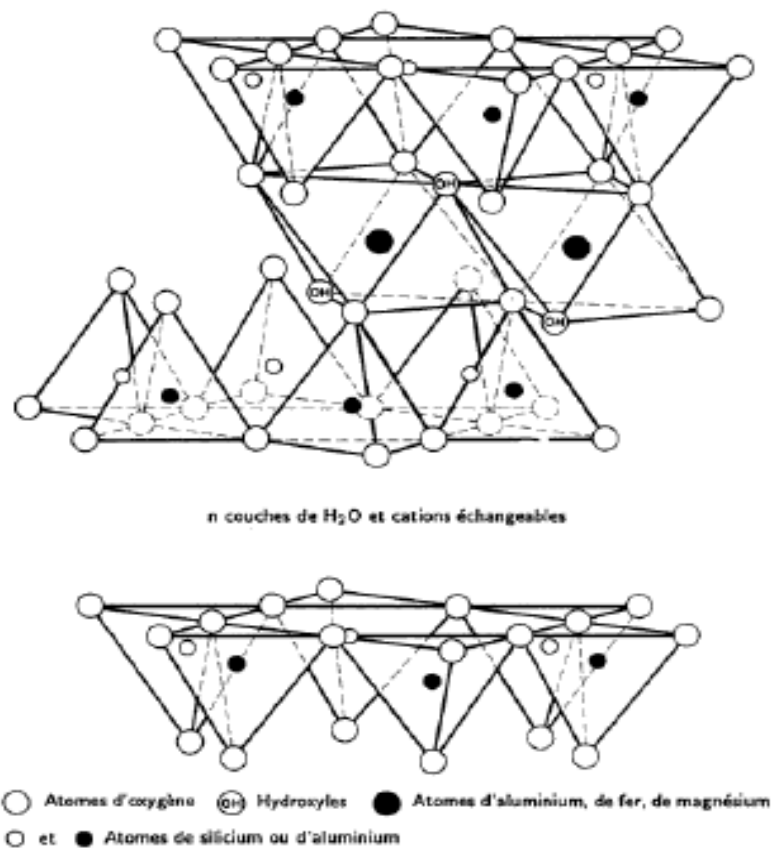


Figure 1.14: vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite [16]

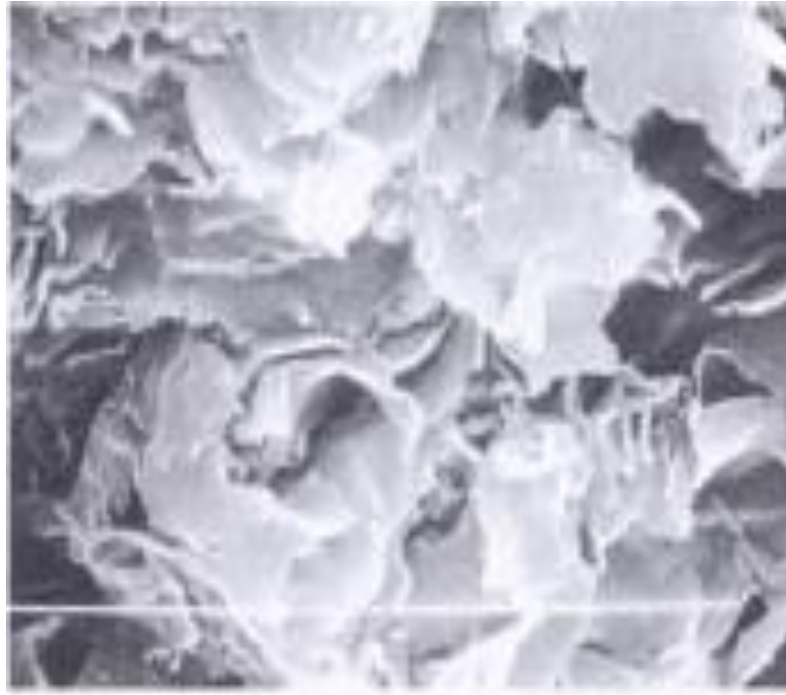


Figure 1.15: photographie à microscope à balayage Électronique d'une montmorillonite sodique du Wyoming. La longueur du trait de lumière est de 5 μm [16]

- L'illite : qui est une autre composante importante des sols argileux, a été découverte par le professeur R. E Grim de l'université de l'Illinois, dans son cas, cependant, les espaces entre les couches sont reliés par un atome de potassium. Le diamètre du trou hexagonal qu'on a remarqué dans le feuillet de silice (Figure 1.16), correspond exactement à l'atome de potassium qui, en le comblant crée un lien très fort entre les couches (Figure 1.17). On peut aussi rencontrer, dans le feuillet de silice, certaines substances isomorphes de silicium par l'aluminium. L'illite a une structure cristalline semblable à celle des minéraux micacés, elle contient cependant moins de potassium, comporte moins de substances isomorphes que les autres micas et elle est chimiquement plus active que ces derniers. On peut voir, à la Figure 19, une photographie au microscope à balayage électronique d'une illite.

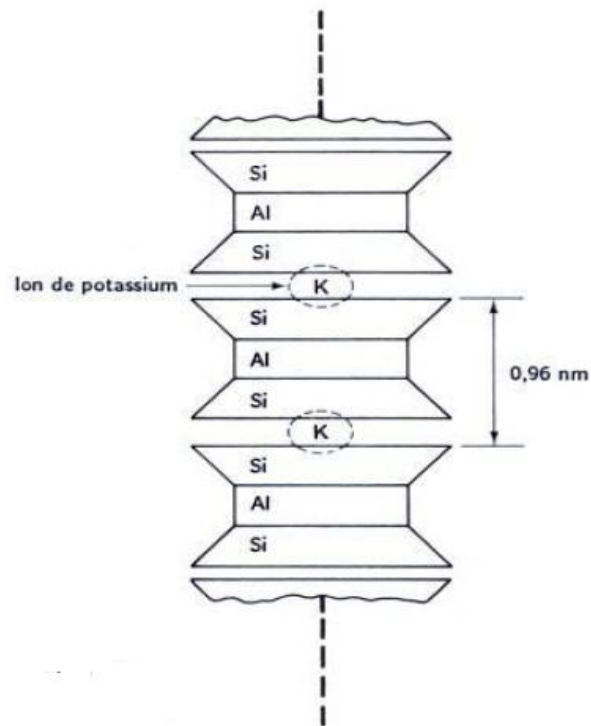


Figure 1.16: Schéma de la structure de l'illite [16]

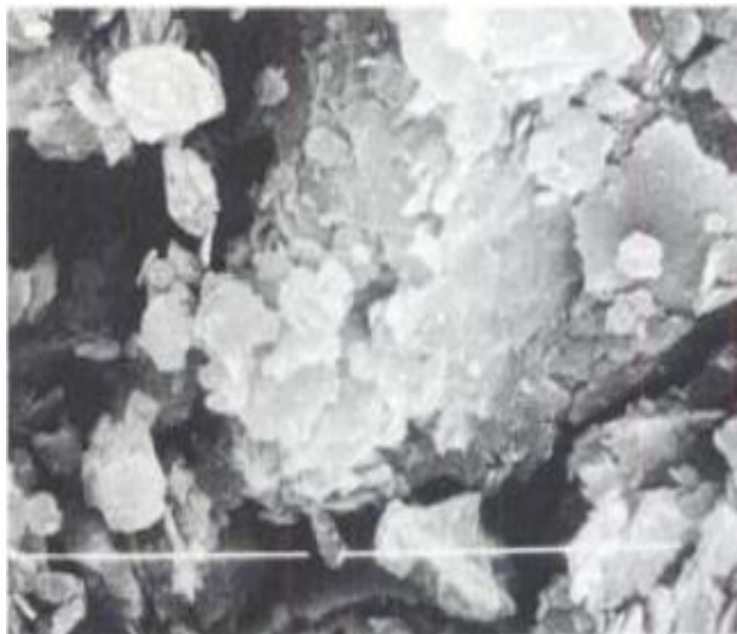


Figure 1.17: photographie à microscope à balayage Électronique d'une illite de Fithian, Illinois La longueur du trait de lumière est de 5 μm [16]

1.6 Les propriétés du matériau terre en construction

Les propriétés de la terre changent d'un sol à l'autre en fonction de la nature des fractions de particules qui la composent, en général, c'est la fraction dominante d'un sol qui caractérise ses propriétés fondamentales dites son comportement, on peut distinguer d'une part les propriétés chimiques qui sont liées à la présence de sels, d'oxydes et de sulfates, et d'autre part entre par les propriétés physiques, nombreuses et qui incluent la couleur, la stabilité structurelle, l'adhérence, la densité apparente sèche, la teneur en humidité, la porosité, la capacité d'absorption, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance à la sécheresse etc. la compréhension de ses propriétés chimiques et physiques permet de définir la qualité et la performance d'un sol à des fins constructives, parmi toutes ses caractéristiques [17], on distingue cinq caractéristiques fondamentales qui permettent à elles seules d'avoir une bonne compréhension du type de terre

- La texture
- La plasticité
- La compressibilité
- La matière organique
- Le sulfate

1.6.1 La texture ou granularité

La répartition granulométrique est mesurée en deux temps en fonction de la taille des particules qui ont des rôles différents, les graviers, sables et limons sont étudiés par granulométrie et les argiles (et colloïdes) par analyse de sédimentométrie, les premiers, plus gros, donnent au matériel sa force, tandis que les seconds, très fin, lient l'ensemble [14]

Les retours d'expériences sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence (figure 1.18), les sols doivent contenir une partie argileuse non négligeable, il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques, il pourrait être établi à 5%. Selon Houben [18], le pourcentage d'argile pour l'adobe était compris entre 5% à 29% et selon Walker [19], entre 10% à 40% et la teneur en limon entre 10% à 30%. S'il y a trop d'argile, des fissures se produiront dans les briques lors du séchage. En effet, son instabilité volumique en présence d'eau explique le phénomène et concourt à rendre les briques peu résistantes à l'érosion. Selon Houben [1], s'il y a trop de sable, les grains trop nombreux ne pourront être tous suffisamment liés. La cohésion de l'ensemble sera trop faible et les briques se désagrégeront.

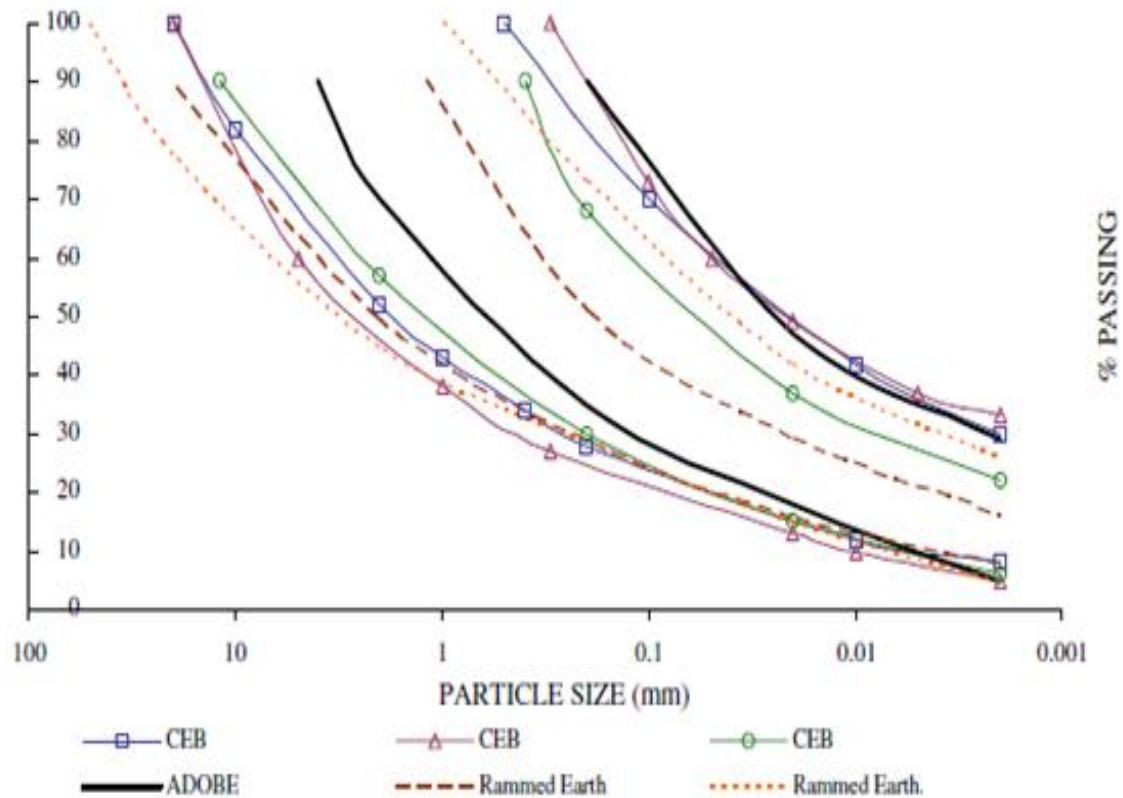


Figure 1.18 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre [20]

1.6.2 La plasticité

La plasticité est l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité LP, l'indice de plasticité IP).

La Figure 1.19 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. L'utilisation de la terre en Adobe demande une limite de liquidité et indice de plasticité plus important par rapport à d'autres techniques de construction en terre. Selon Houben [18], une bonne terre de construction en Adobe ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16% à 33%, et une limite de liquidité entre 31% à 50%.

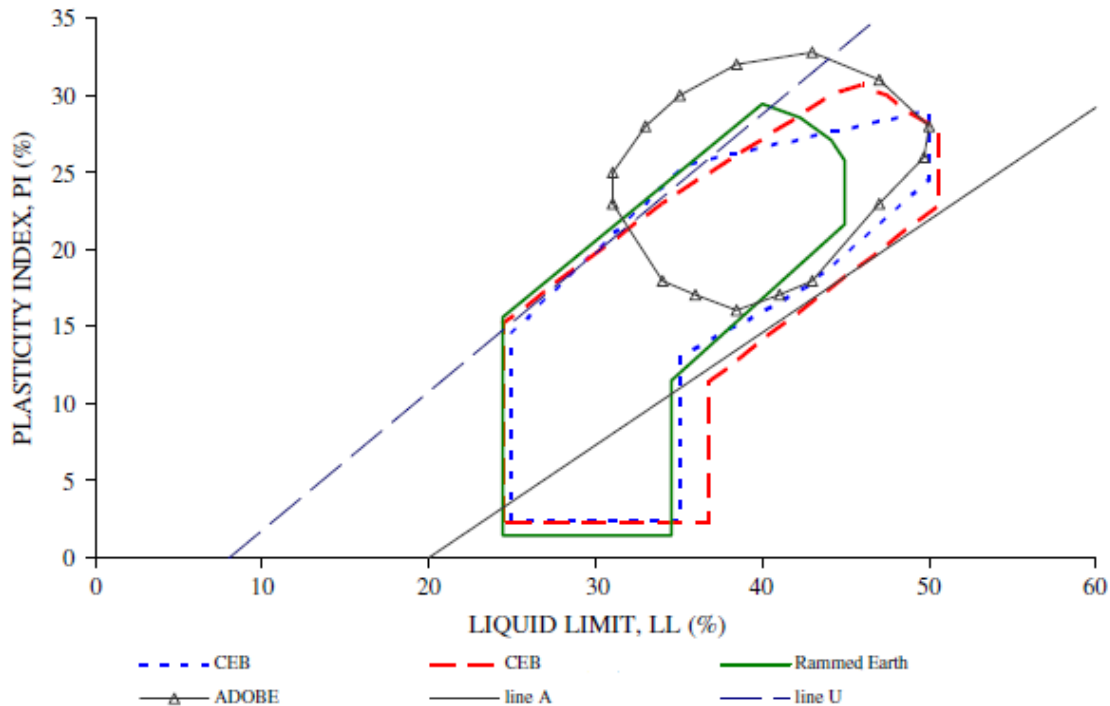


Figure 1.19 : Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [20]

1.6.3 La compressibilité

La compressibilité d'un sol définit sa capacité maximale à se comprimer pour une énergie de compactage donnée à une teneur en eau optimale (TEO), lorsqu'une force est appliquée à une terre, le matériau est comprimé et la proportion de vides diminue, ainsi il est difficile pour l'eau de pénétrer. Cette propriété résulte du réarrangement des particules qui réduit le risque de modification de la structure en présence d'eau. La teneur en eau doit être suffisamment élevée pour lubrifier les particules et leur permettre de se déplacer de manière à occuper le moins d'espace possible. En même temps, la teneur en eau ne doit pas être trop élevée, car si les vides sont pleins d'eau le matériau devient incompressible. La compressibilité d'un sol est mesurée par l'essai Proctor [14].

1.6.4 La matière organique

Elles sont naturellement présentes dans la partie superficielle du sol (terre végétale) ainsi que dans les terrains riches en débris végétaux (tourbe). Certains auteurs considèrent que, pour une utilisation sans stabilisants, la présence dans la terre d'une faible teneur en matières organiques peut présenter un caractère bénéfique. Ils invoquent, par exemple, certaines réactions avec le fer. Dans le cas d'une stabilisation au ciment, leur présence est reconnue comme nocive, elles retardent la prise et provoquent une baisse de résistance, il est certain,

par ailleurs, que tout autant que la teneur en matières organiques, la nature de celles-ci conditionne leur action sur le ciment et sur le sol-ciment. Certaines matières organiques semblent en effet n'avoir que peu d'effets sur le sol-ciment, et il faut noter d'autre part que des additifs secondaires tels le chlorure de calcium (CaCl_2) est susceptible d'en neutraliser la nocivité. En règle générale, et tant que des connaissances plus sûres, n'auront pas été acquises, il conviendra de rejeter les terres contenant des matières organiques. Selon Houben [1] une teneur supérieure à 1% constitue un risque, et qu'il ne faut pas utiliser de terre en contenant plus de 2%.

1.6.5 Sulfates

Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse) et, en de nombreux endroits ont associé sa présence à des dégradations de construction en terre ainsi qu'à des glissements de terrain. Les forts gonflements liés à l'hydratation du sulfate de calcium et sa solubilité sont alors mis en cause. On doit le considérer comme particulièrement suspect. En effet, il peut avoir une double action, en détruisant le ciment durci à l'intérieur du sol-ciment, particulièrement lorsque celui-ci mis en contact avec de l'eau contenant du sulfate dissous (eau séléniteuse) et en augmentant la sensibilité à l'humidité des argiles. Cette dernière action actuellement mal connue, rend inutile l'emploi d'un ciment résistant aux sulfates et il semble que des dégradations du matériau stabilisé soient à craindre même pour de très faibles teneurs en sulfates. Selon Houben [1], une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3% de sulfates est conseillée.

1.7 La stabilisation de la terre

Un procédé de stabilisation peut être défini comme une méthode physique, physico-chimique ou chimique permettant à un sol, à une terre de mieux satisfaire aux exigences qu'impose son utilisation dans un ouvrage. Pour résoudre un problème de stabilisation, il sera donc nécessaire de connaître :

- Les propriétés de la terre à traiter
- Les améliorations souhaitées
- Les produits, matériaux ou procédés utilisables
- Les diverses techniques de mise en œuvre

- Les exigences de réalisation de l'ouvrage tel que couts et délais
- les conditions de l'entretien de l'ouvrage en service

La stabilisation, utilisée de longue date offre un large domaine d'applications liée au génie civil, et quelle que soit l'application concernée elle répond à un nombre réduit d'objectifs :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (porosité)
- Colmater les vides que l'on ne peut supprimer (perméabilité).
- Créer des liens ou améliorer les liaisons existant entre les particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau et de réduire sa sensibilité à l'action de l'eau : gonflement et retrait, diminution des qualités de cohésion et de rigidité, érosion, gélivité. Il est bien entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible [1].

1.7.1 Les procédés de stabilisation

Il existe plusieurs moyens de stabiliser la terre cure, on dénombre trois principaux procédés de stabilisation.

1.7.1.1 La stabilisation mécanique

Elle consiste au compactage de la terre qui modifie sa résistance mécanique, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité. Le compactage resserre donc la texture du matériau, améliore sa capacité portante et réduit les possibilités de déformation ultérieure du terrain. Le sol est mécaniquement traité de sorte qu'un maximum d'air puisse être éliminé, ce qui contribue à une augmentation de sa densité. Le compactage consiste à la réduction du volume des vides remplis d'air sous une action mécanique (pression, damage, charge vibrante...).

Dans la stabilisation mécanique, la distribution granulométrique des particules constitutives du matériau n'est pas affectée, mais sa structure est changée, car les particules sont redistribuées. La stabilisation mécanique est très utilisée et nécessite une analyse préalable du sol afin de déterminer la teneur optimale pour une meilleure compressibilité du sol.

1.7.1.2 La stabilisation physique :

La stabilisation physique consiste à agir sur la texture du matériau en vue de modifier ses propriétés. Parmi celles-ci nous distinguerons deux premiers traitements physiques faisant intervenir des procédés complexes et consommant beaucoup d'énergie, et un troisième, plus simple et peu énergivore :

- Traitement thermique : augmentation (déshydratation) ou diminution de température (gel).
- Traitement électrique : électro-osmose favorisant le drainage de la terre, et lui procurant des caractéristiques structurales.
- Traitement de texture : comblement des pénuries granulométriques dans le but d'obtenir une granulométrie la plus continue possible ou apport de renforts à l'aide des fibres [14].

Les sols disponibles peuvent parfois présenter des caractéristiques susceptibles d'amélioration au moyen d'apport ou de coupures granulaires, c'est ainsi que l'on peut corriger une teneur trop forte ou trop faible en fines ou en gravillons, un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant qu'un sol trop peu plastique le sera par apport des fines (Figure 1.20) [1].

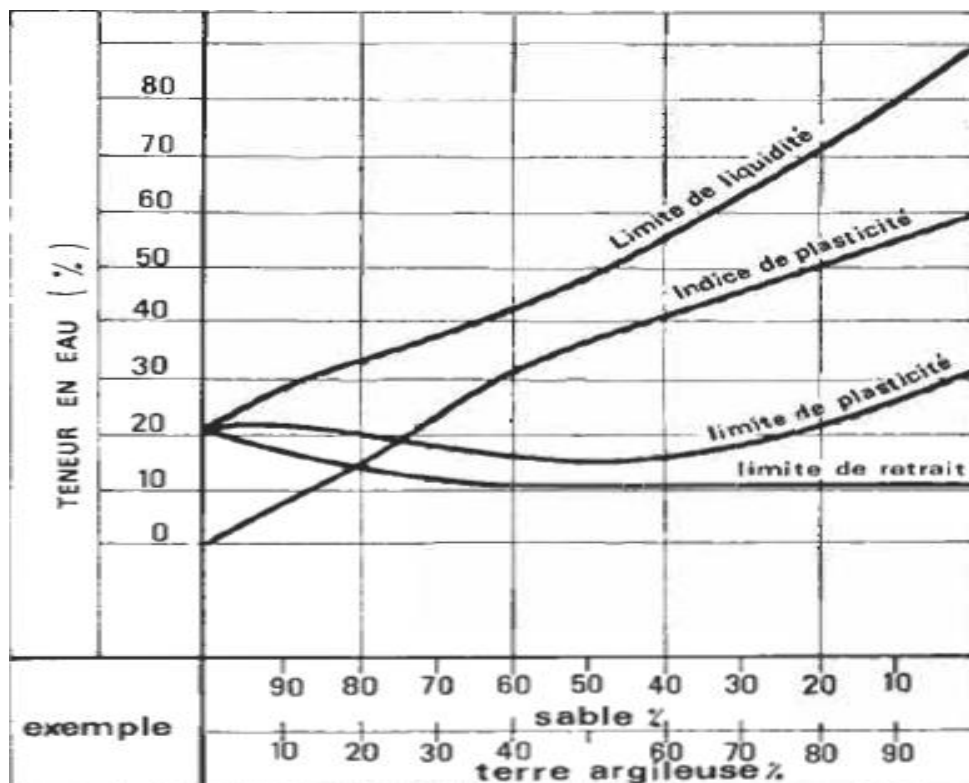


Figure 1.20: Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en sable [1]

Les résistances à la compression à l'état sec et humide augmentent en fonction de la concentration en sable (Figure 1.21), à titre d'exemple, pour 30% de teneur en sable, la courbe montre qu'il y a une évolution de la résistance à l'état sec et à l'état humide.

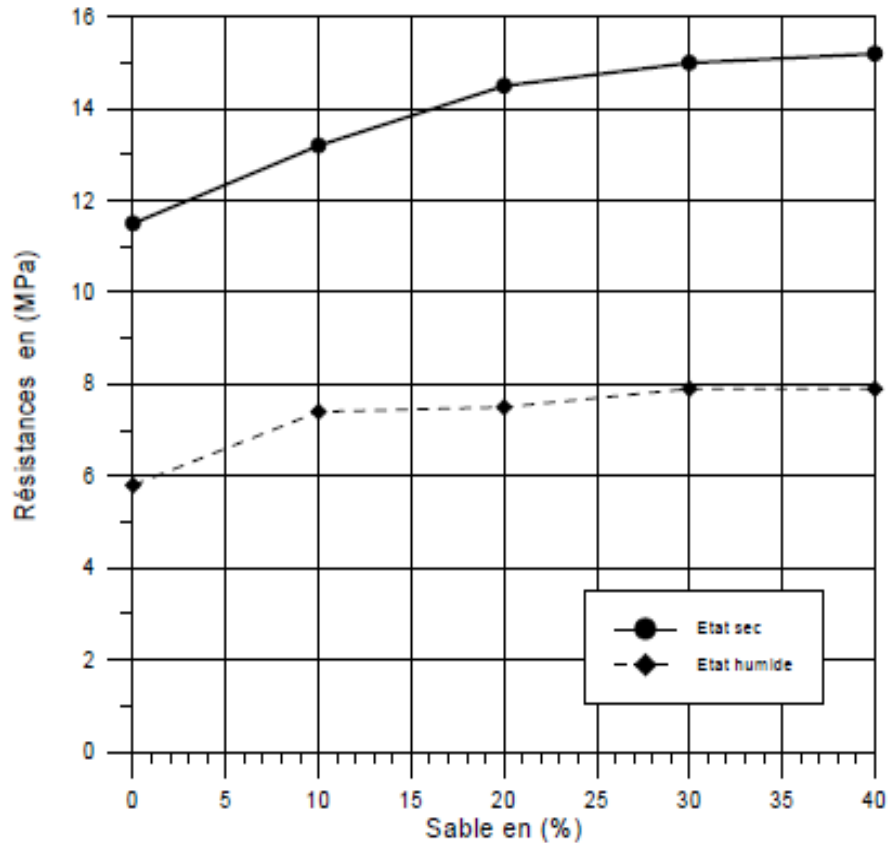


Figure 1.21: Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques en compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPA [21].

1.7.1.3 La stabilisation chimique

La stabilisation chimique consiste à ajouter à la terre d'autres matériaux ou produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physico-chimique entre les particules et le matériau ou le produit ajouté, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. La réaction physico-chimique peut entraîner la formation d'un nouveau matériau (réaction pouzzolanique entre l'argile et la chaux par exemple). Les stabilisateurs agissant au niveau chimique généralement utilisés sont le ciment, la chaux, la bitume ou encore les résines. Néanmoins, on trouve également d'autres types d'additifs naturels d'origines géologique, animale ou végétale. D'autres produits synthétiques peuvent également être mélangés à la terre (comme les sels, acides, sodes, etc.)

La stabilisation au ciment a été développée dès le début du XXe siècle dans les travaux publics pour la construction de routes et de piste d'aérodromes. Depuis, la technique a largement évolué et se trouve aussi bien dans les travaux publics que dans les bâtiments [12]. Ajouté à la terre, le ciment hydraté réagit d'une part avec lui-même en formant un mortier un mortier de ciment pur hydraté et d'autre part avec la fraction sableuse. Néanmoins, le ciment réagit également avec les argiles selon trois phases : premièrement, l'hydratation qui produit des gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile et la chaux libérée lors de ce processus d'hydratation du ciment qui réagit avec l'argile. Celle-ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en dégradation. Deuxièmement, le développement de l'hydratation qui accélère la dégradation des argiles ; les gels de ciment pénètrent en profondeur. La troisième phase est l'interprétation des gels de ciment et des agglomérats d'argile dégradés qui favorisent une nouvelle structuration du matériau avec formation d'une matrice inerte sableuse liée au ciment, d'une matrice d'argile stabilisée et d'une matrice de terre non stabilisée [17].

Le ciment agit peu sur les particules fines d'argile, il convient donc mieux aux terres faiblement argileuses, le dosage dépend de la texture et de la structure de la terre ainsi que le mode de production du matériau, il varie entre 5 et 12% pour obtenir des résultats satisfaisants. La stabilisation au ciment modifie la plasticité du matériau (diminue avec l'augmentation de la proportion de ciment), améliore les résistances et la durabilité de la terre. Cependant, il reste un matériau cher qui est de plus polluant. Encore les terres stabilisées au ciment ne sont pas réutilisables.

1.7.2 Stabilisation de la terre par la chaux

Les premières traces de la fabrication organisées de la chaux remontent à 10000 ans avant JC en Mésopotamie, la plupart des peuples de l'antiquité connaissaient la chaux : Égyptiens, Étrusques, Phéniciens, Grecs, Romains. Une de ces applications sans doute des plus connues est la stabilisation des sols pour les routes [15].

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. La stabilisation à la chaux consiste en une incorporation de chaux vive ou hydratée (chaux éteinte) au sol à traiter, l'action de la chaux concerne les particules argileuses contenues dans le sol. Dans un premier temps, l'apport de chaux produit une modification des liaisons entre particules : l'argile prend une structure floculée cependant que les ions calcium introduits par la chaux constituent des ponts entre les particules. A long

terme, on constate la formation par réaction sol-chaux d'éléments cristallins nouveaux, qui viennent cimenter les grains de sol. Selon Houben [1], ce phénomène n'est sensible qu'après un délai assez long (une quinzaine de jours, dans les meilleurs cas), ce qui implique un temps de stockage.

1.7.2.1 Différentes types de chaux

La chaux est un réactif basique peu coûteux très utilisé dans plusieurs domaines, on la retrouve à l'état liquide dans un lit de chaux, ou à l'état solide sous forme pulvérulente (poudre) ou d'agglomérats (cailloux), elle est décomposée de plusieurs catégories en fonction de sa composition et de ses usages :

A. Chaux aériennes

Produites par cuisson de calcaires très purs (pierres à chaux), elles constituent les principales chaux utilisables en stabilisation :

- La chaux vive : (CaO) directement produite par cuisson de la pierre à chaux, son emploi est limité par des conditions délicates de stockage et de manutention : c'est un matériau très avide d'eau est agressif, qu'il faut manipuler avec précaution et qui doit être maintenue à l'abri de l'humidité jusqu'à son emploi. La chaux vive, en fusant au contact de l'eau, produit un échauffement violent et la température peut alors dépasser 150° . Elle peut présenter cependant certains avantages sur la chaux éteinte dans les sols humides, elle absorbera l'eau nécessaire à son hydratation. A point égal, elle plus efficace car elle apporte plus d'ions de calcium [1].
- La chaux éteinte : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est obtenue par hydratation de la chaux vive, ne présentant pas les inconvénients propres à la chaux vive, elle est couramment utilisée en stabilisation. Produite en usine, elle répond en général à des spécifications précises qui garantissent l'approvisionnement d'un produit aux caractéristiques bien définies, encore faut-il s'assurer auprès du fournisseur [1].

B. Chaux hydraulique naturelles (XHN) et artificiel (XNA)

Obtenue par cuisson de calcaire contenant une plus forte proportion d'impuretés argileuses, elle se rapproche des ciments. Son utilisation peut être envisagée en cas de nécessité, particulièrement si on ne dispose pas de ciment ou de chaux aériennes ; mais l'emploi de ciment ou de chaux aériennes est toujours préférable [1].

C. Chaux agricole

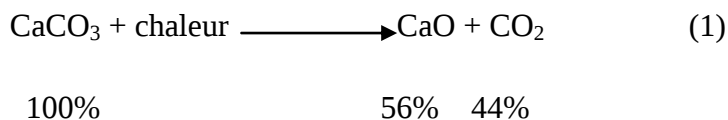
On désigne parfois sous ce terme, du carbonate de calcium broyé en agriculture pour l'amendement, il n'a aucun effet stabilisant.

En principe, tous les types de sol peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques [1]. La chaux éteinte est couramment utilisée dans la stabilisation, par contre la chaux vive, son emploi est limité et il faut la manipuler avec précaution. Elle doit être maintenue à l'abri de l'humidité [18].

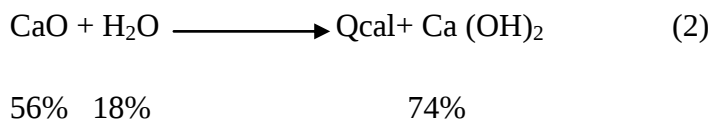
1.7.2.2 Fabrication de la chaux

La chaux est fabriquée à partir de calcaire et dolomites, composées à plus de 50% en masse de carbonates de calcium et de magnésium. Ces roches sont principalement d'origine sédimentaire, elles ont été constituées au fond des océans, ces sédiments carbonatés se sont souvent rapidement transformés selon le phénomène de la diagenèse.

Dans notre monde industrialisé, la chaux est un produit très largement fabriqué en usine de manière très analogue, pour former de la chaux à partir du calcaire, il faut mener préalablement les étapes d'extraction, de concassage, de lavage et de criblage. Ensuite vient la calcination dans différents fours spéciaux à une température dépassant les 950 à 1250°C. La réaction mise en jeu est la suivante :



On obtient alors de la chaux vive qui peut être utilisée telle quelle ou que l'on peut transformer en chaux éteinte avec de l'eau (réaction exothermique 15500 cal/mol) :



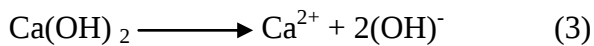
Une fois la chaux formée, il est encore nécessaire de lui faire subir un traitement pour réduire la granulométrie de la chaux au minimum afin d'augmenter sa surface spécifique, et donc son efficacité. On procède d'abord au tamisage pour répartir les grains en fonction des usages prévus pour chaque domaine d'application, puis la chaux est broyée très finement pour atteindre des granulométries très fines, la chaux est alors mise en sacs et prête à l'emploi [15].

1.7.2.3 Mécanismes d'action

L'ajout de la chaux à la terre argileuse induit principalement deux réactions : à court terme (échange cationique et floculation) et à long terme (réaction pouzzolanique) entraînant une solidification du matériau. L'ajout de la chaux contribue à l'action de quatre mécanismes de base en lien avec les particules les plus fines du mélange (les argiles).

a. Echange cationique

Lorsque la chaux vive est ajoutée au sol argileux une réaction de déshydratation se produit créant ainsi l'hydroxyde de calcium. Cette réaction assèche le sol considérablement. Ceci entraîne une dissolution de la silice et de l'alumine des particules d'argile. L'hydroxyde de calcium se dissocie suivant l'équation ci-dessous :



Les ions de calcium libérés entraînent l'échange cationique des ions de calcium bivalents (Ca^{2+}) de la chaux avec le sodium monovalent (Na^+) et l'hydrogène (H^+) de l'argile [22].

On peut dresser une liste des cations par ordre approximatif de capacité de remplacement, mais l'ordre réel dépend du type d'argile, de la nature des ions à remplacer et de la concentration des divers ions dans l'eau. Par ordre de capacité de remplacement croissante, les ions se classent comme suit [16] :



L'échange cationique peut apporter les changements importants suivants :

- Réduction de la distance (épaisseur) entre les groupes de feuillets d'argile réduisant la sensibilité à l'eau.
- Floculation des particules d'argile.
- Augmentation de l'angle interne de friction entre les particules agglomérées provoquant une augmentation de la résistance au cisaillement.
- Diminution de l'indice de plasticité
- Changement de texture du sol d'une argile plastique vers un granulat friable.

b. Flocculation et agglomération

L'association des minéraux argileux et de leur couche d'eau adsorbée constitue le fondement de la structure des argiles. Les particules argileuses agissent les unes sur les autres par l'intermédiaire de leur couche d'eau adsorbée. Par conséquent, la présence de différents ions et de matière organique en concentrations diverses a une influence déterminante sur la structure des argiles et contribue à la diversité des structures des différents dépôts rencontrés dans la nature. Les particules peuvent flocculer ou se repousser (se disperser). Elles peuvent flocculer suivant trois types de configurations : la configuration arête-face, est la plus fréquente, mais on rencontre quelquefois des configurations arête-arête ou face-face, la susceptibilité à la flocculation dépend d'une augmentation de l'un ou plusieurs des paramètres suivants [16] :

- Concentration de l'électrolyte
- Valence des ions
- Température

Ou d'une diminution de l'un ou plusieurs des paramètres suivants :

- Constante diélectrique du fluide interstitiel
- Taille des ions hydratés
- PH
- Adsorption d'anions.

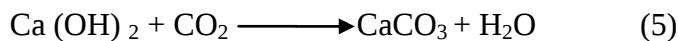
C. Réaction pouzzolanique

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions OH^-) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des aluminates de calcium hydraté (CAH), des silicates de calcium hydratés (CSH) et des silicates d'aluminate de calcium hydraté (CASH). Ces composés hydratés se rencontrent généralement dans les ciments suite à l'hydratation de silicates de calcium (C_3S , C_2S) et d'aluminate de calcium (C_3A , C_4AF), ces réactions sont dites réactions pouzzolaniques. Elles

sont conditionnées par la saturation initiale du sol en chaux. La cinétique de cette réaction pouzzolanique est influencée par plusieurs paramètres dont la température de durcissement, le dosage et la nature minéralogique de la fraction argileuse et la teneur en eau ajoutée au sol [23].

D. Carbonatation

Une fraction de la chaux réagit avec le gaz carbonique (CO₂) pour former du carbonate de calcium (calcite CaCO₃) selon la réaction suivante [14]:



1.7.2.4 Efficacité et dosage

La réaction exothermique d'hydratation de la chaux contribue à assécher la terre. Pour 2 à 3% de chaux ajoutée, on observe une diminution de la plasticité, on pratique en général des dosages en chaux de l'ordre de 6 à 12% [12].

Un grand nombre d'études fait état de modification de plasticité avec l'ajout de chaux hydraulique. L'ajout de chaux dans un sol argileux engendre une diminution de la plasticité. Sur des argiles très expansives (limite de liquidité et indice de plasticité élevée), la réduction de la plasticité peut être supérieure à 50% entre un sol stabilisé et un sol stabilisé avec un ajout de chaux de 20%. Cependant, cette plasticité ne varie plus au-delà de l'atteinte du point de fixation maximale de chaux. Sur ces argiles, avec des limites de liquidité très importantes, l'ajout de chaux permet de diminuer la liquidité. Ces deux phénomènes permettent d'obtenir un abaissement de l'indice de plasticité [24].

Pour des argiles peu gonflantes, les limites de liquidité et de plasticité de la terre augmentent. Malgré ces deux augmentations, il est fréquent des indices de plasticité réduits. Cependant, cette modification de plasticité n'est pas généralisable. Selon Kovac et al [25], Pour des sols ayant des indices de plasticité initialement faible (< 10%), il est possible d'obtenir très peu de modifications de plasticité avec l'ajout d'une proportion faible de chaux (0 à 10% de chaux ajoutée) malgré l'augmentation des limites de liquidité et de plasticité (Figure 1.22).

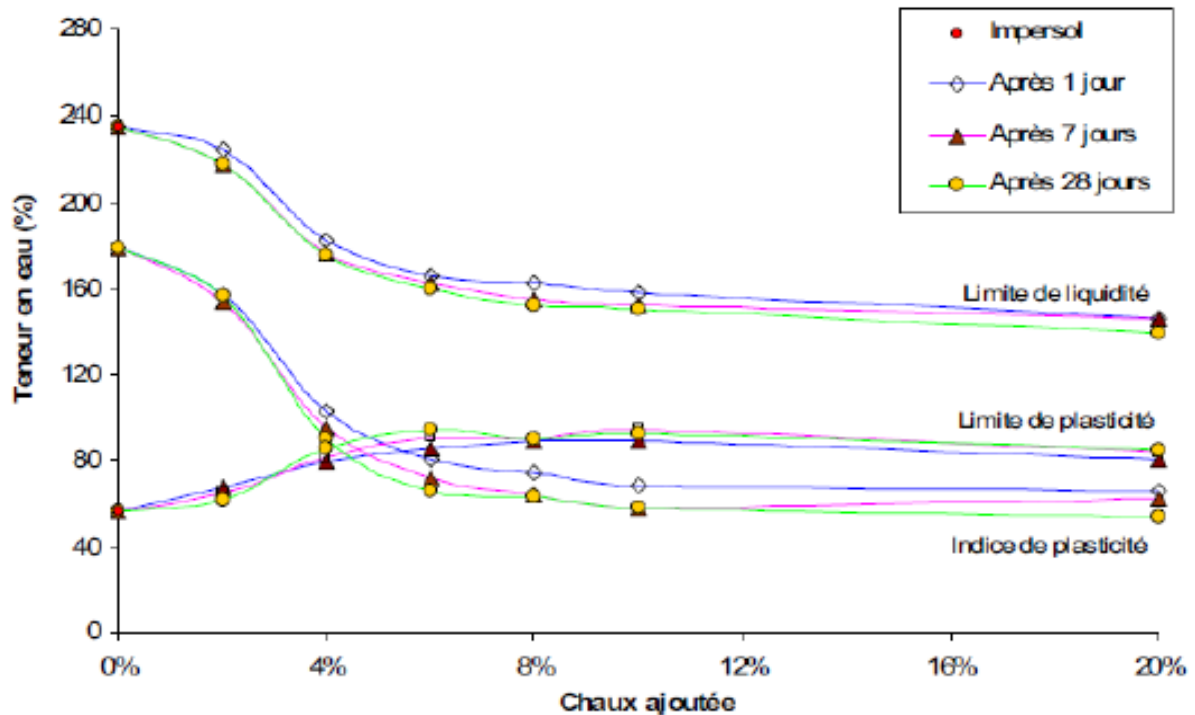


Figure 1.22 : Influence de l'ajout de chaux hydratée sur les limites d'Atterberg d'un sol [24]

1.7.3 Effet de la chaux sur la résistance à la compression des terres chaulées

La diminution de plasticité des terres et la formation de produit cimentaire apporté par la chaux augmentent les caractéristiques mécaniques des terres. Dans les études géotechniques, un grand nombre de sols de natures variées a été étudié dans le but de comprendre l'effet de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression. Il en sort que l'ajout de chaux hydraulique permet d'augmenter la résistance à la compression grâce à la formation du gel hydraté. L'augmentation des performances mécaniques est influencée par divers paramètres :

- La nature de l'argile : la kaolinite obtient la meilleure augmentation de performance et ce malgré une réaction moins active comparée à la montmorillonite [26]
- La température : l'augmentation de la température de cure des sols chaulés permet d'accélérer la prise de résistance quel que soit le type de sol. Après 90 jours un pourcentage de 6% permet de doubler les résistances à la compression d'un sol pour un passage de 20°C à 50°C.
- Le pH : le maintien d'un pH important permet de faciliter la dissolution des silicates et aluminates du sol que peuvent être combinés au calcium libre provenant de la chaux.

- Temps de cure : l'augmentation du temps de cure permet d'augmenter les performances mécaniques du sol traité.

Selon Flament [24], l'influence des dosages en chaux sur les résistances en compression à court terme (7 et 28 jours) montre le temps de réaction important de la chaux. Lier la consommation de chaux et l'augmentation de la résistance en compression d'un sol expansif dans le temps. Le premier jour, la consommation de chaux est dédiée à l'échange cationique (environ 5% de chaux consommée). Après 7 jours, la consommation de chaux est peu importante malgré la variation du dosage testé. La consommation de chaux est de l'ordre de 5% à 7%, pour des dosages compris entre 6 et 20%. La consommation lente de la chaux met en évidence la longue durée de la réaction pouzzolanique qu'engendre la chaux. A 90 jours et pour un dosage en chaux de 20%, la totalité de la chaux n'est pas consommée (18% sur 20%) (Figure 1.23)

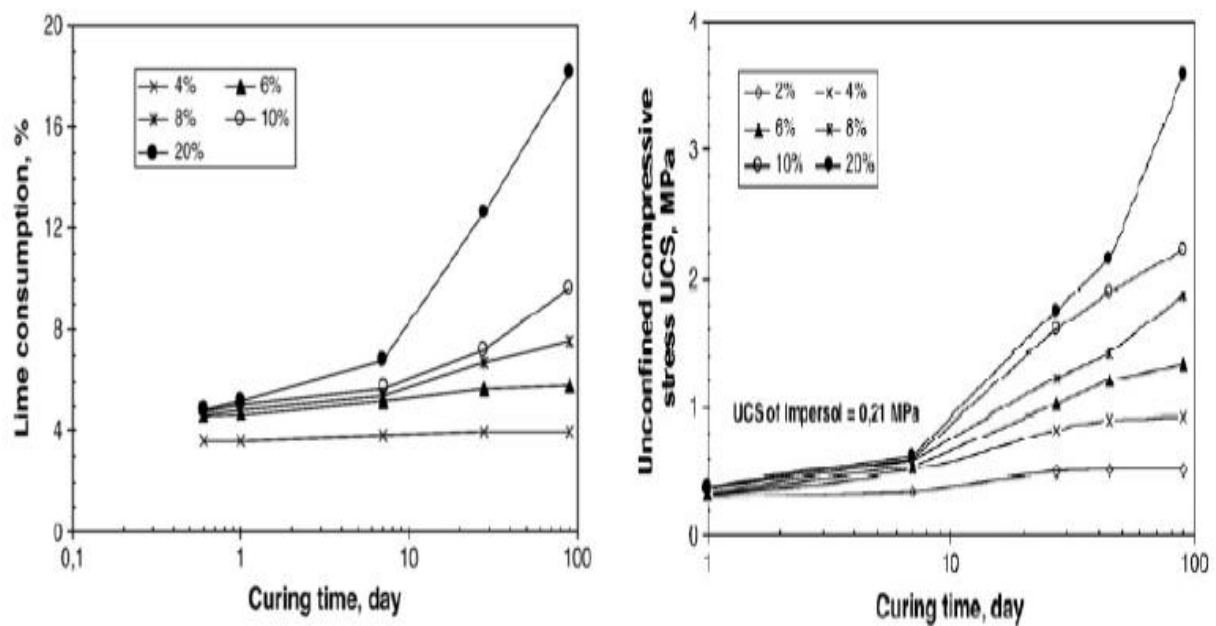


Figure 1.23: Résistance à la compression et consommation de la chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et du temps [24]

Cependant, selon Millogo [27], la résistance à la compression des briques d'Adobe (figure 1.24) augmente avec l'augmentation de l'ajout de chaux, en revanche les teneurs plus élevées de chaux supérieures à 10 % du poids de mélange n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance. Selon Millogo [28], une proportion trop importante de chaux entraîne une formation excessive d'hydrate dans un adobe et peut détériorer les performances mécaniques de la brique, ces constats sont justifiés par la microstructure (Figure 1.25)

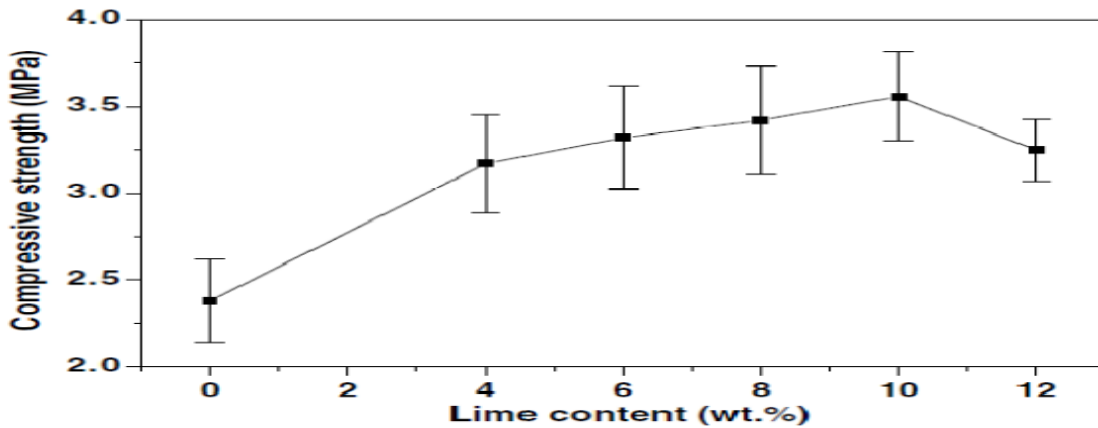


Figure 1.24: Evolution de la résistance en compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux [27]

Lorsque la teneur en chaux est augmentée à 6%, la silice libre a disparu et la liaison entre les particules a été développée, conduisant ainsi à l'apparition d'une microstructure homogène. Dans ce cas les particules isolées sans relief (figure 1.25 e), identifiées comme CSH ont été développées, comme la teneur en chaux à dépasser 12%, la portlandite et la silice qui manifestent des domaines aussi lumineux (figure 1.25 f), zone H ont été largement formés. L'excès de la carbonatation à donne lieu à l'apparition d'une hétérogène microstructure [27].

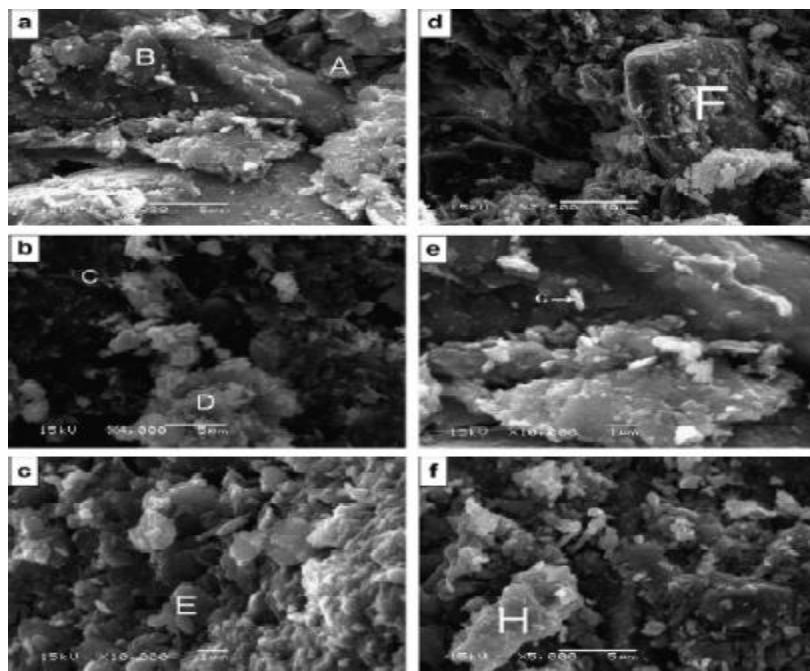


Figure 1.25: Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0% chaux, (b) 4% chaux, (c) 6% chaux, (d et e) 10% chaux, (f) 12% chaux [27]

1.7.4 Influence de la chaux sur la durabilité des terres chaulées

L'un des intérêts d'incorporer une proportion de chaux dans un sol argileux est d'augmenter sa résistance à l'eau. Guettala et al [29], exposés pendant 20 ans des murs en pisé stabilisé ou non aux conditions climatiques du sud-ouest de la France. Selon les auteurs l'ajout d'une stabilisation à la chaux permet de diminuer la surface érodée des murs en pisé stabilisé. Pour des murs non stabilisés, la profondeur des trous liés à l'érosion atteint 18 mm contre 7 mm pour les murs stabilisés (figure 1.26). L'érosion n'est pas une fonction linéaire avec le temps. Durant la première année, une partie importante de la terre est érodée puis dans le temps cette variation d'érosion est quasi nulle



Figure 1.26 : Influence de la stabilisation à la chaux sur deux murs en pisé (à gauche : pisé stabilisé à 5% de chaux hydraulique, à droite pisé non stabilisé) [29]

Des essais en gel/dégel et séchage/saturation sur des briques de terre comprimée ont permis de mettre en évidence l'intérêt de l'ajout de chaux pour limiter l'érosion et la perte de matière dans le temps [30].

L'absorption d'eau par capillarité est aussi un paramètre à prendre en considération. L'importance de l'ajout de chaux sur un sol ayant un seuil de gonflement relativement important. Nalbantolgu et al [30], sont incorporés trois proportions de chaux (3%, 5% et 7%) et ils sont observés le comportement du sol à 3 échéances (0, 7 et 30 jours). Quelle que soit la proportion de chaux ajoutée, le potentiel de gonflement diminué significativement pour passer

de 20% à 2% pour une échéance à 0 jour et à 0,5% pour une échéance à 7 et 30 jours [30]. Cette observation de diminution du pourcentage de gonflement est aussi remarquée par AL-Rawas, et al [31] qui mis en évidence la disparition du gonflement pour une proportion de 6% chaux pour un sol argileux de type gonflant (figure 1.27).

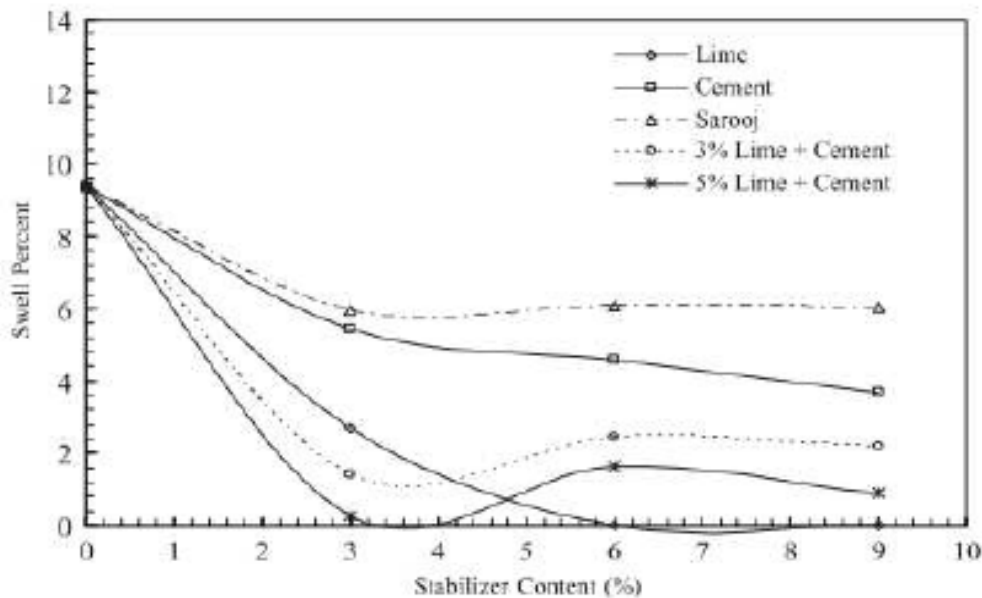


Figure 1.27: Influence de la proportion d'additifs sur le potentiel de gonflement d'une argile expansive [31]

Flament [24] exploité des fines de lavage de granulas comme matériaux de base pour la formulation des briques de terre comprimée. Flament [24] a trouvé que l'ajout de 4% de chaux hydraulique aux fines de lavage de granulat n'augmente pas la résistance à l'abrasion des briques. En revanche l'ajout de sable et de chaux permet d'obtenir une brique qui résiste à l'abrasion et à la remontée d'eau par capillarité. Une formulation de 77% de fines de lavage de granulates, 19% de sable et 4% de chaux permet d'améliorer les performances de la brique en abrasion et en capillarité par rapport à l'utilisation des fines de lavage de granulat seul.

1.8 Les fibres

La stabilisation par ajout de fibres est couramment employée dans les techniques de construction en terre traditionnelles. Elle consiste notamment à ajouter des fibres dans les terres qui sont travaillées par pétrissage puis appliquées sur des clayonnages en bois ou moulés sous forme de bloc de terre séchée au soleil.

L'ajout de fibres joue plusieurs rôles : réduction, voire élimination de la fissuration de retrait, accélération du séchage par drainage de l'humidité vers l'extérieur du matériau, allègement du

matériau, augmentation de la résistance à la traction, ceux qui sans doute le meilleur avantage [12].

Le faible cout et les propriétés mécaniques spécifiques élevées (résistance et rigidité) des fibres végétales sont des avantages essentiels. Au contraire, leur capacité à absorber de l'eau en grande quantité et leur faible tenue en température constituent les points faibles de l'utilisation de ces fibres végétales.

1.8.1 Différents types de fibres

Plusieurs types de fibres sont utilisées dans la construction, elles peuvent être classées par familles :

a. Fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1.28)

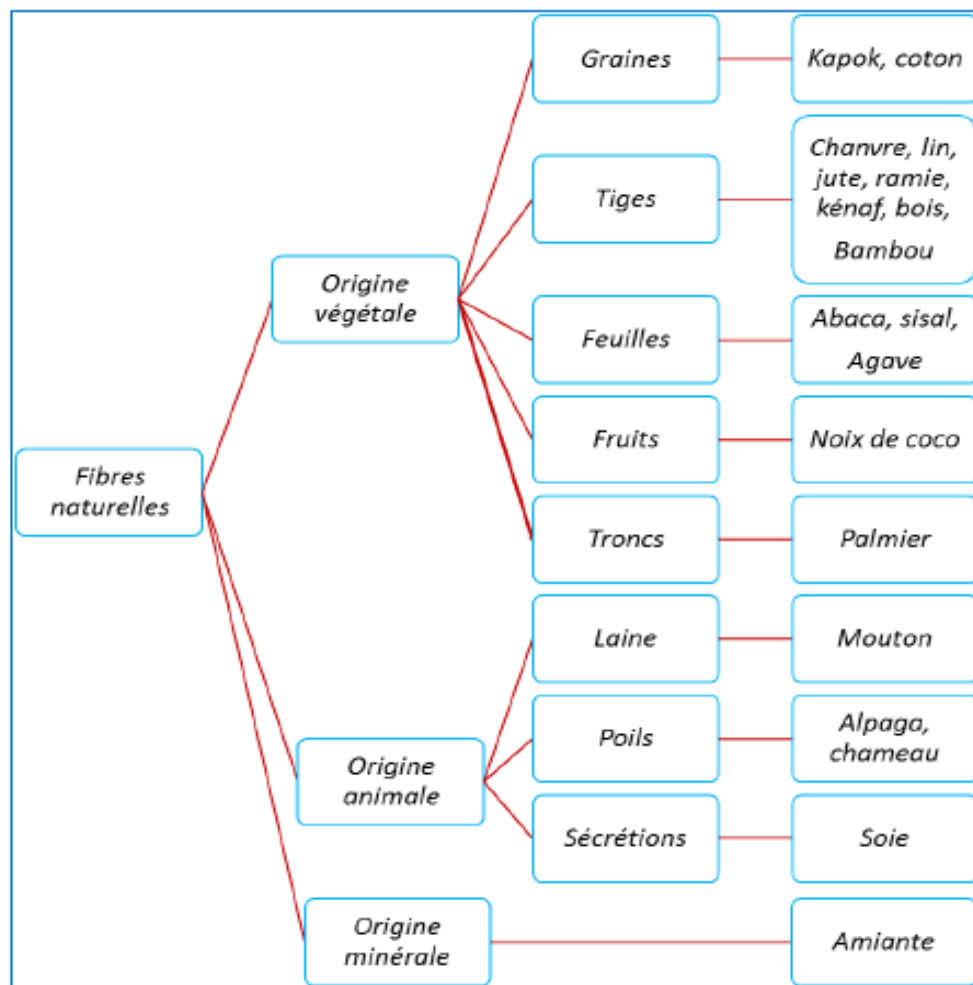


Figure 1.28: Classification des différents types de fibres naturelles [32]

- Les fibres végétales : l'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages : tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demande peu d'énergie pour être produite [33].
- Les fibres animales : la fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ces qualités de bon isolant thermique.
- Les fibres minérales : l'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente [33].

B. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composées fournis par l'industrie pétrochimique, elles ont fait leurs apparitions au début de 20^{ème} siècle, après la réussite de la fibre de viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point ; elle possède chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage [33].

C. Fibres artificielles

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine du génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie et la construction [33].

Dans cette thèse on utilise les déchets végétaux du palmier dattier comme matériau de renforcement des briques d'Adobe.

1.8.2 Les déchets de palmier dattier

Le palmier dattier est l'un des palmiers les plus cultivés pour ses fruits dans les régions arides et semi-arides du monde. Selon les naturalistes, ce palmier est originaire de la région du golf arabe. Il a toujours joué un rôle important dans la vie économique et sociale des habitats des régions désertiques chaudes de l'Inde jusqu'au Sahara occidental et aussi dans la région aride du sud des États-Unis (Californie et Arizona). Selon les statistiques récentes (2015) du ministère de l'agriculture et du développement rural, le palmier dattier occupe en Algérie une superficie évaluée à 167000 hectares pour un nombre de palmiers estimés à plus de 18,6 millions d'unités. Les régions phoenicicoles se situent généralement au sud de l'atlas saharien et couvrent 16 wilayas. Les wilayas de Biskra et d'El oued sont les premières régions phoenicicoles avec respectivement 27,4% et 22% de la superficie totale, et respectivement 23,1% et 22,4% du nombre totale de palmiers dattiers [34].

Le palmier dattier (Figure 1.29) peut vivre jusqu'à un âge d'environ 200 ans, et peut atteindre une hauteur de 80 pieds (environ 24 mètres). Les opérations de nettoyage de palmiers dattiers consistent principalement à éliminer les organes végétatifs qui ne sont plus fonctionnels, en particulier les palmes sèches. Le nombre des palmes peut atteindre 50 à 200 chez un arbre adulte, avec une durée de vie de trois à sept ans, selon la variété et le mode de culture [34].



Figure 1.29: Forêt de palmier dattier [34]

Une palme (figure 1.30) est une feuille composée de plusieurs parties principales : base pétiolaire ou kornaf, rachis ou pétiole qui porte les épines, choux et les folioles. Les épines et les folioles sont disposées en position généralement oblique le long du rachis [34].

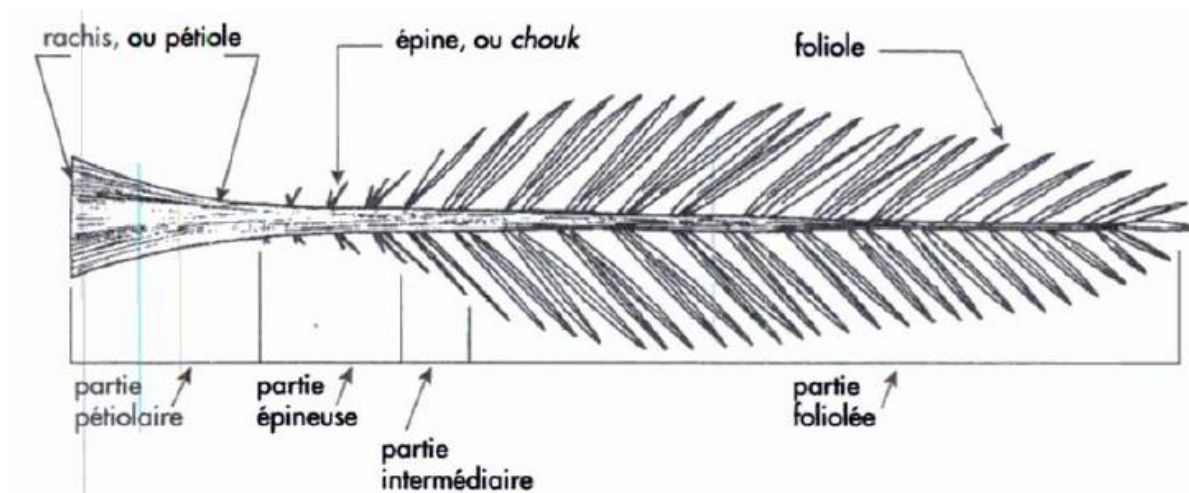


Figure 1.30 : Schéma d'une palme [34].

La seule partie utile est la palme sèche et la partie foliolée, tandis que la partie restante est jetée comme déchet d'agriculture sans aucune valeur économique. L'idée consiste à utiliser cette ressource naturelle renouvelable (déchet de palmier dattier) dans de nombreux domaines, ce qui aurait un impact positif sur notre environnement et contribuerait à réduire la consommation de matières premières non renouvelables. Selon la littérature [35], il existe environ 100 millions de palmier dattier dans le monde. Les palmes sèches et fraîches sont découpées chaque année. Une estimation annuelle des palmes découpées est évaluée à 1 130 000 tonnes en 2002. Ce chiffre doit être actuellement au moins 1 500 000 tonnes ceci est estimé par rapport au développement du nombre d'arbres de palmier dattier en Algérie qui a passé de 13 500 00 à 18 000 000 soit une augmentation de plus de 33 %.

Les palmiers dattiers ont une structure fibreuse, avec cinq types de fibres (Fig. 1.31) :

- Les fibres de bois du tronc.
- Les fibres de tiges au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- Les fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- Les fibres de surface autour de son tronc ou de base de palmes (pétiole).
- Les fibres de Liffe (entre les Kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le Liffe) [35]

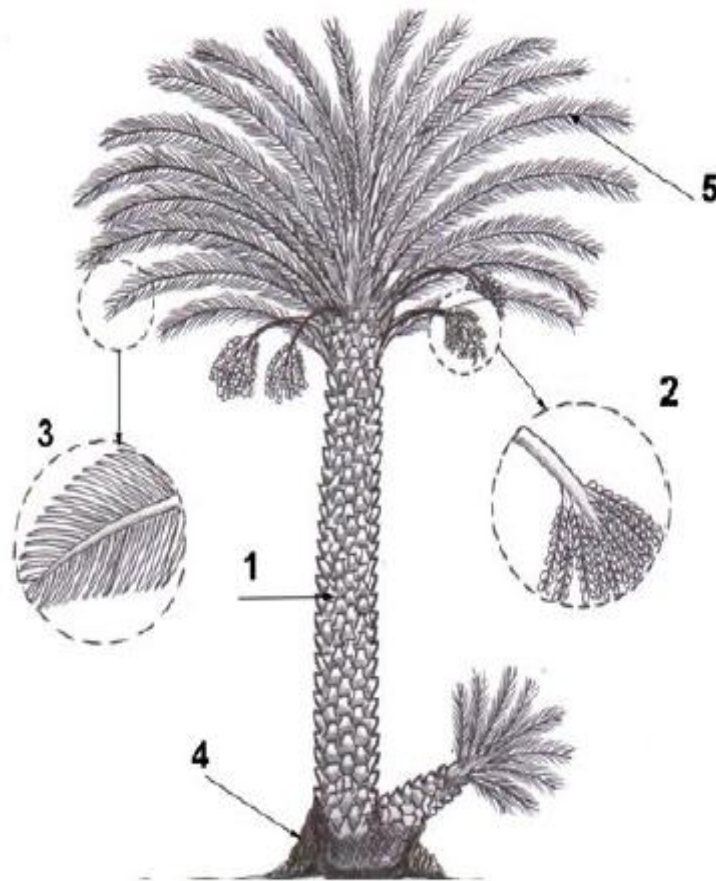


Figure 1.31 : Arbre de palmier dattier [35].

Le palmier dattier se constitue principalement de :

1. Le tronc :

Le palmier dattier a un tronc unique colonnaire sans branche appelée stipe. Le stipe se termine par un bourgeon terminal unique produisant des feuilles appelées palmes (frondes), il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles. Les fibres des pétioles ne forment point un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignée (elles sont placées sans ordre, les unes à côté des autres). Le tronc ne contient que des fibres pétiolaires superposées les unes sur les autres de l'intérieur à l'extérieur [34]

2. La couronne :

On appelle la couronne, l'ensemble des palmes vertes. Le nombre de palme chez un palmier dattier adulte peut atteindre de 50 à 200 palmes, elles sont émises par le bourgeon terminal ou phallophores [34]

3. Palme :

La palme ou Djérid, est une feuille pannée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole.

Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide.

Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [34]

1.8.3 L'effet de la stabilisation par les déchets végétaux sur les propriétés d'adobe

Plusieurs recherches ont été effectuées pour étudier la possibilité d'intégrer différents types des fibres et déchets agricoles dans la fabrication des briques d'Adobe.

Le tableau 1 présente quelques études, résumant les types et les pourcentages d'additifs utilisés, avec l'origine/l'emplacement et la date de la publication. Il est important de noter que dans la plupart des cas, les additifs utilisés étaient disponibles localement, peu coûteux (ou même gratuit), et recyclé. Cela explique leur variété, ils ont donc été choisis non seulement pour leur composition ou leurs propriétés mais plus pour leur abondance.

Tableau 1.1 : Revue de la littérature sur les différents types de fibres étudiées.

Référence	Additive (%)	Emplacement	Date
[36]	Déchets de thé (0%-5%)	Turquie	2006
[37]	Fibre de chanvre (0%-15%)	Ukraine	2016
[38]	Fibres de sisal 0,5%	France	2004
[39]	Fibre de palmier à huile (0,25%-1%)	Malaisie	2017
[40]	Feuilles d'ananas (0,25%-0,8%) grappe de fruits du palmier à huile (0,25%-0,75%)	Malaisie	2011
[41]	Noix de coco (1%), bagasse (1%) et fibres de palmier à huile (1%)	Uk	2015
[42]	Fibres vernaculaires naturelles de <i>Grewia optivia</i> (0,5% –2%) et <i>Pinus roxburghii</i> (0,5% –2%)	Inde	2015
[43]	<i>Grewia optivia</i> (0%-2%) et <i>Pinus roxburghii</i> (0%-2%)	Inde	2016
[44]	Fibre de paille (0%-0,33%)	Italie	2011

[45]	Fibres de banane (0%-5%)	USA	2016
[46]	Fibres d'hibiscus cannabinus (0% –0,8%)	France	2014
[47]	Cendre de balle de riz (0% –10%)	Indonésie	2014
[48]	Fibres de paille (0,5% –3%)	Italie	2015
[49]	Sciure de bois (2,5% –5%)	Roumanie	2014
[50]	Paille (25% –33,3%)	Espagne	2011
[51]	Bagasse de canne à sucre (2% –6%)	Brésil	2015
[52]	Cendre de bagasse de canne à sucre (0% –50%)	Thaïlande	2011
[53]	Fibres de palmier dattier (0% –0,2%)	Algérie	2014
[54]	Fibres de paille de blé (1% –3%)	Égypte	2015
[55]	Fibres de palmier dattier (0,05% –0,2%)	Algérie	2016
[56]	Fibres de paille (0% –0,75%)	Italie	2010
[57]	Fibres de chanvre et de lin (0% –3%)	Autriche	2016
[58]	Fibres de paille de blé (0,89% –3,84%)	Turquie	2008
[59]	Déchets de coupe de bois (4%)	Mexique	2016
[60]	Paille (1%) et cendres volantes (10%)	Turquie	2011
[61]	Fibre de canne à sucre (0% –3%)	USA	2016
[62]	Noix de coco (0,25% –1%), palmier à huile (0,25% –1%) et bagasse (0,25% –1%)	UK	2015
[63]	Plant de maïs (1% –3%), fétuque (1% –3%), paille (1% –3%), noyaux d'olive broyés (1% –3%)	Espagne	2016
[64]	Cendre de bagasse de canne à sucre (0% –8%)	Brésil	2012
[65]	Pinus roxburghii (0,5% - 2%) et Grewia optivia (0,5% - 2%)	Inde	2015
[66]	Déchets de palmier dattier (2% – 10%)	Algérie	2021

1.8.3.1 L'effet des déchets sur la densité apparente des briques d'adobe

On sait que la densité d'un matériau est fortement liée avec des propriétés mécaniques et thermiques. L'ajout d'additifs dans le mélange d'argile diminue la densité des briques, comme les briques sont généralement lourdes et compactes. Une réduction trop importante de la densité peut toutefois entraîner des défauts structurels.

La figure 1.32 montre que les briques d'adobe créées à partir de déchets ont une densité moyenne de $1,67 \text{ g/cm}^3$, La densité rapportée par Smeu et al [49], pour une brique d'adobe de bonne qualité, fabriquée de manière traditionnelle, est comprise entre $1,80$ et $2,00 \text{ g/cm}^3$. Comme prévu, la densité des briques diminue lorsque la quantité des déchets est augmentée. La réduction de la densité se situe entre 7 et 9 % par rapport aux échantillons témoins [62]. La raison principale de ce résultat est la densité plus faible des additifs de déchets elle-même par rapport au sol, qui est plus lourd. Les briques d'Adobe avec des fibres de coco ont la densité la plus élevée de 1.95 g/cm^3 [62]. C'est la preuve de la densification ou la présence de déchets améliore en fait le compactage de l'échantillon. En général, la densité apparente est directement liée à la résistance à la compression et inversement liée à l'absorption d'eau. En outre, une diminution de la densité entraîne également une amélioration des performances d'isolation thermique et sonore des briques d'Adobe.

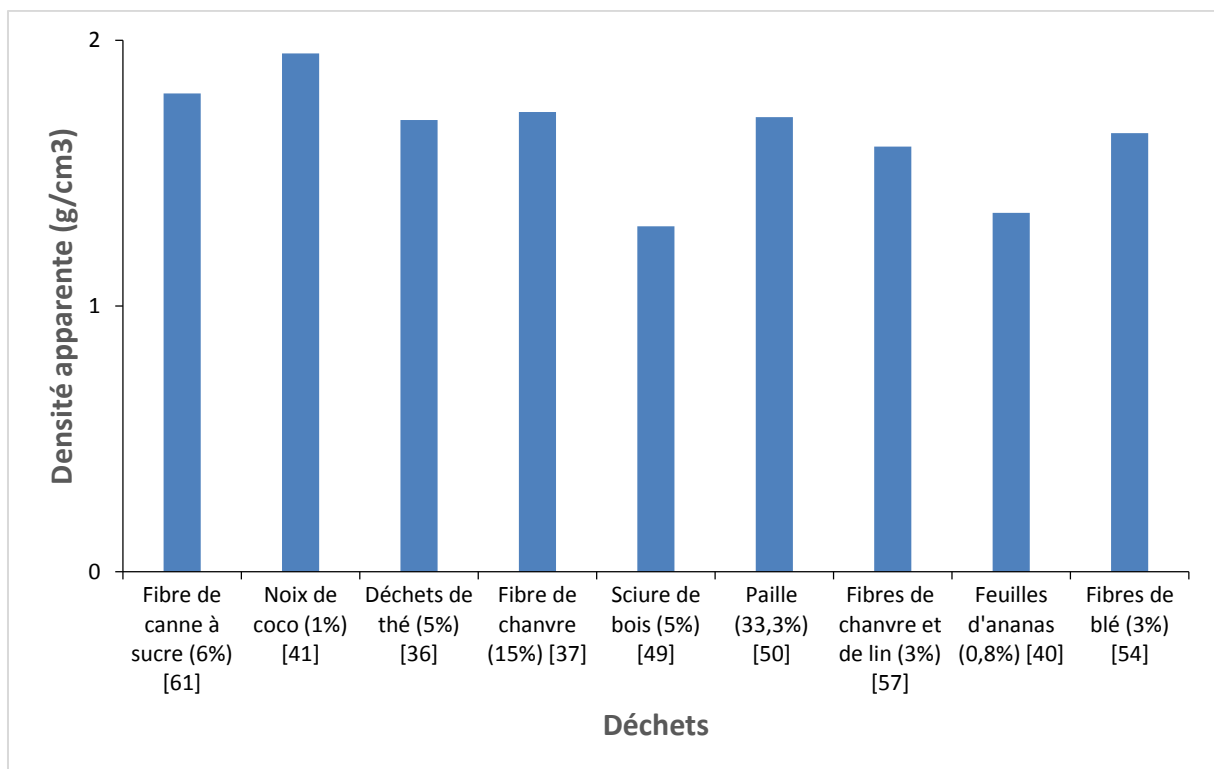


Figure 1.32: La densité apparente de briques d'adobe renforcées avec différents déchets.

1.8.3.2 L'effet des déchets sur la résistance à la compression des briques d'adobe

Les valeurs recommandées pour la résistance à la compression minimale autorisée pour les briques d'adobe sont très variées. Selon Taalah et al [53], Les limites de résistance les plus basses fixées dans la plupart des normes actuelles pour les briques d'adobe vont de 1,20 à 2,10 MPa. Les résultats des essais de compression rapportés par Corrêa et al [51] varient de 1,53 à 7,60 MPa et les valeurs les plus courantes se situant entre 4,37 et 6,20 MPa. Cette résistance adaptée à de nombreux usages dans le domaine de la construction, comme la construction porteuse. Il convient de mentionner que le mode de rupture de l'échantillon témoin a toujours été soudain et très rapide, tandis que celui du matériau composite a été plus ductile et graduel. Cela signifie que les fibres affectent le comportement fragile du mélange de terre.

La figure 1.33 présente la résistance à la compression des briques d'adobe renforcé par des différents types de déchets, la raison de l'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en additives est attribuée à l'interaction des fibres/sol et à la liaison qui en résulte entre le mélange et l'additif ajouté. Le développement des propriétés de résistance des briques en adobe renforcé dépend principalement de la formation de liaisons fibres-sol, sol-sol et fibres-fibres. La résistance de ces liaisons dépend principalement de la dimension, des conditions de surface et de la quantité d'additifs ajoutés au sol. Tout d'abord, la liaison fibre-sol, nouvelle liaison introduite dans les échantillons renforcés, est responsable de la transmission des contraintes dans le composite de sol. C'est ce qu'on appelle le mécanisme de pontage des fibres dans le composite, qui lie plus fermement les grains de sol entre eux, contrairement à ce qui se passe dans le cas des échantillons de sol non renforcés. Ce phénomène est responsable de l'augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en additifs jusqu'à un point optimal. Deuxièmement, la liaison sol-sol est la seule et unique liaison dans les échantillons non renforcés qui est responsable de la résistance des échantillons non renforcés. Enfin, la liaison fibre-fibre est la plus faible des trois liaisons et ne contribue pas à la résistance du composite. Comme la teneur en additifs a augmenté au-delà de la valeur optimale, une perte de liaison des fibres a été observée lorsque la liaison fibre-fibre augmentait, ce qui diminuait la formation d'interactions fibre-sol et sol-sol, entraînant une diminution de la résistance à la compression. L'effet de la fibre sur les propriétés des briques en adobe dépendait donc davantage de la quantité de fibre interagissant avec la matrice du sol et des caractéristiques d'arrachement de la fibre que de la teneur totale en fibres [67].

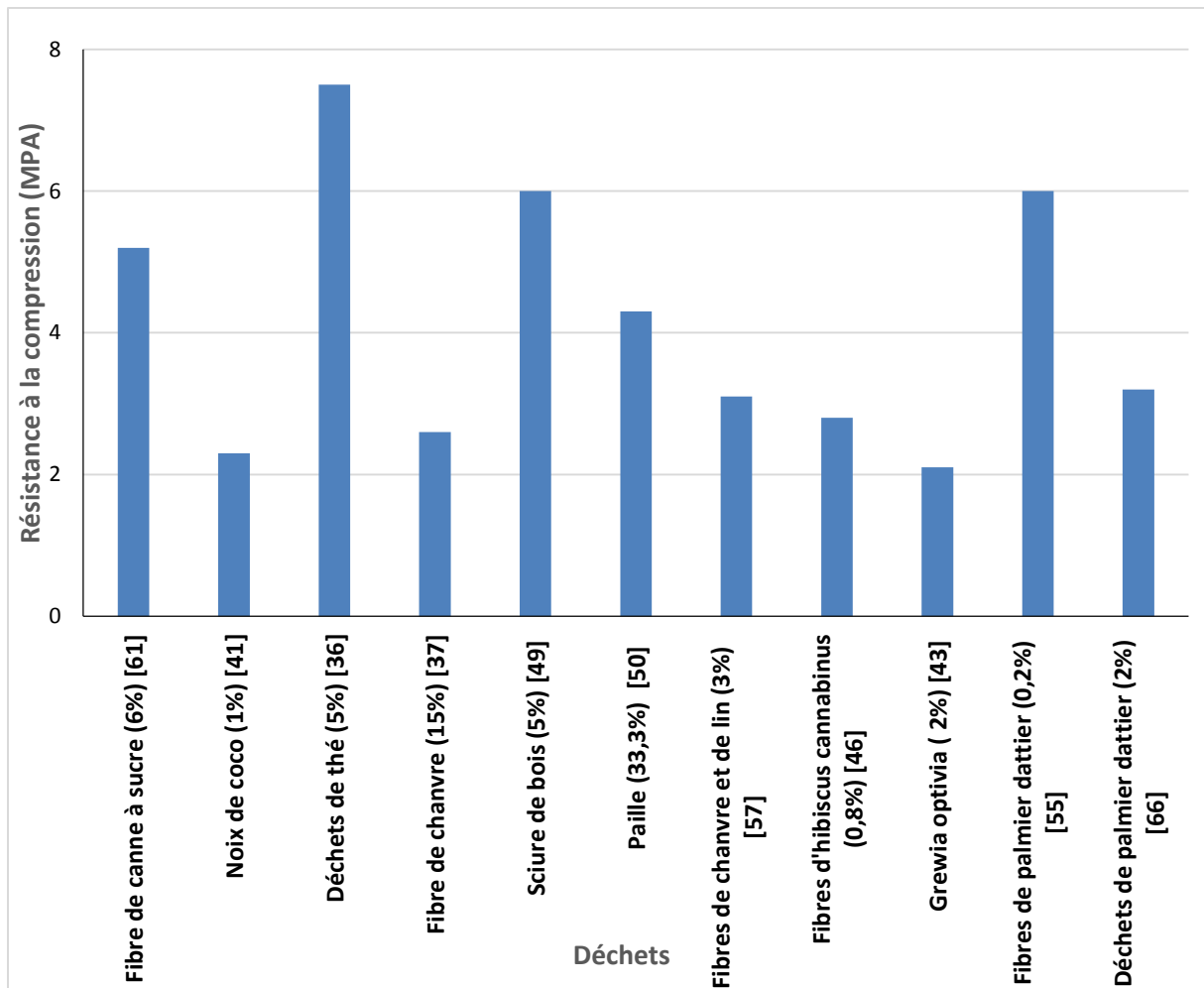


Figure 1.33 : La résistance à la compression des briques d'adobe renforcées par des différents types de déchets

1.8.3.3 L'effet des déchets sur l'absorption d'eau des briques d'adobe

L'essai d'absorption d'eau est couramment utilisé pour quantifier la durabilité de la brique d'adobe en milieu humide et utilisé comme indicateur de la résistance à l'immersion des briques d'adobe. La création de porosité due à l'incorporation d'additifs dans les briques d'adobe entraîne une augmentation de l'absorption d'eau. Les vides dans les échantillons pendant l'immersion sont remplis d'eau qui peut facilement pénétrer dans le matériau, avec un cheminement préférentiel dépendant de la structure des pores et de la façon dont ils sont interconnectés. Une valeur élevée d'absorption d'eau pour les briques d'adobe n'est pas souhaitable car elle affecte la durabilité et la résistance aux conditions naturelles. Salih et al [67], spécifient que l'absorption d'eau autorisée des briques d'adobe ne doit pas dépasser 15 % à 20 % du poids. De nombreux spécimens stabilisés à l'aide de déchets satisfont aux exigences d'absorption d'eau des briques d'adobe, à l'exception des déchets de thé [36], comme le montre

la figure 1.34. L'absorption d'eau joue un rôle important dans la liaison entre les fibres et les particules du sol. Une absorption d'eau élevée peut endommager la liaison fibre-sol, ce qui entraîne une augmentation du retrait lors du séchage en raison de l'évaporation. Au contraire, une absorption d'eau trop faible entraîne la fragilisation de la brique d'adobe, ce qui finit par entraîner une perte de résistance de la structure au fil du temps. L'absorption d'eau minimale enregistrée pour la fibre de palmier dattier [55], la cendre de balle de riz [48] et *Grewia optivia* [43] ayant des valeurs de 5.30%, 6.20% et 6,51%, respectivement. Cela indique une amélioration de la durabilité avec l'ajout de ces additifs. En général, l'absorption d'eau des blocs d'adobe augmente avec l'augmentation de la teneur en additifs des déchets. Cette augmentation peut être attribuée à la nature absorbante des additifs qui crée une voie de passage à travers les blocs d'adobe, permettant ainsi à l'eau d'être absorbée par les briques. Cependant, certaines études [43,47], ont fait état d'une diminution de l'absorption d'eau en fonction de l'augmentation de la teneur en additifs.

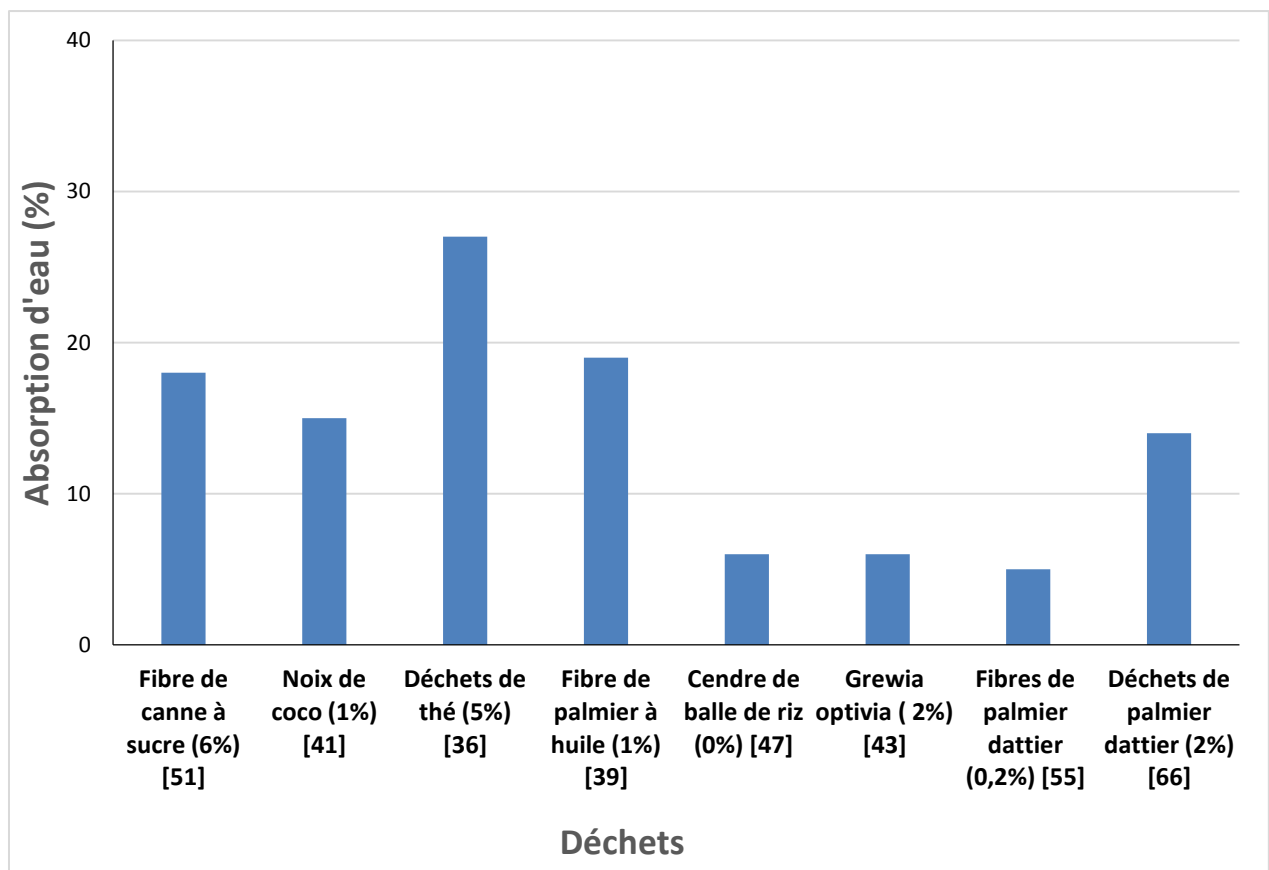


Figure 1.34 : L'absorption d'eau des briques d'adobe renforcées par des différents types de déchets

1.9 La durabilité des briques de terre renforcée par des fibres de palmier dattier

KRIKER [35] a étudié la durabilité des fibres de palmier dattier dans le milieu alcalin cimentaire, il a immergé ces fibres dans deux solutions alcalines à base de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de soude (NaOH), les deux de pH 12.5 ainsi que dans la solution de Lawrence avec un pH de 12.95. Les résultats de l'auteur [35] montrent que les fibres de palmier utilisées résistent mal aux alcalis. En effet, leur résistance à la traction et leurs élongations à la rupture chutent en fonction du temps d'immersion. Cette diminution est d'autant plus grande que la section initiale des fibres est petite. Par ailleurs, il a constaté que la chute de résistance des fibres immergées dans la solution de chaux est plus grande que celle des fibres immergées dans la solution de soude. Les résultats de KRIKER [35] sont en accord avec TOLÈDO FILHO et al. [68]. A trois mois dans la solution de chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) les fibres de surface de palmier de diamètre 0.8, 0.6 et 0.4 mm conservent respectivement environ 76 %, 48 % et 45 % de leur résistance initiale alors qu'elles ne conservent que 69 %, 40 % et moins de 5 % à six mois. Dans la solution de soude (NaOH) les fibres de même diamètre conservent environ 83 %, 55 % et 40 % à trois mois et 76 %, 46 % et 16 % à six mois, respectivement. En outre, KRIKER [35] a constaté qu'en fonction du temps d'immersion les fibres deviennent de plus en plus dures et fragiles, à cause du phénomène de cristallisation des fibres par la pénétration des alcalis dans leurs pores. Cette constatation a été aussi faite par TOLÈDO FILHO et al [68]. De plus, une réduction dans la section des fibres en fonction du temps d'immersion dans la solution alcaline était observée.

Ces résultats nous permettent de conclure que les fibres de palmier, comme toutes les fibres végétales présentent une faible durabilité dans les milieux alcalins et par conséquent dans les milieux cimentaires alcalins. Provoquant la chute de durabilité des fibres. D'où la nécessité d'améliorer cette durabilité par d'autres méthodes.

1.9.1 Mécanisme de dégradation des fibres végétales

La dégradation des fibres végétales dans les composés cimentaires se produit parce que l'eau interstitielle alcaline dissout la lignine et l'hémicellulose existant dans les lamelles moyennes des fibres, affaiblissant ainsi le lien entre les différentes cellules de fibre. Un mécanisme additionnel est l'hydrolyse alcaline des molécules de cellulose, qui cause la dégradation de la chaîne moléculaire, donc menant à une réduction du degré de polymérisation et abaisse la résistance à la traction [35].

1.9.2 Méthodes d'amélioration de la durabilité des fibres végétales

La protection de fibres a été envisagée par plusieurs procédés :

- Soit par traitement de la fibre.
- Soit la modification de la matrice.
- Soit la combinaison de deux procédés.

1.9.3 Traitement des fibres

Les principales méthodes utilisées dans le traitement de l'état de surface des fibres sont :

- Les agents d'imprégnation chimiques comme le silicate de sodium, le sulfate de magnésium et d'autres pour constituer une protection contre l'attaque chimique des alcalins.
- Imperméabiliser la fibre avec des produits comme la résine ou la bitume protégeant ainsi la surface de ces dernières contre l'attaque des alcalis libérés par les ciments lors de l'hydratation.
- La combinaison des deux méthodes précédentes. Cette méthode a donné les résultats les plus satisfaisants.

On conclut ces procédés offrent une bonne protection aux fibres mais elles augmentent le coût de leur exploitation [96].

1.9.4 Synthèse des travaux réalisés sur les fibres de palmiers dattier traitées

Alawar et *al.* [70] ont déterminé les propriétés mécaniques, des fibres de surface du tronc de palmier dattier, avant et après le traitement chimique avec différentes concentrations de NaOH soit : 0,5%, 1%, 1,5%, 2,5% et 5% pendant une durée d'une heure à une température de 100°C. Les résultats obtenus (Figure 1.35) sont très positifs et montrent bien l'amélioration de la résistance à la traction des fibres du palmier dattier traité chimiquement pour différentes concentrations de NaOH. La résistance maximale en traction a été obtenue pour un traitement avec une concentration de 1% de NaOH où la contrainte maximale obtenue est de l'ordre de 4 fois plus importante que dans le cas des fibres non traitées mais avec une dispersion beaucoup plus importante.

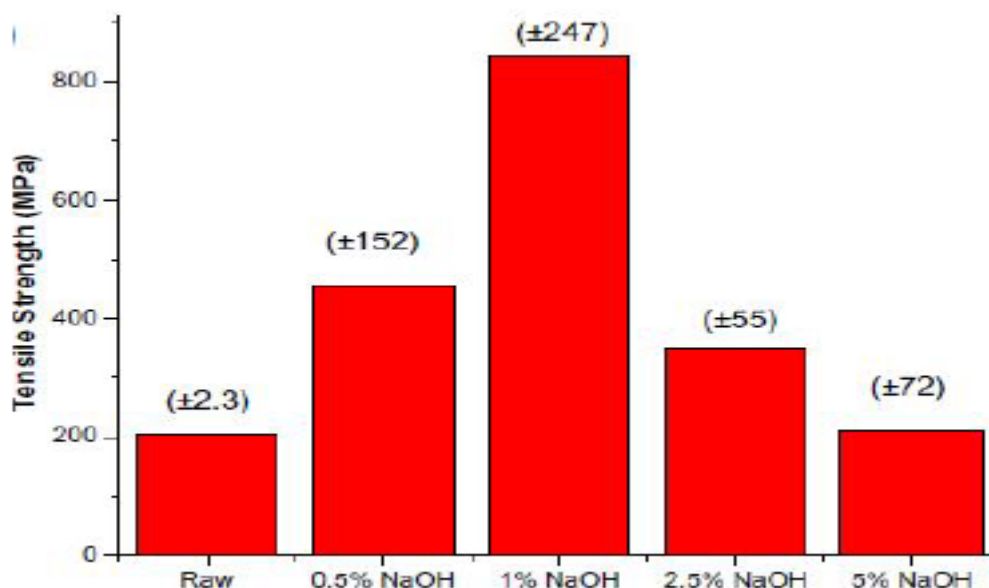


Figure 1.35 : Résistance à la traction des fibres de palmier dattier [71]

Kaddami et al. [71], ont étudié l'utilisation des fibres courtes de palmier dattier (fibres de feuilles) comme renfort dans des matrices polyester et époxyde. La morphologie et les propriétés mécaniques des composites obtenus ont été caractérisées en flexion 3-points. Les résultats montrent que l'adhésion interfaciale est meilleure dans le cas des composites à base de résine époxyde. Afin d'améliorer l'adhérence interfaciale de l'estérification de la matière de charge lignocellulosique en milieu alcalin, des traitements chimiques ont été effectués en utilisant les anhydrides acétiques et maléiques. Ce type de modification chimique, a conduit à un changement dans la composition chimique des renforts ce qui a amélioré les propriétés mécaniques des composites ayant une matrice époxyde.

Taha et al [72], ont présenté une étude expérimentale qui permet de déterminer les propriétés mécaniques des fibres qui sont extraites de la tige spadice de palmier dattier DPSS de la région Ezbet El-Nakhl en Egypte. Ces tiges sont ensuite divisées en fibres longues de 50 cm avant de subir un traitement chimique par l'hydroxyde de sodium (NaOH) avec des concentrations de 2 et 5% avec des durées de traitement de 2, 4, 6 et 24 heures à une température de 23°C. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une solution de NaOH de concentration de 2% pendant une durée de traitement de 2 heures. Les valeurs de la contrainte à la rupture des fibres traitées et non traitées sont respectivement de l'ordre de 400 et 600 MPa, ce qui représente une augmentation de 50%.

Taalah et al [53], ont étudié l'effet de la teneur en fibres de palmier dattier (sans et avec traitement chimique) sur les propriétés mécaniques, sur le comportement mécanique et sur le degré d'insensibilité à l'eau du BTC. Le composite a base de fibres traitées est plus ductile qu'avec l'incorporation des fibres brutes et présente aussi des contraintes de rupture et résiduelle légèrement supérieures. Les résultats ont montré aussi que malgré la résistance mécanique des fibres traités dans un milieu alcalin sont légèrement supérieur à celle des fibres brute, le traitement de la surface des fibres n'est pas améliorer l'adhérence fibre/matrice ce qui entraine une diminution de la résistance mécanique

1.10 Conclusion

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherche ont confirmé que l'emploi de la chaux comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des briques d'adobe. Mais la stabilisation des briques d'adobe par des fibres et en particulier les déchets végétaux de type palmier dattier n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Il y a des recherches qui n'ont pas recommandé l'utilisation des déchets végétaux dans la fabrication des briques d'adobe à cause de sa capacité d'absorption d'eau alors que d'autres reconnaissent les déchets végétaux comme une importante catégorie de stabilisants des briques d'adobe. Donc la synthèse sur les travaux antérieurs a mis en évidence les besoins d'expérimentation sur l'effet de l'introduction des déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe. C'est dans ce cadre que l'étude a été élaborée dans cette recherche.

DEUXIÈME PARTIE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

2 Chapitre 2 : Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des briques d'adobe exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des briques d'adobes en fonction de leur utilisation. La nature du sol et celle des liants utilisés comme stabilisants ainsi que la nature des fibres employées sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement des briques. Donc pour étudier correctement les propriétés des briques d'adobe, on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants.

Dans ce chapitre nous présenterons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les essais des résistances mécaniques et durabilité des briques d'adobe.

2.2 Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont : le sol, le sable concassé, la chaux, les déchets de palmier dattier.

2.2.1 Sol

2.2.1.1 Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Biskra (Algérie), il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques du sol

A. Les masses volumiques

Le tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau 2.1 : les masses volumiques du sol

Masse volumique apparente (Kg/m^3)	Masse volumique absolue (Kg/m^3)
1190	2660

B. Granulométrie

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais : l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon les normes NF P 18-560 et NF P 94-057 successivement. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 2.1.

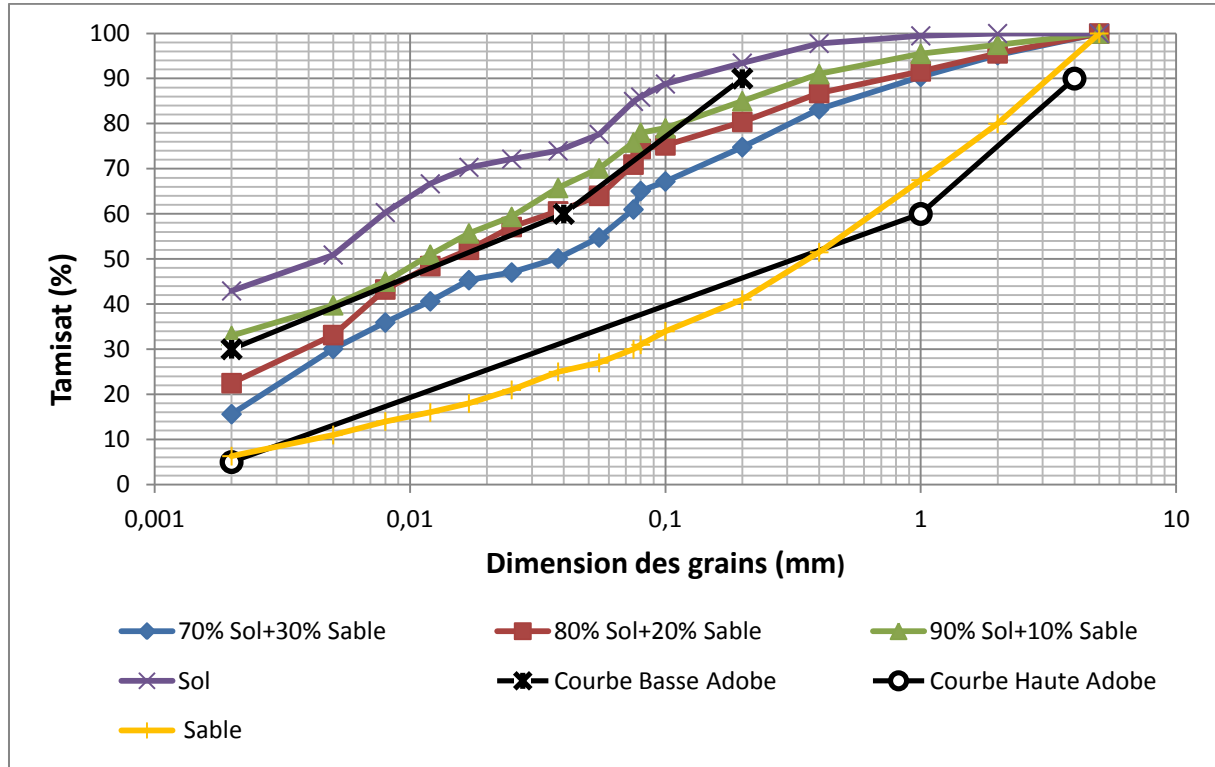


Figure 2.1: La courbe granulométrique du sol.

On constate selon la courbe granulométrique du sol qu'il est situé hors du fuseau limite recommandé par Delgado et al [20], pour la fabrication des briques d'adobes. Avec l'ajout de sable à différentes proportions (10%, 20%, 30%) du poids de mélange sec, le fuseau granulaire se rapproche des fuseaux granulaires de référence. Cependant, le mélange du sol (70%) avec le sable concassé (30%) permet de diminuer le pourcentage des fines (argiles) et de diminuer la cohésion du mélange qui donne par la suite une courbe granulométrique située dans le fuseau granulaire recommandé pour la fabrication des briques d'adobe.

C. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Les essais définis selon la procédure de la norme NF P 94-054. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2 :

Tableau 2.2 : Les limites d'Atterberg du sol

Limites d'Atterberg		
Limite de liquidité LL (%)	Limite de plasticité LP (%)	Indice de plasticité IP (%)
37,28	17,35	19,93

Les résultats obtenus pour notre sol, montrent que le sol se situe dans la zone limite de liquidité ($31 < WL < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($16 < IP < 33$) selon Delgado et al [20]. Le graphique 2.2 permet d'affirmer que se sol présente une plasticité tout à fait adaptée à la production des briques d'adobe.

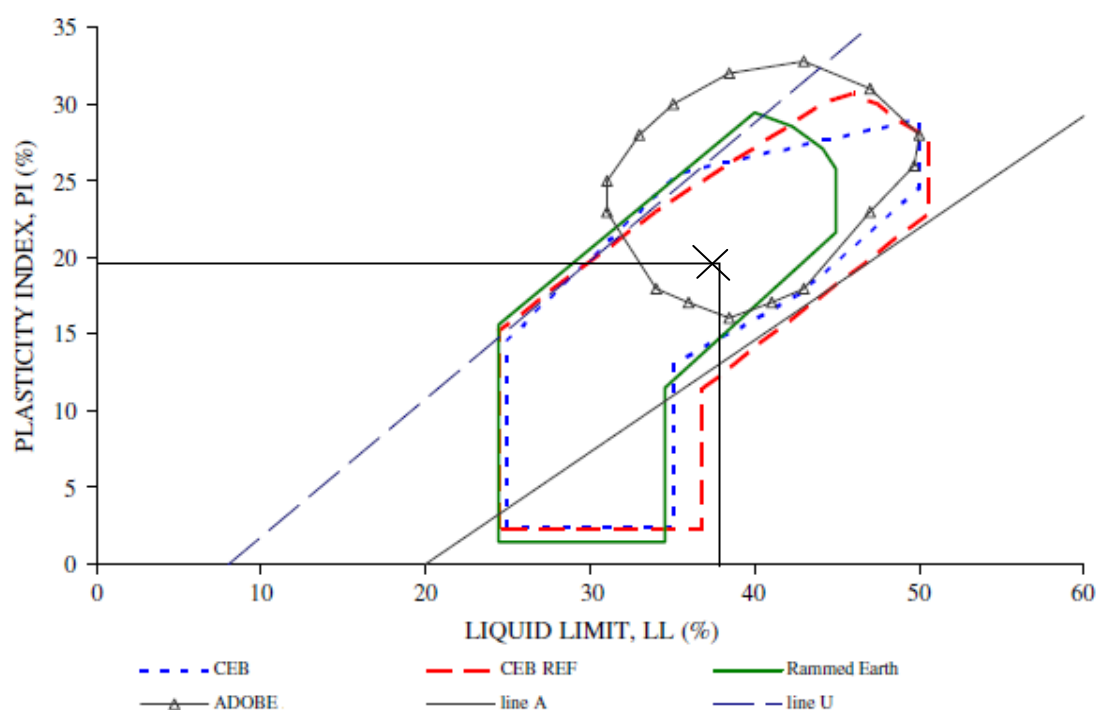


Figure 2.2 : Diagramme de plasticité.

2.2.1.3 Analyse chimique et minéralogique du sol

A travers la revue bibliographique, on a constaté que l'influence des argiles sur les propriétés des sols dépend non seulement de leur teneur dans le sol (texture), mais particulièrement de la nature des différentes espèces minérales qui les constituent. En effet, les différents minéraux argileux possèdent des propriétés très distinctes et de ce fait, ils affectent différemment le comportement du sol. Il est utile de connaître la nature des différents constituants (identification), et de connaître les quantités de chaque espèce minérale (quantification) constituants ces argiles.

Les analyses de compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire du centre d'études et de services technologiques de l'industrie des matériaux de construction CETIM à Boumerdès (Algérie).

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur ce sol, a révélé la composition chimique qui figure sur le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : L'analyse chimique du sol.

Composition chimique (%)										Perte au feu
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	
36.95	5.33	2.53	27.19	1.97	0.15	0.90	0.10	0.14	0.34	24.3900

L'analyse par diffraction des rayons X a permis de déterminer la composition minéralogique estimative (semi quantitative) présentée sur le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Composition minéralogique du sol.

Minéraux présents	Composition minéralogique (%)
Quartz	28
Calcite	45
Dolomite	07
Albite	01
Feldspaths potassique (Orthose)	02
Illite	03
Kaolinite	05
Montmorillonite	06
Minéraux ferrugineux + Autres	03

La diffractogramme de rayon X du sol est présentée sur la figure 2.3

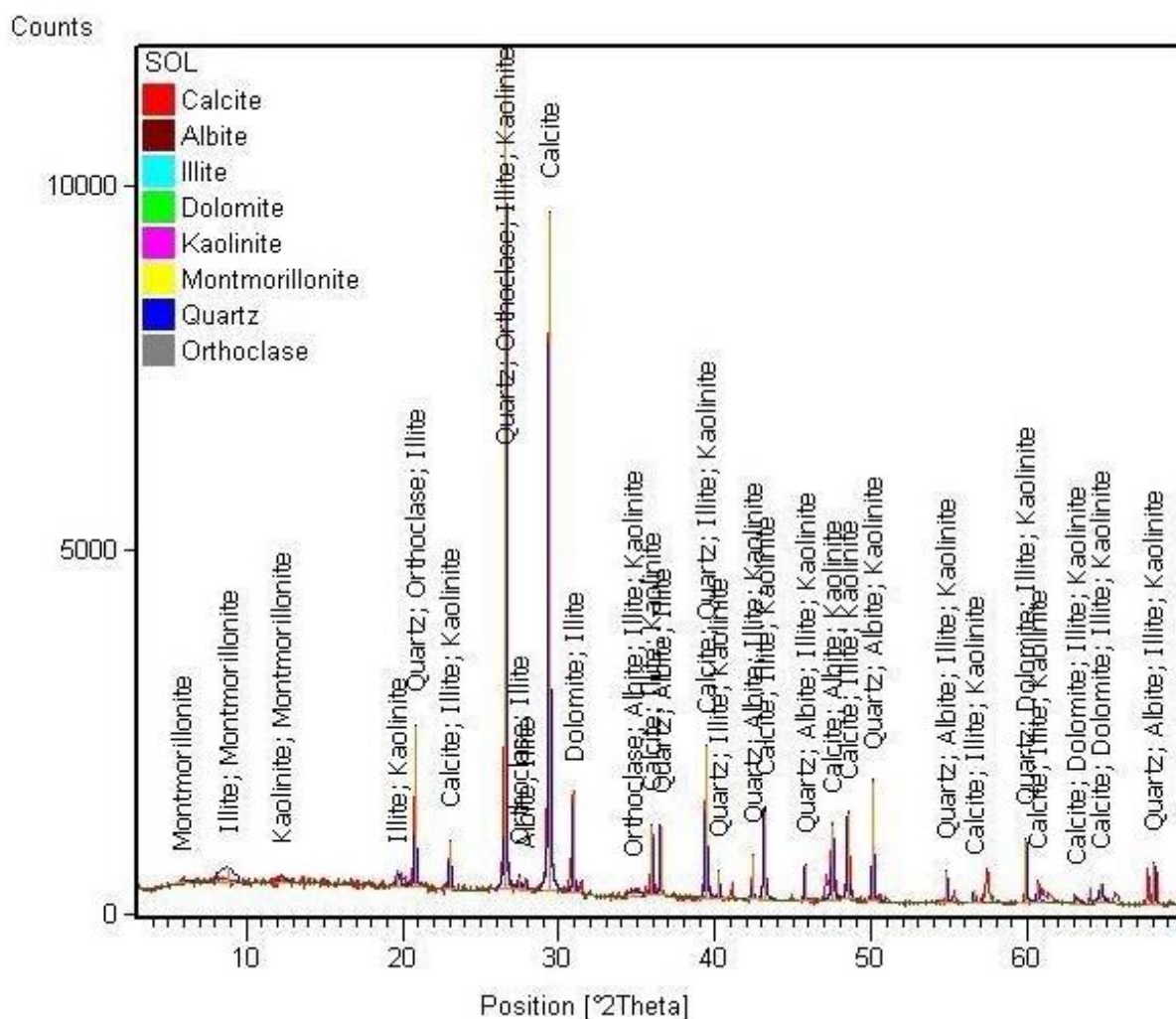


Figure 2.3 : Le Diffractogramme de rayon X de sol

A travers l'analyse chimique du sol, on voit bien que le sol contient un taux de 0,15 % de trioxyde de soufre (anhydride sulfurique) SO_3 , ce taux ne dépasse pas 3% qui est la limite recommandée pour la stabilisation des sols [73].

L'analyse minéralogique a révélé la présence d'un taux considérable en quartz (28%) et en calcite (45%). La partie argileuse est présentée par une teneur peut importante.

2.2.1.4 La matière organique

Les sols peuvent contenir des matières organiques (micro-organisme, humus...), certains acides humiques sont néfastes en cas de stabilisation, car ils retardent ou annulent la prise des liants hydrauliques [73].

L'analyse de notre sol a révélé la présence d'un taux de 1,93 en matières organiques. Selon Doat et al [73] ce taux ne dépasse pas 2%, qui représentent la limite recommandée pour la stabilisation des sols.

2.2.1.5 Analyse physico-chimique

A. Mesure de pH

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millimètres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évoluées ou carbonates. L'analyse de notre sol a montré que son pH est de 7,71. D'après Vilenkina [74] pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6 un prétraitement du sol est indispensable. En général, les sols dont le pH est grand auront de meilleures résistances.

B. L'essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène (NF P18-592) permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux.

Pour ce faire, on fixe sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols.

Les résultats de l'essai de bleu de méthylène sont présentés dans le tableau 2.5

Tableau 2.5 : Valeur du bleu de méthylène.

Echantillon	Valeur de bleu de méthylène	Classification du sol
Sol de Biskra	3,66	Sol limoneux de plasticité moyenne

2.2.2 Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des briques est un sable concassé provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol. Les caractéristiques physiques et chimiques du sable, déterminées selon les normes AFNOR, sont présentées sur le tableau 2.6 et 2.7 successivement. La courbe granulométrique du sable est représentée sur la figure 2.4.

Tableau 2.6 : Caractéristique physique du sable concassé.

Echantillon	Masse volumique absolue (Kg/m ³)	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Equivalent de sable (%)	
			Visuel	Au piston
Sable concassé	2600	1470	35,20	34,67

Tableau 2.7 : Composition chimique du sable concassé.

Composition chimique %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	Cl	Na ₂ O	MgO	Perte au feu
1.46	0.34	0.22	57.71	0.14	0	0.017	0	0	38.45

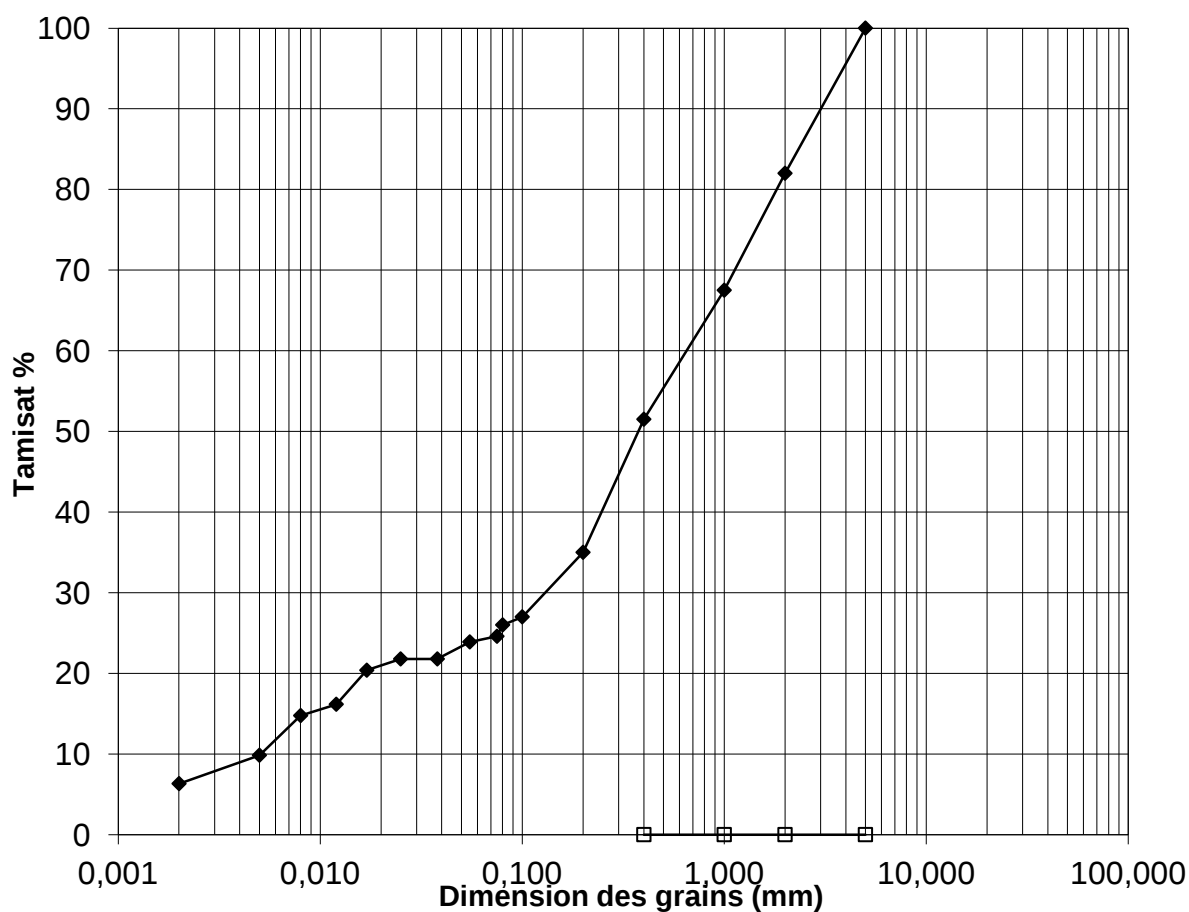


Figure 2.4 : La courbe granulométrique du sable concassé.

2.2.3 La chaux

La chaux utilisée dans cette étude est de la chaux vive (CaO) produite dans la ville de Hassasna, wilaya de Saida. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive.

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxides	Teneurs (%)	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	82.77			
Al ₂ O ₃	10.63	Masse volumique absolue	Kg/m ³	2230
Fe ₂ O ₃	3.27			
SiO ₂	1.35			
MgO	1.88	Masse volumique apparente	Kg/m ³	1490
SO ₃	0.11			
K ₂ O	0.15		m ² /Kg	300
Na ₂ O	0.06	Surface spécifique		

2.2.4 L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau qui contient peu de sulfate et ayant une température de 20 ± 1 ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.2.5 Les déchets de palmier dattier

Les déchets de fibres naturelles utilisés dans cette étude proviennent du broyage des parties des folioles (Figure 1.30 et Figure 2.5) à l'Institut technique pour le développement de l'agronomie saharienne (ITDAS Biskra). La longueur des déchets de palmier dattier varie de 10 à 50 mm avec une longueur moyen de 25 mm, et leur diamètre de 0.35 à 0.9 mm avec un diamètre moyen de 0.55mm. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont prises d'une étude antérieure de KENZA ALMI et al [75]. Le tableau 2.9 montre les propriétés physiques des déchets de palmier dattier, tandis que le tableau 2.10 donne les propriétés mécaniques [75].



Figure 2.5 : Déchet de palmier dattier

Tableau 2.9 : Les propriétés physiques des déchets de palmier dattier [75].

Propriétés	Folioles
Densité apparente (Kg/m ³)	411 ± 41.4
Densité absolue (kg/m ³)	830 ± 23.6
Absorption d'eau (% by mass)	96.6 ± 1.4
Porosité (%)	50.6

Tableau 2.10 : Les propriétés mécaniques des déchets de palmier dattier [75].

Propriétés	Folioles
Diamètre (mm)	0.35 - 0.90
Résistance à la traction (MPa)	100.12 ± 43.87
Allongement (%)	2.68 ± 0.49
Module de young (GPa)	4.00 ± 1.33

2.2.5.1 Traitement des déchets de palmier dattier

Les déchets de palmier dattier ont été traités par différents produits (Figure 2.6) dans le but d'augmenter l'imperméabilité à l'eau et faire disparaître la lignine qui entoure les déchets et obtenir des surfaces rugueuses afin d'améliorer l'adhérence déchet/matrice :

- A- Traitement par immersion dans l'eau :** cette technique consiste à immerger les déchets complètement dans l'eau pendant 24 heures [76]. Cette opération vise à éviter l'absorption de l'eau de mélange par les déchets qui restent ensuite à température ambiante pendant 24 h pour évacuer le surplus d'eau laissé à la surface des déchets, avant de les mélanger avec la matrice.
- B- Traitement par la résine :** la résine utilisée pour ce travail porte le nom commercial de "MEDALATEX", fourni par Granitex, une société privée algérienne qui fabrique des additifs. MEDALATEX est une dispersion aqueuse de résine de couleur blanche. Elle est compatible avec la plupart des ciments ainsi qu'avec la chaux. L'ajout de latex donne une bonne adhérence au support, il donne aussi l'imperméabilité, la durabilité et l'amélioration de la protection de l'armature, donc la résistance aux attaques chimiques [29]. Les déchets de palmier dattier ont été totalement immergés dans la résine MEDALATEX pendant 24 h, à la fin du processus de traitement, les déchets de palmier dattier ont été séchés à température ambiante pendant 48 h, avant de les mélanger avec la matrice.
- C- Traitement par Flintkote :** Le Flintkote utilisé dans cette étude provient de la SARL (DBA TECHNOGUM) qui est située à Chebli, en Algérie. Ce Flintkote est une émulsion surstabilisée composée d'eau, de bitume, d'émulsifiant et de bentonite de forage. Le Flintkote est utilisé en général comme membrane imperméable sur le béton pour protéger le de la carbonatation, de l'écaillage, de la dégradation et des attaques de sulfate. Les déchets de palmier dattier ont été totalement immergés dans une solution de 70% de Flintkote et 30% d'eau propre et froide pour le diluer pendant 2 h. A la fin du processus de traitement, les déchets de palmier dattier ont été séchés à température ambiante pendant 48 h avant l'utilisation.
- D- Traitement par Vernis :** Le vernis utilisé dans cette étude a un nom commercial "VERINEX", fourni par l'ENAP qui est située à LAKHDARIA en ALGÉRIE. VERINEX est un vernis synthétique brillant pour bois ayant une bonne adhérence et ayant une densité de $0,902 \text{ g/cm}^3$ et une viscosité de 20-25 C° : 60 CF4. Un vernis est un film de finition et de protection qui est généralement associé au bois, mais qui peut également être utilisé sur d'autres substrats. Les déchets de palmier dattier ont été totalement immergés dans le vernis pendant 24 heures, à la fin du processus de traitement, les déchets de palmier dattier ont été séchés à température ambiante pendant 48 heures.
- E- Traitement par la chaux :** les déchets de palmier dattier ont été trempés dans un lait de chaux avec une suspension à 10% qui est égale à 100g de chaux pour 1L d'eau pendant 24 heures (les caractéristiques de la chaux utilisées est dans le tableau 2.8). À la fin du

processus de traitement, les déchets de palmier dattier ont été séchés à température ambiante pendant 48 heures.



Figure 2.6 : Traitement de déchets de palmier dattier par différents produits

2.3 Préparation des briques

2.3.1 Matériels spécifiques

Les éprouvettes cubiques de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ sont utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme expérimental, à l'exception des essais de la résistance à la traction qui est réalisé par des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Fig. 2.7)



Figure 2.7 : Les moules utilisés pour la confection des briques d'adobes.

2.3.2 Composition des mélanges

Cette étude vise à évaluer l'influence des déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe. À cet égard, le pourcentage de sol, sable concassé, chaux et d'eau a été supposé constant et le pourcentage de déchets de palmier dattier a été supposé variable du poids de mélange sec. Les proportions du mélange expérimental sont indiquées dans le tableau 2.11. La quantité de chaux, dans le mélange, est fixée 12 % du poids du mélange sec d'après les résultats de l'essai de résistance à la compression (Figure 3.1).

Tableau 2.11 : Composition des différents mélanges employés dans cette étude

Sol (%)	Sable concassé (%)	Chaux (%)	Eau (%)	Déchets de palmier dattier (%)					
				Sans traitement	Avec traitement				
					Par l'eau	par résine	par Flintkote	par vernis	par chaux
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					
70%	30%	12%	30%	0					
				0.3					
				0.6					
				0.9					
				1.2					

2.3.3 Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules, à titre d'exemple, ABSD désigne un adobe brique sans déchets de palmier dattier. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 2.12.

Tableau 2.12 : Codification des mélanges

Code	Désignation
ABSD	Adobe brique sans déchets de palmier dattier
ABAD	Adobe brique avec déchets de palmier dattier sans traitement
ABTE	Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par l'eau
ABTR	Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Résine
ABTF	Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Flintkote
ABTV	Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par Vernis
ABTC	Adobe brique avec déchets de palmier dattier traité par la chaux

2.3.4 Préparation des mélanges

Pour la première fois, le sol et le sable concassé ont été séchés avant la correction granulométrique pendant 24 h à 105 C° et tamisés pour obtenir des particules <5 mm. Le mélange des matériaux et le compactage des éprouvettes ont été effectués manuellement à la main pour couler le mélange dans le moule. Bien que le processus de production manuelle des mélanges et des éprouvettes ajoute une incertitude épistémique qui peut être réduite par la mise en œuvre de procédés mécaniques, les procédés manuels sont utilisés dans la plupart des projets de construction utilisant des matériaux en terre dans la pratique réelle. Par conséquent, l'objectif de cette étude était de reproduire l'impact de ces déchets végétaux de palmier dattier dans des conditions de construction réelles. Le sol, le sable concassé, la chaux étaient mélangés avant l'ajout d'eau. Les déchets de palmier dattier ont été progressivement et aléatoirement ajoutés et mélangés de manière homogène pour minimiser la formation de grappes de déchets. Une fois que les déchets de palmier dattiers ont été incorporés dans la matrice, une quantité optimale d'eau potable a été ajoutée (30 % en poids des mélanges sec) jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.

Avant le compactage manuel de la matrice, le moule a été lubrifié à l'intérieur pour réduire les risques de fissure de l'échantillon du au retrait. Les moules en acier comme le montre la Figure 2.7 ont rempli de trois couches et chaque couche a été compactée avant de remplir les couches suivantes pour réduire l'espace des pores et limiter encore plus le volume de la matrice et l'eau. Après le compactage et le remplissage des couches suivantes, la surface de chaque couche a été écorchée pour assurer une bonne liaison entre les différentes couches. Après le remplissage du moule à la hauteur appropriée et le compactage manuel, l'échantillon a également été découpé avec des ciseaux pour éviter que les fibres ne sortent de l'échantillon. Le démoulage est effectué avec soin après le durcissement des échantillons d'essai (48 h). Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique pour tous les essais mécaniques et de durabilité.

2.3.5 Mode de cure des briques

Après le démoulage, les briques sont prises manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité des briques, ensuite les briques sont couvertes par un film en plastique de manière à assurer leur étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, les briques sont conservées au laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures avant d'être soumis au mode de cure. Toutes les briques étudiées sont conservées à l'étuve à une température $T = 65 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant une période de neuf jours (suivant les résultats présentées dans le tableau 3.1). Après l'enlèvement de la couverture en plastique, les briques ont été séchées dans l'étuve jusqu'à ce qu'une masse constante soit enregistrée.

Les différentes étapes de confection des briques d'adobe sont présentées dans la Figure 2.8

Mélange sec 	Mélange humide 	Moulage des briques (10x10x10) cm³ 
Démoulage des briques (10x10x10) cm³ 	Démoulage des briques (4x4x16) x cm³ 	Couvrir les briques 
Cure dans l'étuve 		Séchage des briques a l'air 

Figure 2.8 : Préparation des briques d'adobe

2.4 Propriétés mécaniques

2.4.1 Résistance à la compression sèche

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés selon la norme NF P18-406 sur les éprouvettes de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ à l'aide d'une presse hydraulique. La charge maximale appliquée à laquelle chacun des briques s'est fracturé a été enregistrée et la résistance à la compression des briques a été déterminée. La résistance à la compression R_c est exprimée en MPa et donnée par la formule :

$$R_c = F/S \quad (2.1)$$

Où :

R_c : Résistance à la compression des briques en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les briques (N).

S : Surface moyenne des faces d'essai en (mm^2).

2.4.2 Résistance à la traction par flexion

Les éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ sont placées entre deux plaques avec des supports. La plaque inférieure comprend deux supports espacés de $3a$ (12 cm) Figure 2.9. La plaque supérieure comporte un seul support qui sera placé sur l'éprouvette entre les deux autres. Le chargement est effectué à une vitesse constante $V=0,8 \text{ MPa/s}$. L'essai a été réalisé selon la norme (AFNOR, 2001f). La résistance à la traction R_f est exprimée en MPa et donnée par la formule :

$$R_f = 1.5 FL/BD \quad (2.2)$$

Où :

R_f : Résistance à la traction par flexion des briques en (MPa).

L : Longueur de la brique en (mm)

B : Largeur de la brique en (mm)

D : Hauteur de la brique en (mm)



Figure 2.9 : Essai de la résistance à la traction par flexion.

2.5 Essais de la durabilité

2.5.1 Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (Figure 2.10). Le coefficient d'absorption d'eau C_b correspond au taux d'absorption après un temps égal 10 min. Le coefficient C_b d'absorption d'eau est exprimé par la formule suivante :

$$C_b = \frac{100 * (M_1 - M_0)}{S \sqrt{t}} \quad (2.3)$$

Avec :

C_b : coefficient d'absorption d'eau par capillarité

M_1 : Poids de la brique après immersion dans l'eau (g)

M_0 : Poids de la brique avant immersion dans l'eau (g)

S : surface de la face immergée, en centimètres carrés

t : est la durée d'immersion du bloc en minutes.

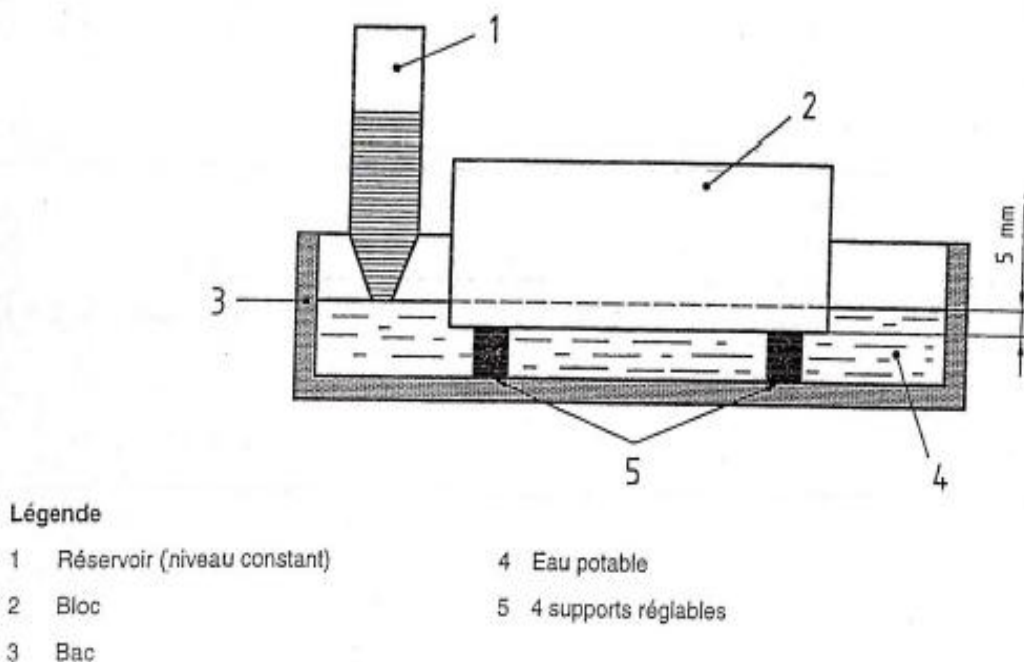


Figure 2.10 : Essai de l'absorption capillaire [23]

2.5.2 Absorption totale

Cet essai (norme XP 13- 901) consiste à immerger les briques dans un bac à eau pendant 24 h, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids de la brique à l'état sec P_s . L'absorption totale (TWA) est déterminée par la formule suivante :

$$A (\%) = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (2.4)$$

2.5.3 Gonflement

La mesure du gonflement des briques d'adobes se fait selon la procédure suivante (norme XP 13- 901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure
- Mesurer la distance entre plots : L_0
- Placer les briques dans un bac d'eau (Figure 2.11)
- Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : L_1 .
- L'amplitude du gonflement de chaque brique est donnée par la formule suivante :

$$\Delta l_s (\text{mm/m}) = \frac{(L_1 - L_0)}{L_0} \quad (2.5)$$

L_0 : la distance avant immersion

L_1 : la distance après immersion



Figure 2.11 : Essai de gonflement

2.5.4 Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion des briques d'adobe s'effectue suivant la norme expérimentale NF XP 13-901 (Figure 2.12). L'objectif est de soumettre la brique à une friction effectuée à l'aide d'une brosse métallique de largeur 25 mm et avec une masse totale de 3186g. La cadence d'aller-retour sur cette face de parement est de 1 aller-retour par seconde pendant une minute soit 60 allers-retours, la largeur de la brosse a été maintenue aussi étroite que possible et le brossage a été effectué sur toute la longueur de la brique. De cet essai est déduit le coefficient d'abrasion (C_a) de la brique qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion. Plus le coefficient d'abrasion de la brique est important, meilleur est la résistance de la brique.

$$C_a = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad (2.6)$$

Avec :

C_a = coefficient d'abrasion de la brique en cm^2/g .

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

m_0 = masse initiale de la brique avant l'abrasion en gramme

m_1 = Masse de la brique après l'essai d'abrasion en gramme.



Figure 2.12 : Essai de la résistance à l'abrasion

2.5.5 Résistance à l'érosion

L'essai de la résistance à l'érosion a été effectué sur les spécimens de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour simuler les gouttelettes de pluie. Il a été réalisé selon la norme néo-zélandaise NZS 4298 [78], destinée aux briques de terre, basée sur la méthode de Geelong. Le test de Geelong est proposé spécialement pour les adobes pouvant contenir de la paille. Comme il s'agit d'un test agressif, il simule des circonstances accidentelles se produisant principalement lorsque les briques de terre ne sont pas rendues. On laisse s'égoutter 100 ml d'eau d'une hauteur de 400 mm sur l'échantillon, qui est incliné à 30° (Figure 2.13). La durée du test était comprise entre 20 et 30 min (adaptée de la norme, de 20 à 60 min) et la profondeur de trou a été mesurée. Un indice d'érodabilité, entre 3 et 5, a été déduit de cette valeur selon la norme néo-zélandaise. Avec une profondeur de trou comprise entre 5 et 10 mm, la classe d'érosion était de 3 et le matériau a été considéré comme érosif. Une profondeur de trou comprise entre 10 et 15 mm correspond à la classe 4 et le matériau a été considéré comme très érosif. Enfin, pour une profondeur de trou supérieure à 15 mm, la classe était 5 et le matériau à échouer au test.

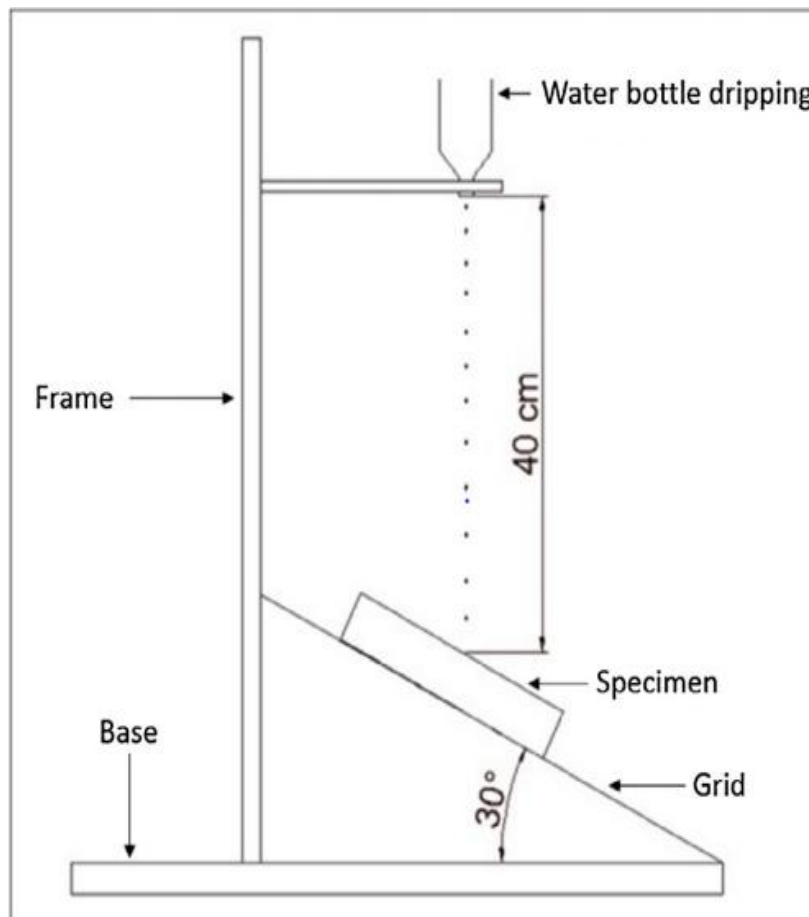


Figure 2.13 : Essai de la résistance à l'érosion [78]

2.5.6 Séchage/ mouillage

Pour déterminer la tenue et le comportement des briques d'adobe lorsqu'elle subit des alternances pluviométriques (saturation en hiver et séchage en été), un ensemble d'essais de séchage/mouillage a été effectué sur les différentes briques étudiées suivant la norme ASTM D559-57, dont le principe de l'essai est le suivant :

- Dessécher les briques jusqu'à masse constante à une température de 60-75°C.
- Peser chaque brique (masse sèche) et subir une série de 12 cycles comprenant :
 - 05 heures d'immersion au bout desquelles le bloc est pesé.
 - 42 heures de séchage à l'étuve à une température de 75°C.

Les briques sont brossées et pesées et le cycle complet ne doit pas excéder 48 heures. On recommence ce cycle douze (12) fois de suite puis les briques sont séchées à une température de 75°C jusqu'à masse constante. Les résultats de cet essai donnent la perte en masse maximale admise après 12 cycles de séchage/mouillage. Fitzmaurice [79], a recommandé des limites sévères pour perte de poids selon la norme ASTM D559. La perte en masse admissible pour les constructions rurales est de :

- 05% pour tout climat dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 500 mm
- 10% pour les climats secs dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 500 mm.

A noter d'après Guettala [21] que ces tests effectués au laboratoire sont généralement plus sévères qu'en réalité.

2.5.7 Attaque sulfatique externe

Pour étudier l'influence de sodium de sulfate sur les briques d'adobe, deux procédures peuvent être utilisées :

- 1- L'essai d'absorption d'eau capillaire de référence AFNOR XP P 13-901 a été utilisée comme base pour tester l'usure des briques d'adobes exposés à une solution aqueuse de sulfate de sodium. Les briques d'adobe sont soumises à deux séries de procédures différentes. Sur la première série, la capacité des briques à absorber la solution de sulfate de sodium. Dans la seconde, l'influence de la concentration de sulfate de sodium sur l'absorption des briques. Les briques sont placées sur des barres de support en aluminium dans des conteneurs en PVC et on y ajoute progressivement une solution aqueuse de sulfate de sodium jusqu'à une hauteur de 5 mm. La solution a été remplacée au fur et à mesure de la baisse de son niveau due à l'absorption. Aucun signe visuel de corrosion de l'aluminium n'a été observé sur les barres de support pendant les expériences.

2- Le RILEM TC 127-MS-A.1 [80] a été utilisé comme base. Cette étude recommande la capillarité et l'immersion ultérieure des briques de maçonnerie en utilisant du sulfate de sodium à une concentration de 10 % en masse comme procédure accélérée. Dans cette étude, seule la capillarité a été utilisée, en prenant également comme référence le NBR 9779 [81], qui traite des essais de capillarité sur des échantillons de béton et de mortier durcis. L'influence du temps de contact avec la solution aqueuse de sulfate de sodium. Le temps d'absorption capillaire a été étudiée pour tester l'usure des briques d'adobe exposés au sodium sulfate :

- Les briques ont été placées à l'intérieur du récipient sur les barres de support en aluminium, une solution aqueuse de sulfate de sodium à 10 % de concentration en masse a été progressivement ajoutée jusqu'à atteindre une hauteur de 2 cm à partir de la base des briques. Ce temps a été enregistré comme temps zéro ($t = 0$ h) ;
- À $t = 4$ h, la solution était remplacée à 2 cm ;
- À $t = 1$ semaine, les briques étaient retirées de la solution et pesées, obtenant ainsi Mw_1 (en grammes) ;
- Le conteneur a été vidé et nettoyé, puis les briques ont été placées à l'intérieur sur des barres de support pour être séchées. Les échantillons sont restés dans une pièce fermée avec une température et une humidité relative de $27,5 \pm 0,5$ C° et $71,5 \pm 5,0$ %, respectivement
- Au bout de deux semaines, les briques ont été subtilement brossées jusqu'à ce que les particules libres soient éliminées. Ensuite, ils ont été à nouveau pesés, ce qui a permis d'obtenir Md_1 ;
- les étapes 1 à 5 ont été répétées jusqu'à la rupture des échantillons.
- La perte de masse des éprouvettes a été calculée en utilisant l'équation (2.6) suivante:

$$M_{ij} (\%) = (M_{ij} - Md_1) / Md_1 \times 100 \quad (2.7)$$

Où :

$i = w$ (mouillage par absorption capillaire) ou d (séchage), $j = \text{cycle 1, cycle 2, cycle 3 ...}$ pour les valeurs de d ou cycle 2, cycle 3, cycle 4 ... pour les valeurs de w ;

Md_1 = masse des briques pesées à la fin de la phase de séchage du cycle 1.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des briques d'adobes développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : sol, sable concassé, chaux et les déchets. Les déchets utilisés dans

cette étude sont d'origines végétales (déchets de palmier dattier) avec différentes méthodes de traitement.

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude. La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des briques d'adobe dans ce chapitre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés d'adobe.

Les résultats des différents essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre3).

3 CHAPITRE 3 : Résultats et discussion

3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude de l'effet des déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe. A cet effet, le programme expérimental de cette étude se répartit en trois phases. La première phase porte sur une étude abordant l'effet du temps de cure et le dosage de la chaux sur les résistances mécaniques des briques. Il faut signaler que l'étude de l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques des briques à base de chaux a été réalisée, en vue de faire un bon choix du temps de cure et dosage de la chaux optimal pour le reste de l'étude.

La seconde phase sert à comprendre l'effet des déchets de palmier dattier avec différents pourcentages (0.3, 0.6, 0.9 et 1.2%) du poids du mélange sec, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobes.

La troisième phase traite l'influence des déchets de palmier dattier traité par différents produits (Flintkote, Vernis, Chaux, Résine) avec différents pourcentages (0.3, 0.6, 0.9 et 1.2%) du poids du mélange sec, sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe.

3.2 Influence des dosages en chaux et temps de cure sur la résistance mécanique d'adobe

Les recherches de Venkatarama et al [82], ont montré que les briques de terre stabilisée à la chaux conservées à une température ambiante de 20 à 30C°, exigent une durée de cure très importante dépassant un mois pour assurer un développement satisfaisant de la résistance. La réaction pouzzolanique lente de la chaux se traduit par une faible résistance à court et à moyen terme.

Donc pour éviter le problème du stockage des briques pendant une longue durée, une cure accélérée est indispensable.

Les résultats de Taallah [33] montrent que les briques cures à l'étuve présentent la meilleure résistance à la compression et traction comparativement aux autres modes de cures (cure au laboratoire et la cure à vapeur naturelle). Ces résultats sont en concordance avec ceux de Al-Mukhtar et al. [83], qui ont constaté qu'un sol stabilisé à la chaux soumise à une cure à température élevée accélère la réaction pouzzolanique, et cause par suite un développement rapide de la résistance mécanique.

La Figure 3.1 présente les valeurs de la résistance à la compression de l'ABSD avec des différentes teneurs en chaux (8, 10, 12 et 14 %) en fonction des différentes périodes de cure à l'étuve à une température de 65 C°.

On peut voir que l'augmentation de la teneur en chaux de 8 % à 12 % conduit à une augmentation de la résistance à la compression de l'ordre de 16.67 % pour 12% de chaux lorsque la période de cure augmente de 5 à 9 jours (voir Figure 3.1), cela est attribué au développement du CSH (silicates de calcium hydratés) qui assure les liens entre les particules et renforcent les performances mécaniques des briques, ainsi qu'à la formation de quantités mineures de calcite. Ces constats ont été observés par Bell et Maubec [84,85]. Cependant, au-delà de 9 jours de cure à l'étuve, l'augmentation de la teneur en chaux (de 12 à 14 %) entraînent une diminution de la résistance à la compression des briques à cause de la quasi-absence de CSH et les teneurs excessives en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et en calcite [55]. Les résultats montrent que les briques utilisées offrent une meilleure résistance à la compression avec un optimum de 6 MPa pour une teneur de 12 % de chaux et 9 jours de cure à l'étuve. Tous les résultats de la résistance à la compression étaient supérieurs à la valeur minimale de 2 MPa imposée par les normes du Nouveau Mexique pour la construction en adobe [86] et à la valeur de 1,3 MPa spécifiée par la norme de construction en terre de Nouvelle-Zélande NZS 4298 [78].

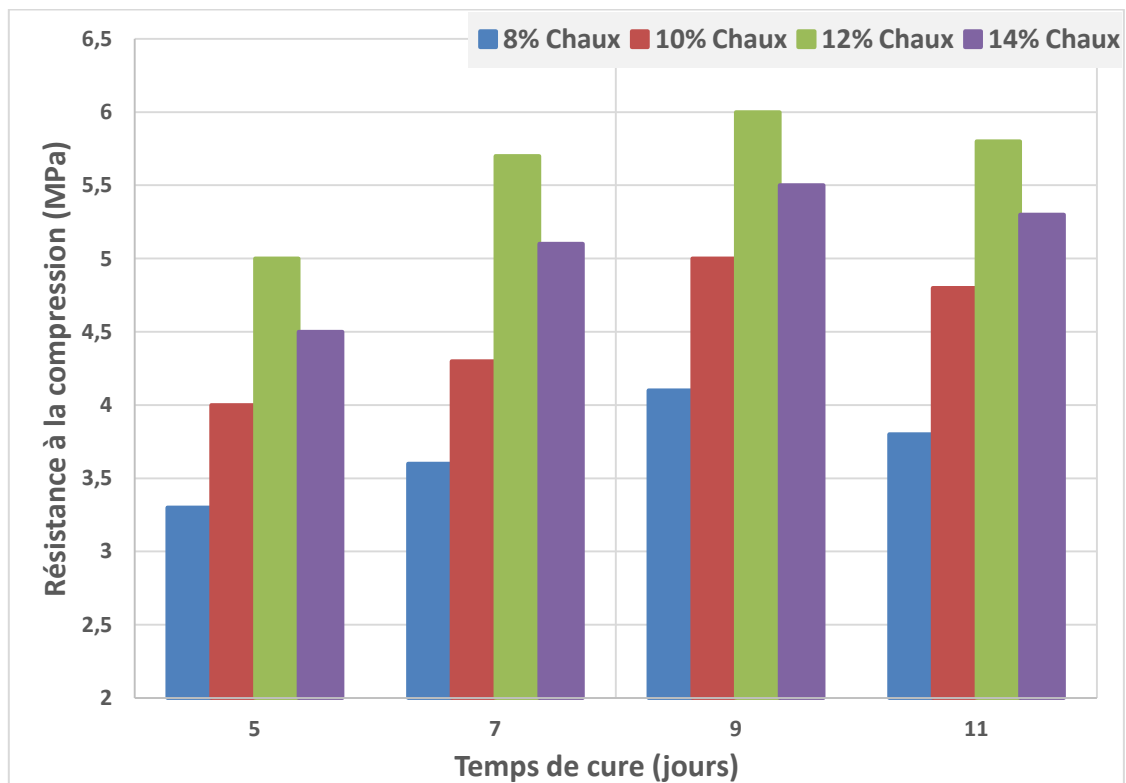


Figure 3.1 : Résistance à la compression d'ABSD en fonction du temps de cure et des dosages en chaux.

3.3 Effet de la teneur en déchets de palmier dattier sur les propriétés mécaniques d'adobe :

Pour étudier l'influence des déchets de palmiers sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe, les échantillons ont été stabilisés avec 12 % de chaux et soumis à un étuvage pendant 9 jours à 65 °C, suivant les résultats de la Figure 3.1.

3.3.1 La résistance à la compression sèche

L'effet de la variation de la teneur en déchet sur la résistance à la compression sèche (RCS) des briques est présenté sur la Figure 3.2, ce paramètre est considéré comme un indicateur important de la résistance des structures en maçonnerie. D'après cette figure, la RCS diminue avec l'augmentation des dosages en déchets (0.3%, 0.6%, 0.9% et 1.2%) pour toutes les briques testées comparativement aux briques sans déchets, ce qui a conduit à la réduction de la résistance à la compression de l'ordre de 45.24% pour 1.2% de déchets. Les valeurs de la RCS des briques sont comprises entre 6.1 MPa à 4.2 MPa, la diminution de la résistance à la compression des briques renforcées peut être attribuée à la domination de l'effet des déchets sur celui de la teneur en chaux, puisque la quantité des produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés et, d'autre part, diminuer le nombre de points de contact et le frottement entre les particules du sol suite à la présence des déchets dans le mélange, ceci entraîne une augmentation du réseau poreux dans les briques, ce qui se répercute défavorablement sur la résistance à la compression. La réduction de la RCS constatée dans notre étude, est attribuée aussi à la faible adhérence entre les déchets et la matrice, provoquée par la distribution non homogène des déchets de palmier dattier, ce qui se traduit par la production des briques plus faibles. Ceci nous montre aussi que la présence des déchets a un effet négatif sur le RCS des briques, suite à la faible transmission des charges au niveau de l'interface déchets /matrice.

Il convient de noter que l'ajout de déchets de palmiers dattiers à la composition a permis d'éviter l'apparition de fissures en transmettant des forces de cisaillement et en assurant une bonne liaison entre les matériaux de la composition. On remarque que pour les briques sans déchets, les fissures se sont propagées immédiatement après l'écrasement, ce qui a mené à la rupture des échantillons [87]. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés dans d'autres études de Yetgin et al, Al Rim et al [58, 88], qui indiquaient que la résistance à la compression diminuait à mesure que la teneur en fibres des plantes augmentait. Les résultats sont également en accord avec les résultats de Khedari et al. [89], qui ont trouvé que l'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco a entraîné une diminution de la

résistance des liaisons des spécimens, conduisant à une résistance à la compression plus faible.

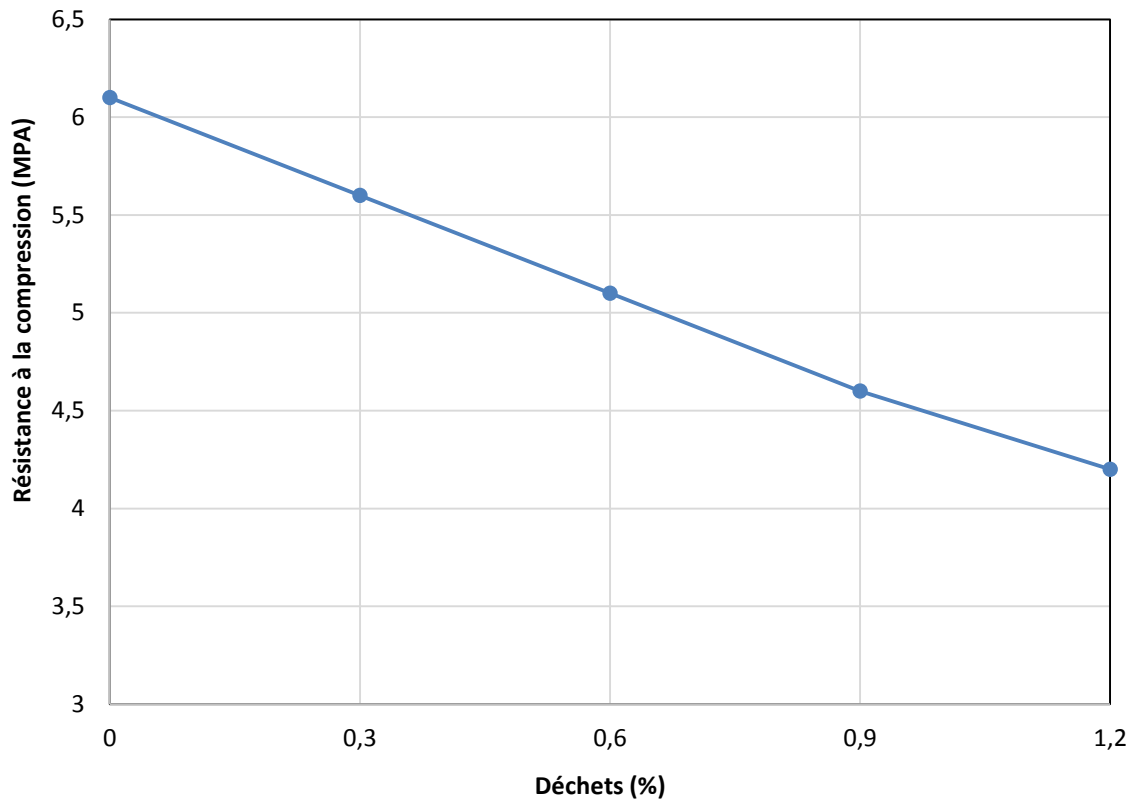


Figure 3.2 : Résistance à la compression d'ABAD.

Afin de mieux comprendre l'effet de l'incorporation des déchets de palmier dattier dans le mélange sur la résistance à la compression, on a examiné la microstructure des morceaux fraîchement écrasés des briques d'adobe à l'aide d'un microscope à balayage électrique (MEB), comme on peut le voir à la Figure 3.3, les briques sans déchets de palmier dattier présentait une microstructure plus compacte avec moins de pores, vides et de fissures. Les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité des briques d'adobe étaient certainement améliorées dues aux liens plus forts qui se sont développés pendant le processus d'hydratation et aux silicates de calcium hydratés (C-S-H) supplémentaires résultant de la réaction pouzzolanique. La Figure 3.4 montre que les briques renforcées par des déchets de palmier dattier présentent une texture plus poreuse et ne constituent pas un réseau de liaison idéale avec les particules de la matrice, cela pourrait expliquer pourquoi les briques renforcées avec des déchets de palmier dattier ont une résistance à la compression plus faible que les briques non renforcées.

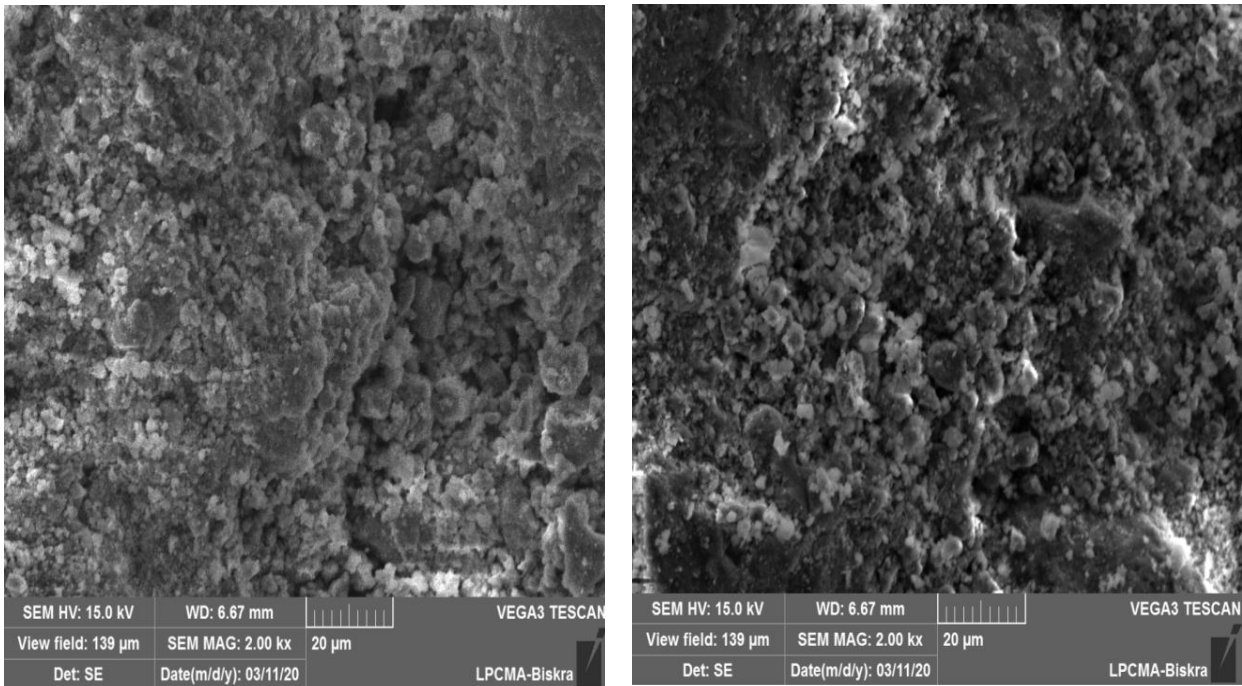


Figure 3.3 : Analyse MEB des briques d’adobe sans déchets



Figure 3.4 : Analyse MEB des briques d’adobe avec déchets

3.3.2 La résistance à la traction par flexion

La Figure 3.5 représente l'influence des déchets de palmier dattier sur la résistance à la traction par flexion (RTF). A partir des résultats obtenus, on peut constater que la RTF augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets. L'augmentation de la valeur de la RTS comprise entre 0,9 MPA et 1,65 MPA est de l'ordre de 83.33%, L'augmentation peut être attribuée à la capacité des déchets à maintenir la matrice ensemble, évitant ainsi la fissuration et la rupture soudaine qui se traduit par l'amélioration de la ductilité du matériau, et a la capacité des déchets à équilibrer une partie des forces de traction grâce à une bonne adhérence de déchets/matrice ce qui réduit la porosité des briques, donnant par suite une résistance meilleure [89, 90]. Les études de Danso, Ghavami et al [91,92] ont déjà rapporté que divers types de fibres naturelles ont été incorporés dans la fabrication d'adobes et d'autres produits de terre afin de réduire leur fissuration engendrée par retrait et d'augmenter leur résistance à la traction. L'augmentation de la RTF obtenue dans cette étude concorde avec les résultats trouvés par Ziegler et al. [93], Millogo et al. [46] et selon Ziegler et al. L'emploi des fibres naturelles dans la fabrication des briques a réduit la taille des fissures de retrait et a amélioré la durabilité et la résistance à la traction. D'après Millogo et al. Les valeurs de la résistance à la flexion des briques fibrées sont plus élevées que celles des briques non fibrées. Ils ont également indiqué que cette augmentation est due principalement à la résistance à la traction élevée des fibres d'Hibiscus cannabinus et à la distribution homogène des fibres et leur adhérence avec la matrice argileuse

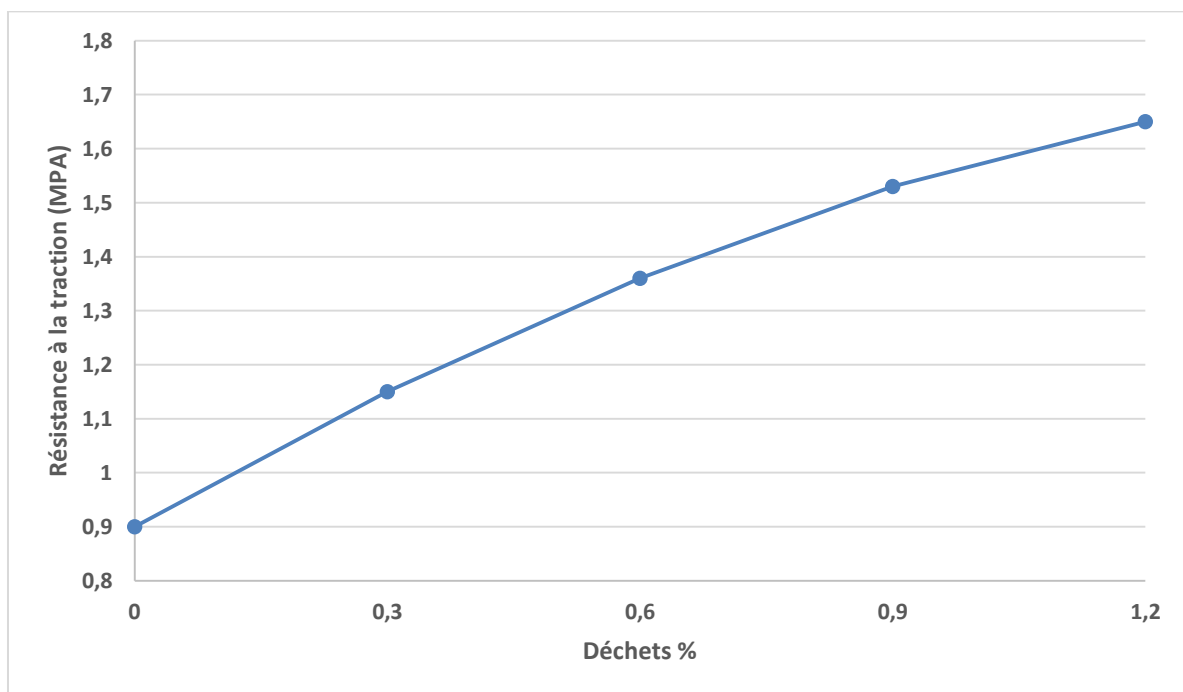


Figure 3.5 : Résistance à la traction par flexion d'ABAD.

3.4 Effet des déchets de palmiers dattiers sur la durabilité des briques d'adobe

On va étudier la durabilité des briques d'adobe à partir de quelques essais de durabilité dans le laboratoire. Guettala et al. [29], ont montré que les conditions des essais de la durabilité des BTC en laboratoire semblent très sévères par rapport aux conditions climatiques naturelles.

3.4.1 Absorption capillaire

L'essai d'absorption d'eau capillaire a été effectué dans des conditions d'humidité semblables à celles observées habituellement pendant et après la saison des pluies. Le coefficient d'absorption capillaire (C_b) représente la capacité d'une brique à absorber l'eau, presque toutes les briques peuvent absorber l'eau par capillarité [23]. La Figure 3.6 illustre la variation du coefficient d'absorption d'eau (C_b) des briques d'adobe en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers. L'essai a enregistré une augmentation du coefficient d'absorption d'environ 4.2 %, 4.8 %, 5.7 %, 6.4 % et 6.8 % pour des teneurs en déchets de palmiers dattiers de 0 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % et 1.2 % respectivement. Cette figure indique également que l'augmentation maximale de la teneur en déchets de palmier dattier conduit à des capacités d'absorption capillaire d'adobe de l'ordre de 61.91 %, la valeur du coefficient d'absorption d'eau augmentée de moins de 20 %, ce qui signifie que les briques d'adobe ont été classés comme ayant une faible absorption capillaire selon la norme NF XP 13-901 [94]. L'augmentation du coefficient d'absorption d'eau à mesure que la teneur en déchets de palmiers dattiers augmentait a pu être attribuée à l'augmentation du nombre de vides apparaissant dans le mélange, cela pourrait également être attribué au caractère hydrophile des déchets de palmiers dattiers lignocellulosiques, en raison de la grande hydrophilie de la cellulose et de l'hémicellulose qui améliorent l'absorption de l'eau [88].

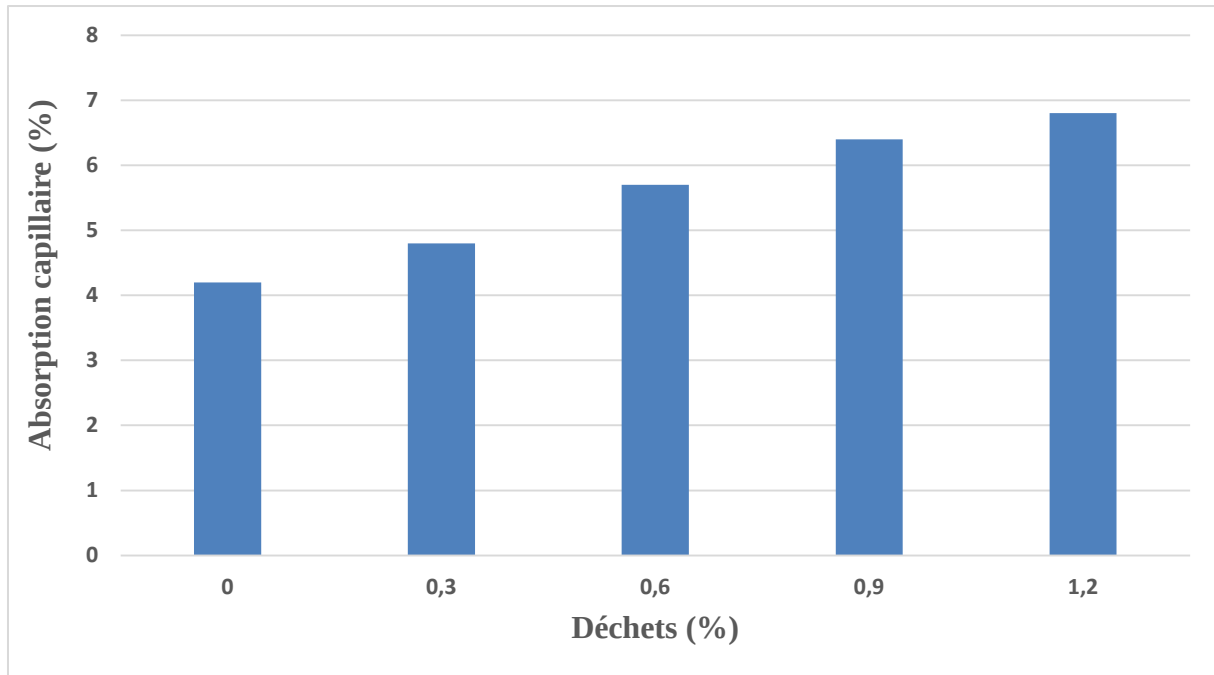


Figure 3.6 : Absorption capillaire d'ABAD.

3.4.2 Absorption totale

L'essai d'absorption totale a été effectué afin de déterminer la capacité maximale d'absorption d'eau des briques d'adobe non renforcés et renforcés. La connaissance de la valeur de l'absorption totale d'eau (ATE) d'une brique est importante, car elle peut être utilisée pour avoir une idée sur la porosité des briques. L'absorption totale est obtenue après l'immersion de la brique dans un bac à eau pendant 24 heures. En général, moins est l'absorption d'eau des briques, meilleure est sa performance mécanique [95]. On a constaté à travers les résultats obtenus dans la Figure 3.7 qu'il y a une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en déchets. Il a également été révélé que l'absorption d'eau augmentait d'environ 7.2 %, 9.4 %, 10.6 %, 11.9 % et 12.8 % lorsque la teneur en déchets de palmiers dattiers était égale à 0 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % et 1.2 %, respectivement. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Ismail et al [96] qui ont constaté que les résultats des essais d'absorption d'eau ont indiqué une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier. Les résultats montrent que l'ajout des déchets dans le mélange augmente l'absorption totale d'eau de l'ordre de 77.87 % pour 1.2% de déchets, cela signifie qu'il y a plus d'infiltrations d'eau dans les échantillons, ceci est attribué à la capacité d'absorption d'eau des déchets, cette absorption est expliquée aussi par l'effet de la nature des déchets. Il est largement reconnu que les fibres cellulosiques sont plus hydrophiles parce qu'elles contiennent la plus grande quantité de groupes OH dans sa

composition chimique, et tout matériau renforcé avec ces fibres à l'état brut a tendance à avoir un caractère plus absorbant à l'eau. En outre, cette capacité des déchets à absorber l'eau peut être attribuée à leur structure poreuse et à leur caractère hautement hydrophile en raison de la présence de groupes hydroxyles de cellulose et d'hémicellulose. Ainsi, l'eau absorbée par les déchets de palmier dattier peut être soit sous forme d'eau libre retenue entre les interstices des faisceaux de microfibres, soit sous forme d'eau fixe à la surface des microfibres [97]. Mais malgré cette augmentation les valeurs de l'absorption totale d'eau étaient inférieures à la valeur maximale recommandée de 15 % selon la norme BIS 1725 [98].

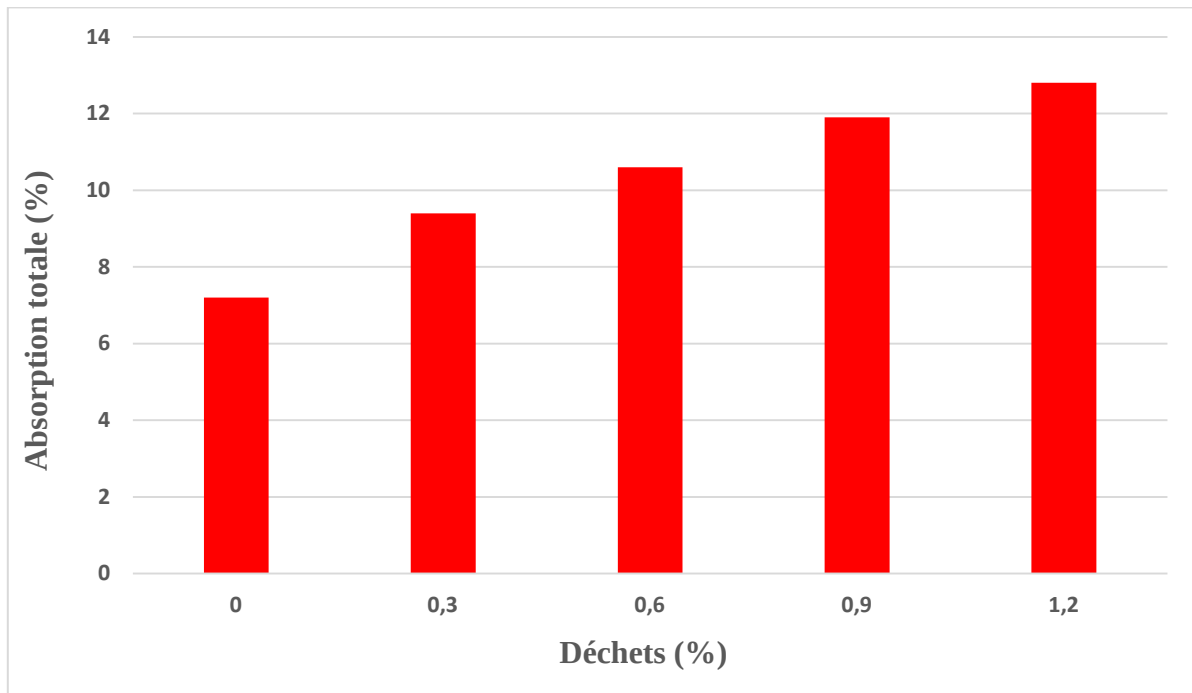


Figure 3.7 : Absorption total d'ABAD.

3.4.3 Gonflement

Les courbes illustrées à la Figure 3.8 représentent la variation du gonflement des briques d'adobe immergées dans l'eau pendant 4 jours en fonction de la teneur en déchets de palmiers dattiers. A travers cette figure, on voit que le gonflement des briques augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets. Le gonflement de l'ensemble des briques soumises à l'essai est compris entre 0.5 % à 1.4 %. Les valeurs du gonflement des briques sont de 0.5 %, 0.8 %, 1 %, 1.25 % et 1.4 %, pour des teneurs en déchets respectivement de : 0%, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % et 1.2 %.

L'augmentation maximale du gonflement enregistré dans cette étude est de l'ordre de 180 % est due à la fois à l'effet de l'eau sur les propriétés physico-chimiques de la matrice et les

variations dimensionnelles des déchets de palmier dattier suite à l'absorption d'eau due à son caractère hydrophile produisant une pression sur les particules de la matrice, ce qui modifie sa microstructure, après séchage, les déchets perdent l'eau absorbée, ce qui se traduit par une réduction de leurs volumes conduits à la formation d'un réseau poreux plus important tout au tour des déchets affectant défavorablement l'adhérence déchets/matrice. Ces résultats sont confirmés par Taalah et al, Kerali et al, Ghavami et al [53, 92].

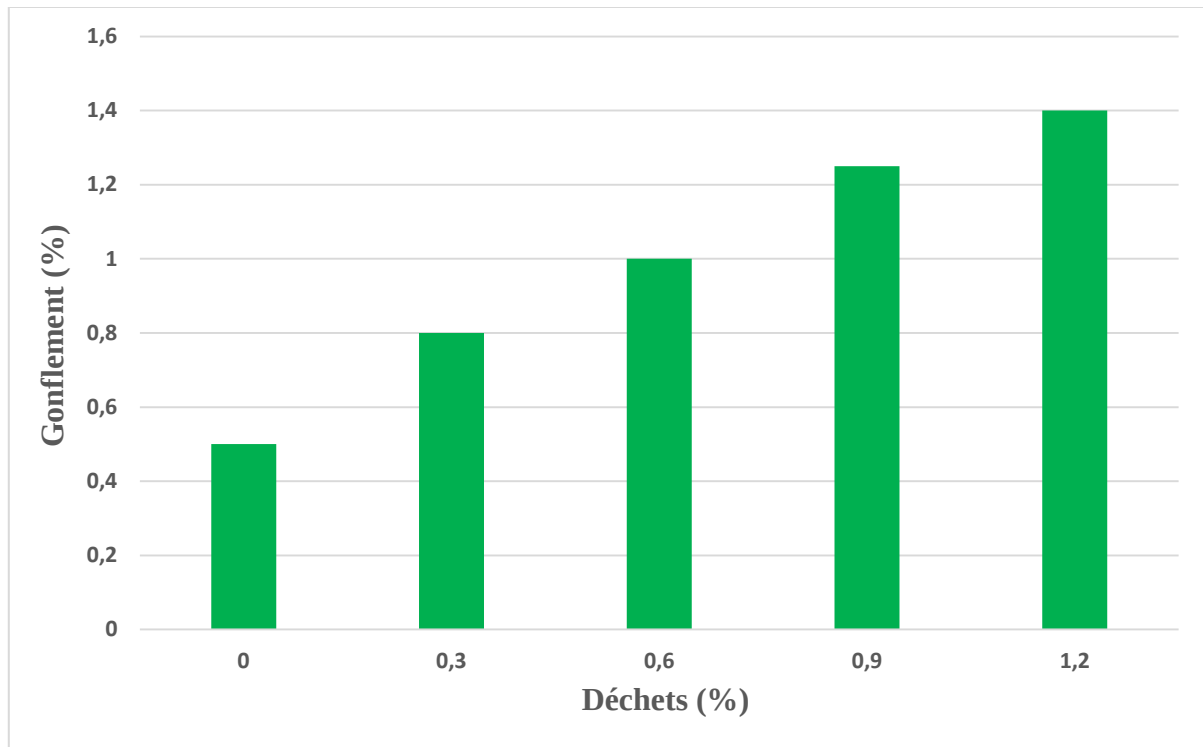


Figure 3.8 : Gonflement d'ABAD.

3.4.4 Résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion exprime la capacité d'un matériau à résister à une force abrasive. Dans cet essai, les forces aux points de contact ont tendance à séparer les particules de l'échantillon, ces particules agissent comme des matériaux abrasifs qui provoquent une perte progressive de matière, cette essai permet de simuler l'effet des conditions climatiques dans les régions arides comme le vent. La Figure 3.9 indique que la résistance à l'abrasion de l'ensemble des briques soumises à l'essai est comprise entre 7.4 à 14.2 cm^2/g . Les valeurs la résistance à l'abrasion des briques sont de 7.4, 8.9, 10.2, 12.5 et 14.2 cm^2/g , pour des teneurs en déchets respectivement de : 0 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % et 1.2 %. L'augmentation maximale de la résistance à l'abrasion enregistrée dans cette étude est de l'ordre de 91.9 %. Le coefficient d'abrasion (Ca) des briques testées a été trouvé au-dessus de la valeur

recommandée de $5 \text{ cm}^2/\text{g}$ selon NF XP 13-901 [94]. Les résultats obtenus ont confirmé l'effet positif de l'ajout de déchets de palmiers dattiers sur la résistance à l'abrasion, la résistance à l'abrasion augmente à mesure que la teneur en déchets du palmier dattier augmente en raison de la présence d'une forte liaison entre les déchets de palmier dattier et la matrice. En effet, il a été révélé que plus le coefficient d'abrasion est élevé, meilleur est la durabilité de la brique

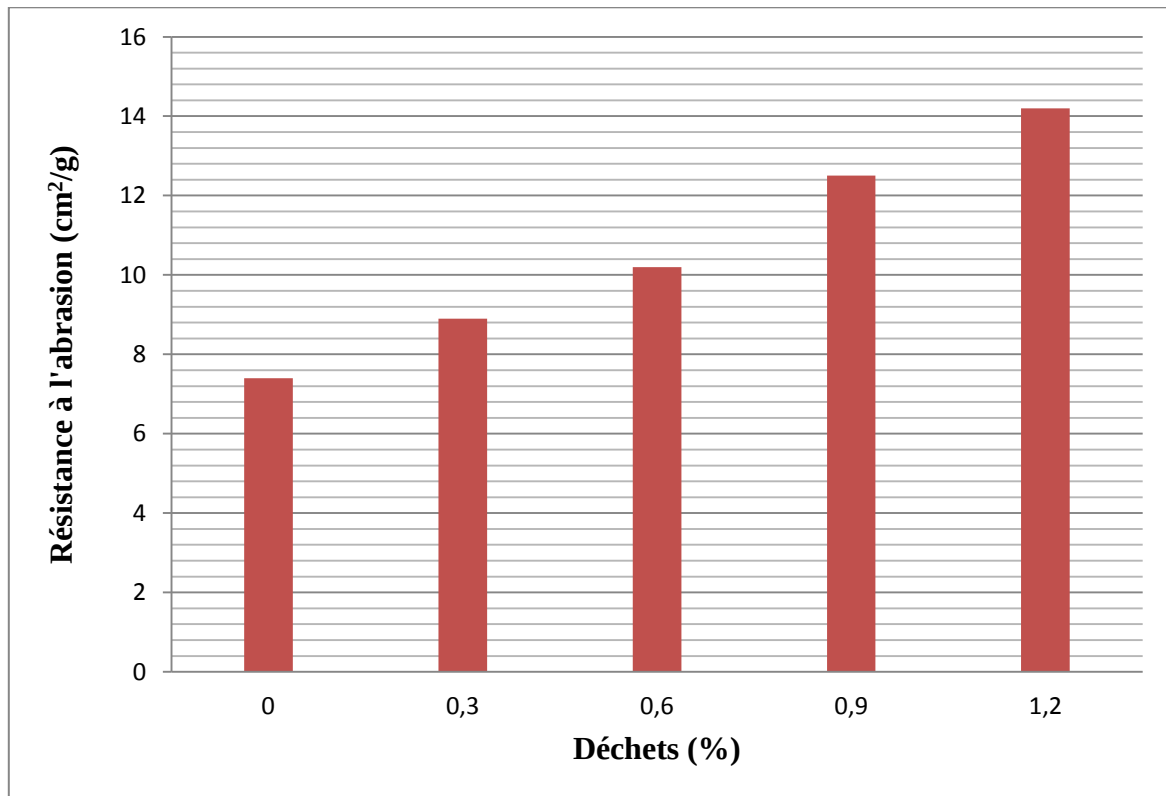


Figure 3.9 : Résistance à l'abrasion d'ABAD.

3.4.5 Résistance à l'érosion

L'essai de la résistance à l'érosion illustre l'érosion des briques d'adobe sous l'action des gouttelettes d'eau en essayant de simuler les gouttelettes de pluie. La Figure 3.10 montre la profondeur d'érosion des briques d'adobe, d'après cette figure, la résistance à l'érosion de l'ensemble des briques soumises à l'essai est comprise entre 4 mm à 1.7 mm. Les valeurs de la résistance à l'érosion des briques sont de 4, 3, 2.5, 2, 1.7 mm, pour des teneurs en déchets respectivement de 0 %, 0.3 %, 0.6 %, 0.9 % et 1.2 %. L'augmentation maximale de la résistance à l'érosion enregistrée dans cette étude est de l'ordre de 135 %, ce qui correspond à un indice d'érosion égale à 2 selon NZS 4298 [78]. Sachant que plus la profondeur d'érosion est grande, plus la résistance à l'érosion du matériau est faible. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de déchets de palmier dattier à la composition des briques augmente sa résistance à

l'érosion et lui permet de satisfaire à la norme NZS 4298 [78]. En outre, il a été révélé que l'augmentation des pourcentages de déchets de palmiers dattier permet d'augmenter la résistance et la durabilité des briques, qui peut être attribuée à la forte adhérence déchets/matrice qui en résultent et qui maintient les particules de la matrice ensemble plus fermement que dans le cas des briques non renforcées. Les observations visuelles effectuées au cours des essais ont permis de conclure que la forte adhérence entre les déchets de palmiers dattiers et la matrice était certainement due à la bonne performance de l'ensemble déchets/matrice qui empêchaient la pénétration de l'eau dans les briques.

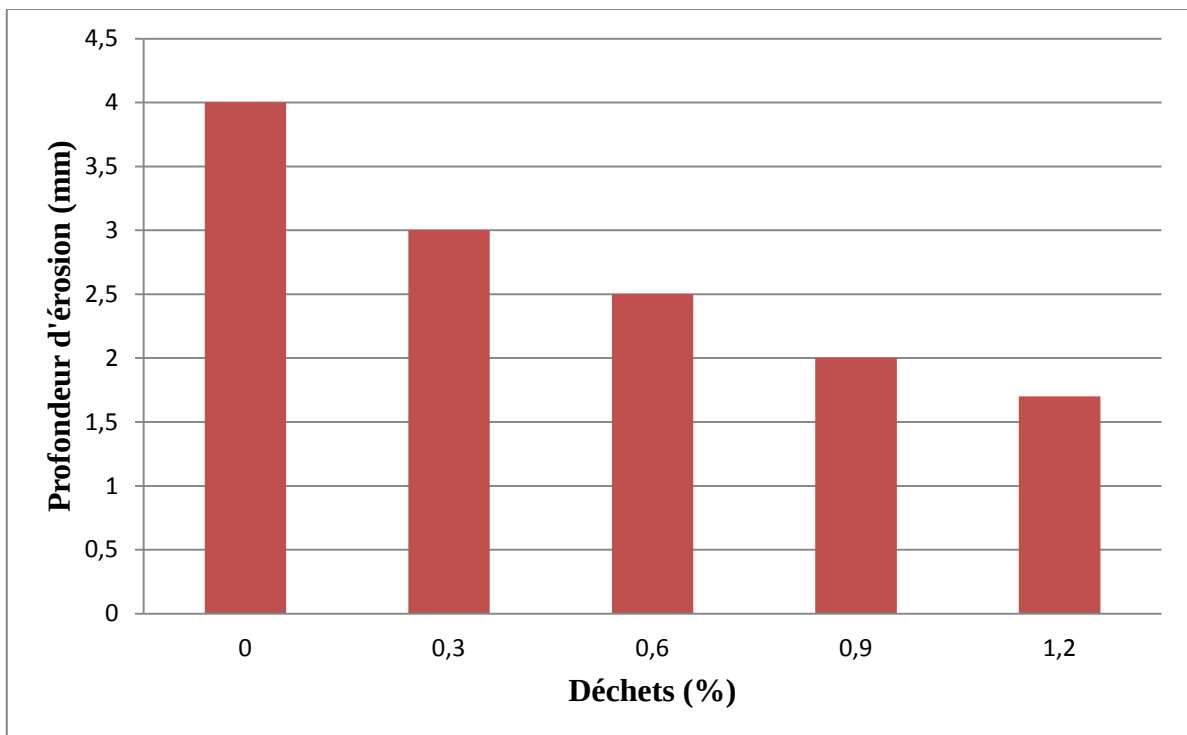


Figure 3.10 : Résistance à l'érosion d'ABAD.

3.4.6 Séchage/mouillage

Presque toutes les briques de terre renforcée ou non absorbent l'eau lorsqu'elles sont entièrement immergées dans l'eau, elles subissent au retrait et se fissurent également pendant le séchage dû à l'évaporation. Dans ce contexte, Fitzmaurice [79], a recommandé des limites sévères pour la perte de poids selon la norme ASTM D559 [99] pour les bâtiments situés dans les zones urbaines : 5 % dans les régions où précipitations annuelles < 500 mm et 10 % dans les régions où les précipitations annuelles > 500 mm. Les résultats illustrés sur la figure 3.11 présente l'influence du dosage en déchets sur les pertes en poids après douze cycles de séchage/ mouillage des briques d'adobe. Les résultats obtenus montrent l'effet favorable des

déchets sur la perte en poids. Les valeurs de l'essai sont de 2.5, 2.1, 1.9, 1.75 et 1.6 %, pour des teneurs en déchets respectivement de 0, 0.3, 0.6, 0.9 et 1.2 %. La diminution maximale de la perte en poids enregistrée dans cette étude est de l'ordre de 56.25 %.

On constate que toutes les valeurs des pertes en poids sont inférieures à la limite de 5% respectaient le critère de durabilité, sachant que pour la région de Biskra, sa pluviométrie annuelle ne dépasse pas 500 mm selon le centre de recherche scientifique et technique des régions arides (CRSTRA) [23]. Il s'est avéré que l'ajout de déchets de palmier dattier diminuait considérablement la perte de poids et améliorait la durabilité des briques et la perte de poids ne dépassait pas 5 % pour toutes les briques d'adobe. Cela signifie que ces briques pourraient être utilisées comme matériau de construction dans les régions humides où les précipitations annuelles sont supérieures à 500 mm.

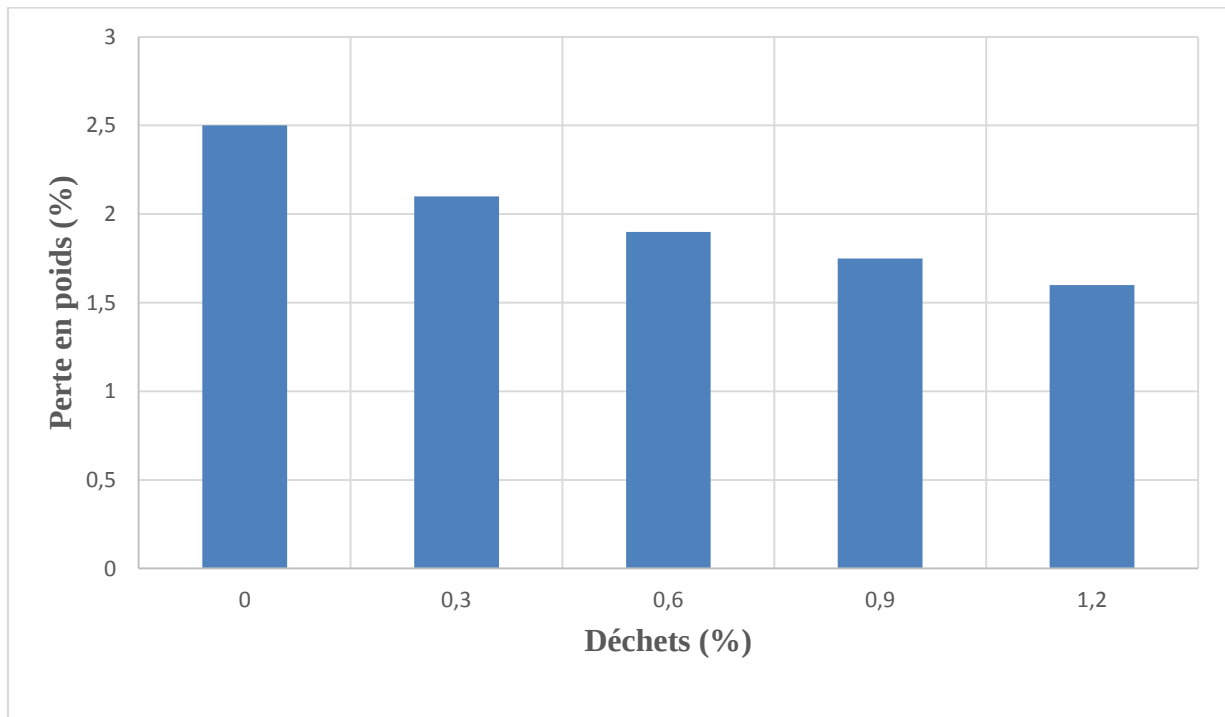


Figure 3.11 : Séchage/Mouillage d'ABAD.

3.4.7 Attaque sulfurique externe

Il est largement reconnu que les matériaux en terre peuvent être gravement endommagés par des attaques externes de sulfate en raison de la pénétration des ions sulfates provenant de l'environnement extérieur. Ce processus entraîne une plus grande porosité, une perte de cohésion, une expansion locale, l'écaillage et la fissuration. Un essai a été réalisé en vue d'étudier la capacité d'absorption capillaire des briques d'adobe renforcés par différents

pourcentages des déchets de palmier dattier (de 0 à 1.2 %) et exposés à une attaque de sulfate; la concentration des ions sulfate sur les briques d'adobe a également été déterminée. Il a été établi que la concentration de sulfate peut être naturelle et varie de 0.015 à 1 % sur les plans d'eau, de 0.0003 à 2 % sur les eaux souterraines et est approximativement égale à 0.26 % sur l'eau de mer. À ces concentrations, la rupture des matériaux d'essai peut survenir plusieurs années plus tard [100]. Par conséquent, les concentrations de 5%, 10% et 15% ont été sélectionnées pour les essais afin d'accélérer le processus de dégradation (procédure 1). Selon la Figure 3.12 une diminution de l'absorption d'eau des briques s'est produite à mesure que la teneur en déchets de palmier dattier augmente en présence de solution de sulfate de sodium. La diminution maximale de l'absorption d'eau des briques est de 33.33, 39.58 et 43.4 % pour 5, 10 et 15 % de concentration de sulfate de sodium (Na_2SO_4). De plus, on a observé une augmentation de l'absorption d'eau pour les concentrations de 10 et 15 % par rapport à 5 % de concentration de (Na_2SO_4) de 14.29 et 26.19 % pour 1.2% de déchets. L'augmentation générale de la capacité d'absorption d'eau a provoqué des dommages plus importants sur les échantillons renforcés par des déchets de palmier dattier, comme le montre la Figure 3.12. Du point de vue physique et chimique, il y a eu plus de précipitation et de cristallisation des sulfates dans les micropores, cela a évidemment généré une pression plus élevée qui a entraîné la microfissuration et la lixiviation du matériau, ce qui a entraîné une faible cohésion et une perte de granulats [101]. En outre, les résultats obtenus indiquent que l'incorporation des déchets de palmier dattier a contribué à améliorer de manière significative la résistance des adobes aux attaques de sulfates, en raison de leur performance anti fissure améliorée et de la survenue d'un certain nombre de réactions chimiques dans le matériau. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés précédemment par Ozerkan et al [102].

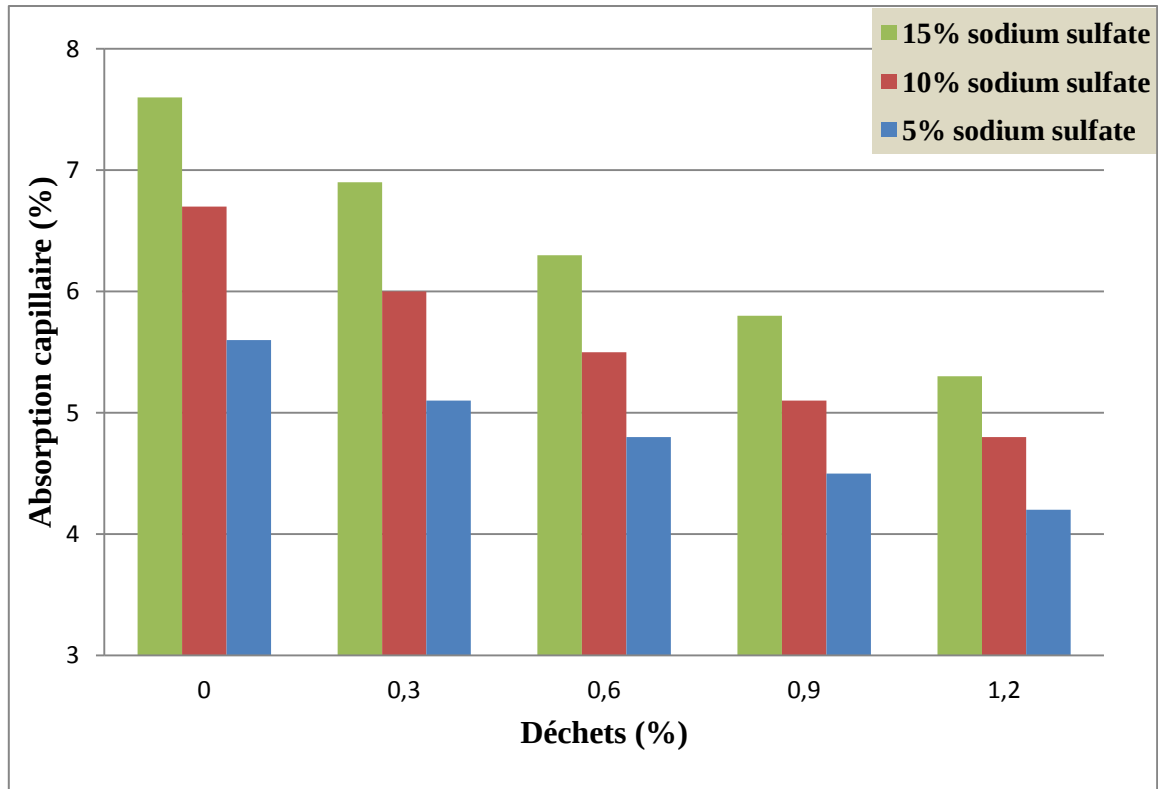


Figure 3.12 : Attaque en sulfate d'ABAD.



Figure 3.13 : Attaque sulfatique externe d'ABAD, de gauche à droite 5, 10, 15% de concentration de sodium de sulfate

3.5 Effet de traitement des déchets de palmiers dattiers sur la durabilité d'adobe

Pour étudier l'influence des déchets de palmiers dattier traités par différents agents hydrofuges sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe, les échantillons ont été préparés comme indiqué dans le tableau 2.11 et soumis à un étuvage pendant 9 jours à 65 °C.

3.5.1 Les propriétés mécaniques des briques d'adobe

3.5.1.1 Résistance à la compression sèche

La résistance à la compression des briques d'adobe a été déterminée sur des éprouvettes cubiques de dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$, en utilisant différents pourcentages de déchets de palmiers dattiers non traités et traités (0.3%, 0.6%, 0.9%, et 1.2%), ces briques présentent un comportement de résistance presque parallèle, une augmentation de la quantité des déchets a entraîné une diminution de la résistance à la compression mais dans tous les cas la valeur minimale recommandée n'est pas dépassée, cette résistance convient à de nombreux usages du bâtiment comme la construction portante. La variation de la résistance à la compression des briques d'adobe contenant des déchets non traités et traités est illustrée à la Figure 3.14. On peut constater dans cette figure que l'augmentation de la teneur en déchets non traités et traités entraîne une diminution de la résistance à la compression sèche (RCS) pour tous les échantillons. Il convient de mentionner que les valeurs de RCS des adobes renforcés avec les déchets traités sont légèrement supérieures à celles des adobes remplis de déchets non traités mais il y a une diminution des valeurs de résistance par rapport à celles des adobes sans déchets. Ainsi le mode de rupture des briques sans déchets était toujours soudain et très rapide tandis que celui des briques avec déchets était plus ductile et graduel, cela signifie que les déchets affectent le comportement fragile des briques d'adobe. La diminution de la résistance à la compression maximale (par rapport à ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF est de 35.24%, 43.53 %, 41.86 %, 40.23 %, 37.08 %, et 35.56 % successivement, et la RCS varie de 6.1 MPa à 4.2 MPa. Ceci est attribué à la faible adhérence déchets/matrice, ce qui affaiblit les briques et diminue sa résistance à la compression, une autre cause possible de la diminution de la RCS avec l'augmentation de la teneur en déchets est l'augmentation des vides dans les briques. Morel et al [103] observé que l'augmentation de la teneur en vides dans la matrice affaiblit la résistance. Par conséquent, il y a une augmentation des valeurs de la RCS des briques (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 1.19%, 2.38 %, 3.57 %, 5.95 %, et 7.14 % successivement pour 1.2 % de la teneur en déchets, Il est notable de la figure 3.14 que la résistance a la RCS la plus élevée des briques d'adobe est obtenue avec l'incorporation de Flintkote suite a leur degré élevé d'imperméabilité a l'eau qui permet de lutter contre l'humidité . L'amélioration de la rugosité de surface des déchets de palmiers dattiers lors de l'application des produit de traitement est attribuée à couvrir des impuretés (certaines quantités d'hémicelluloses, de lignine et de toutes les substances résiduelles) à la surface, après cette élimination il est censé avoir plus de

molécules de cellulose exposées à la surface améliorant l'adhésion des déchets à la matrice et créant un réseau de déchets qui aident à réduire la taille des fissures de retrait, la rugosité de la surface a également augmenté et amélioré les propriétés mécaniques et l'adhérence.

Dans un examen des traitements chimiques des fibres naturelles, Kabir et ses collègues [104] ont convenu que le traitement est un facteur important qui doit être pris en compte lors du traitement des fibres naturelles., ils ont observé que les fibres des groupes hydroxyles sont lâches en raison de différents traitements chimiques réduisant le comportement hydrophile des fibres et provoquant l'amélioration de la résistance mécanique ainsi que la stabilité dimensionnelle des composites polymères renforcés par fibres naturelles, leur conclusion générale était que le traitement chimique des fibres naturelles entraîne une amélioration remarquable des composites. En conclusion, toutes les briques étudiées, avec ou sans traitement des déchets ont été jugées adaptées aux constructions d'adobe et les meilleurs résultats des traitements sont donnés par flintkote, vernis, chaux, résine et d' eau successivement, bien que les briques sans déchets aient présenté les valeurs de résistance à la compression les plus élevées, comme le montre la Figure 3.14.

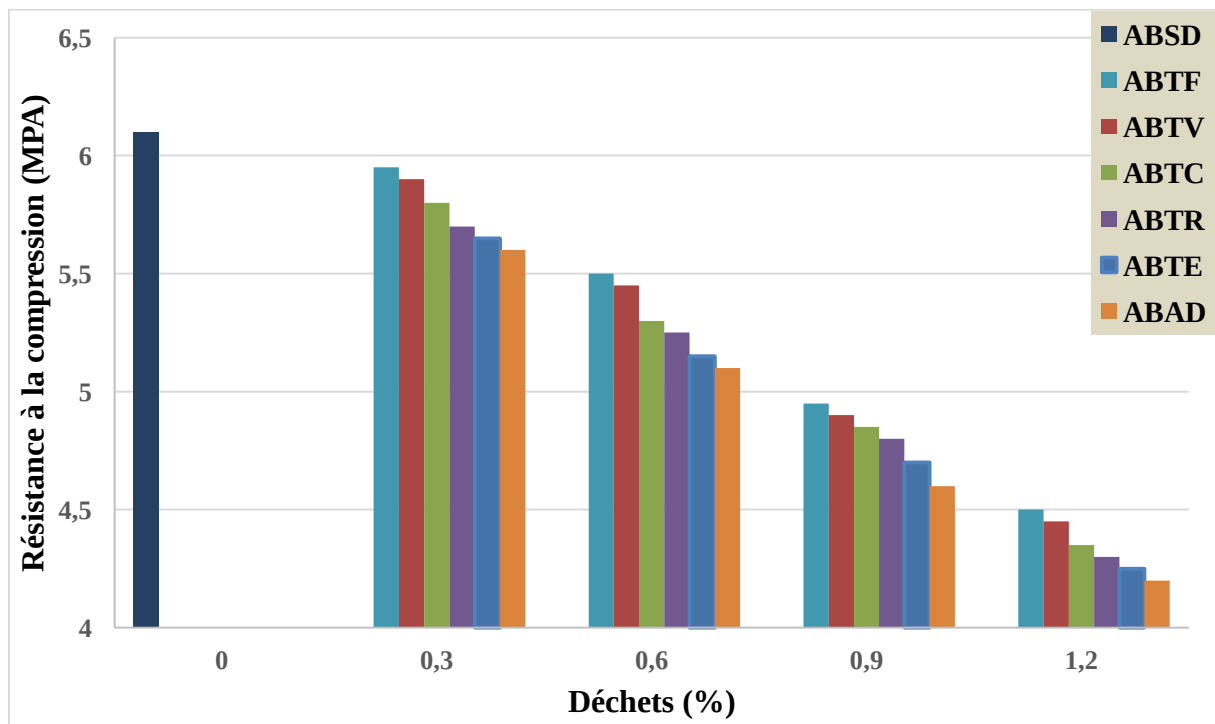


Figure 3.14 : Résistance à la compression des briques d'adobe.

3.5.1.2 Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion (RTF) a été déterminée sur des briques prismatiques de $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ ayant des teneurs différentes (0.3%, 0.6%, 0.9%, et 1.2%) de déchets de palmiers dattier traités et non traités. La variation de la RTF des adobes renforcée par déchets non traité et traité est illustrée à la Figure 3.15, on peut voir dans cette figure que l'augmentation de la quantité de déchets est accompagnée d'une augmentation générale de la RTF, les résultats montrent que les briques renforcées avec déchets de palmier dattier traité par Flintkote ont la meilleure RTF par rapport aux autres déchets traités. L'augmentation de la RTF maximale (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF est de 83.33 %, 86.67 %, 93.33 %, 100 %, 111.11 % et 116.67 % successivement, la résistance est variée de 0.9 MPa à 1.95 MPa. Par conséquent, il y a une augmentation des valeurs de résistance (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 1.82 %, 5.46 %, 9.1 %, 15.15 %, et 18.18 % successivement, pour 1.2 % de teneur de déchets. Il convient de mentionner que la résistance à la flexion minimale moyenne des matériaux de maçonnerie en terre dans le Code des matériaux de construction en terre de l'État du Nouveau-Mexique [105] est de 0,35 MPa. La norme NZS 4298 [78] exige qu'une résistance à la flexion supérieure à 0,25 MPa soit atteinte pour tout matériau de construction en terre. Selon la Figure 3.15, la performance des briques avec des déchets traités a montré une RTF plus élevée que ceux sans traitement. Les ABTF ont montré la meilleure performance parmi les autres déchets traités, ce qui est attribué à l'interaction déchets/matrice et à la liaison résultante entre la matrice et les déchets ajoutés, une nouvelle liaison introduite dans les échantillons renforcés est responsable de la transmission des contraintes dans la matrice, c'est ce qu'on appelle le mécanisme de pontage des fibres dans le composite, qui lie plus solidement les grains de la matrice contrairement aux briques non renforcées, ce phénomène est responsable de l'augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en déchets parce que les déchets fonctionnent d'abord en augmentant la liaison entre les particules à la fois par frottement sur les déchets et les liants avec des boucles, les déchets ont une plus grande résistance à la traction que la matrice, donc une plus grande cohésion et une plus grande résistance, la principale contribution des déchets est d'améliorer la rugosité et les performances des briques après la fissuration.

Selon Pejic et al [106], l'élimination des substances non cellulose du réseau cellulose-hémicellulose-lignine pour la séparation des fibrilles de cellulose est connu pour améliorer la résistance à la traction des fibres ligno-cellulosiques naturelles, et cela est en accord avec les

résultats de Bateni et al [107], qui dit après le traitement, la force et les modules d'élasticité des fibres sont devenus meilleurs que ce qu'ils étaient dans le passé. Après la fin d'essai de la RTF, il est devenu évident que, bien que les briques aient été divisées en deux, les deux parties étaient toujours maintenues ensemble par les déchets, ce qui indique que les briques se rompent lentement plutôt que soudainement et qu'ils maintiendront toujours une charge quelque temps après la rupture, on a observé que la rupture des briques non renforcées était soudaine et ne produisait qu'une seule grande fissure, alors que la rupture des briques renforcées contenant des déchets était accompagnée de multiples fissures plus fines, ce qui signifie que la rupture était plus graduelle, agissant plus comme un matériau ductile qu'un matériau fragile, qui est bien d'accord avec les conclusions de Danso et al, Bouhicha et al [62, 108]

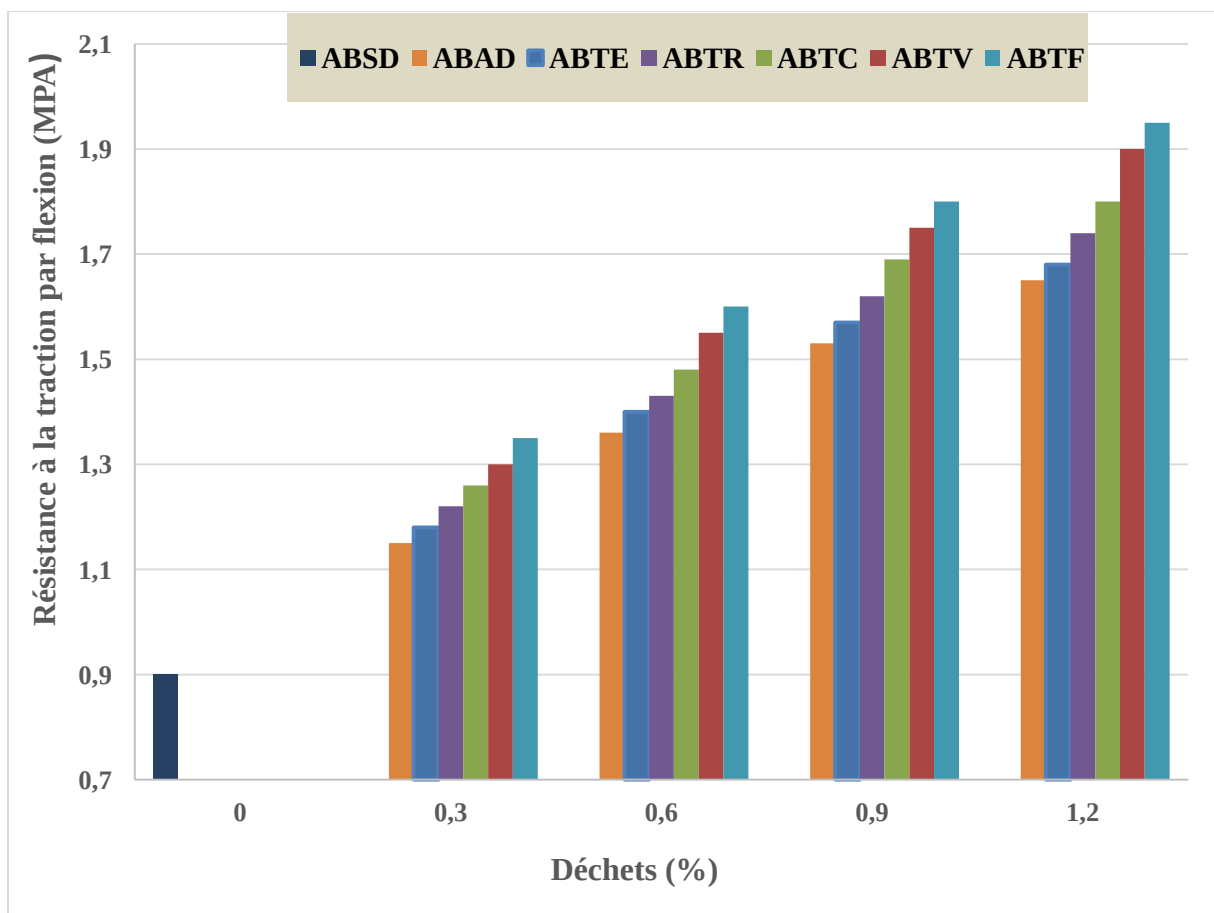


Figure 3.15 : Résistance à la traction par flexion des briques d'adobe.

3.5.2 La durabilité des briques d'adobe

3.5.2.1 Absorption capillaire

Les courbes illustrées à la Figure 3.16 illustrent la variation du coefficient d'absorption d'eau C_b des briques d'adobe en fonction du teneur en déchets de palmier dattier non traités et traités. On peut voir sur cette figure que l'ajout de déchets non traités et traités augmente l'absorption capillaire des briques, il convient de mentionner que les valeurs d'absorption des adobes remplis de déchets traités sont légèrement inférieures à celles des adobes remplis de déchets non traités. L'augmentation de la capacité d'absorption (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF est de 61.9 %, 54.76 %, 50 %, 45.24 %, 36.9 % et 33.33 % successivement pour une teneur en déchets de 1.2 %, et l'absorption des briques variée de 4.2 % à 6.8 %. Par conséquent, on observe une diminution des valeurs d'absorption d'eau (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 4.62 %, 7.94 %, 11.48 %, 18.26 % et 21.43 % successivement, pour une teneur en déchets de 1.2 %. On remarque pour toutes les briques testées que le coefficient d'absorption d'eau est inférieur à 20% par conséquent les briques sont classées comme faibles capillaires selon les seuils définis dans la norme NF XP 13-901 [94]. Ces résultats sont similaires avec les résultats de l'étude de Ismail et al [96] qui a également enregistré une augmentation de l'absorption d'eau des briques de latérite avec une augmentation de la teneur en fibres de fruits vides de palmier à huile.

La nature absorbante des déchets crée une voie à travers les briques d'adobe, permettant ainsi d'absorber plus d'eau par les briques [92]. L'absorption d'eau des briques renforcées par les déchets traités a diminué considérablement par rapport aux briques renforcées avec les déchets non traités ce qui indique que les briques traitées sont devenues plus hydrophobes, cette diminution de la capacité d'absorption d'eau des briques traitées peut s'expliquer par la surface inférieure des déchets qui sont exposés aux molécules d'eau et peut être due à une augmentation de la rigidité de la cellulose induite par l'élimination des composants non cellulosiques. Il est évident que les déchets enrobés de différents agents présentent une meilleure réduction de l'absorption d'eau par rapport aux déchets non traités.

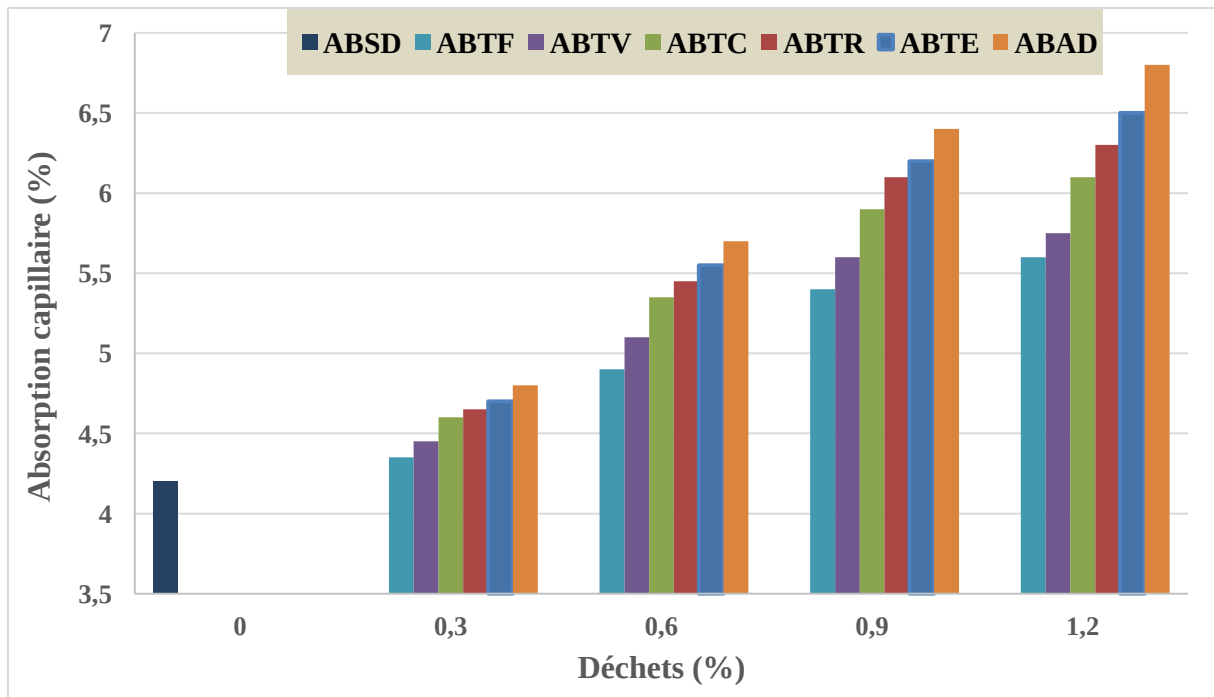


Figure 3.16 : Absorption capillaire des briques d'adobes.

3.5.2.2 Absorption totale

La Figure 3.17 illustre la variation de l'absorption totale d'eau (ATE) des briques en fonction de la quantité des déchets de palmier dattier non traités et traités. Les résultats présentés à cette figure montrent l'augmentation de la capacité totale d'absorption d'eau (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF est de 77.78 %, 73.61 %, 66.67 %, 54.16 %, 38.89 % et 31.94 % pour une teneur en déchets de 1.2 %, et l'absorption variée de 7.2% à 12.8%. D'après la documentation, la valeur maximale d'absorption d'eau recommandée pour les briques appropriées est inférieure à 15 % selon BRU-B2, BIS 1725 [98,109]. Par conséquent, il y a une diminution des valeurs de capacité d'absorption d'eau des briques (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 2.4 %, 6.67 %, 15.32 %, 28 %, et 34.74 %, pour une teneur en déchets de 1.2 %. On observe dans la Figure 3.17 que les briques sans déchets se caractérisent par une absorption totale inférieure à celle des briques remplies par les déchets non traités et traités pendant toute la période d'immersion dans l'eau et pour toute les teneurs utilisées. Les résultats montrent que l'ajout de déchets dans les mélanges augmente légèrement l'absorption totale d'eau, ce qui signifie qu'il y a plus d'infiltration d'eau dans les échantillons, ce qui est attribué à la capacité d'absorption d'eau par les déchets. La réduction de la capacité totale d'absorption d'eau (ATE) d'une brique a souvent été considérée comme l'un des moyens

d'améliorer sa qualité et sa durabilité. Le traitement des déchets a permis de réduire l'absorption d'eau et de diminuer le potentiel de biodégradation des déchets en contact avec la matrice, avec le revêtement, la surface et l'adhérence entre les déchets et les particules de la matrice augmentée par les déchets traités due à la pectine, à l'hémicellulose et à la lignine, qui ont été enlevées par le traitement. Après le traitement, les déchets ont été plus rugueux et rainurés, ce qui explique la meilleure adhérence à la matrice et la réduction de l'absorption d'eau [110]

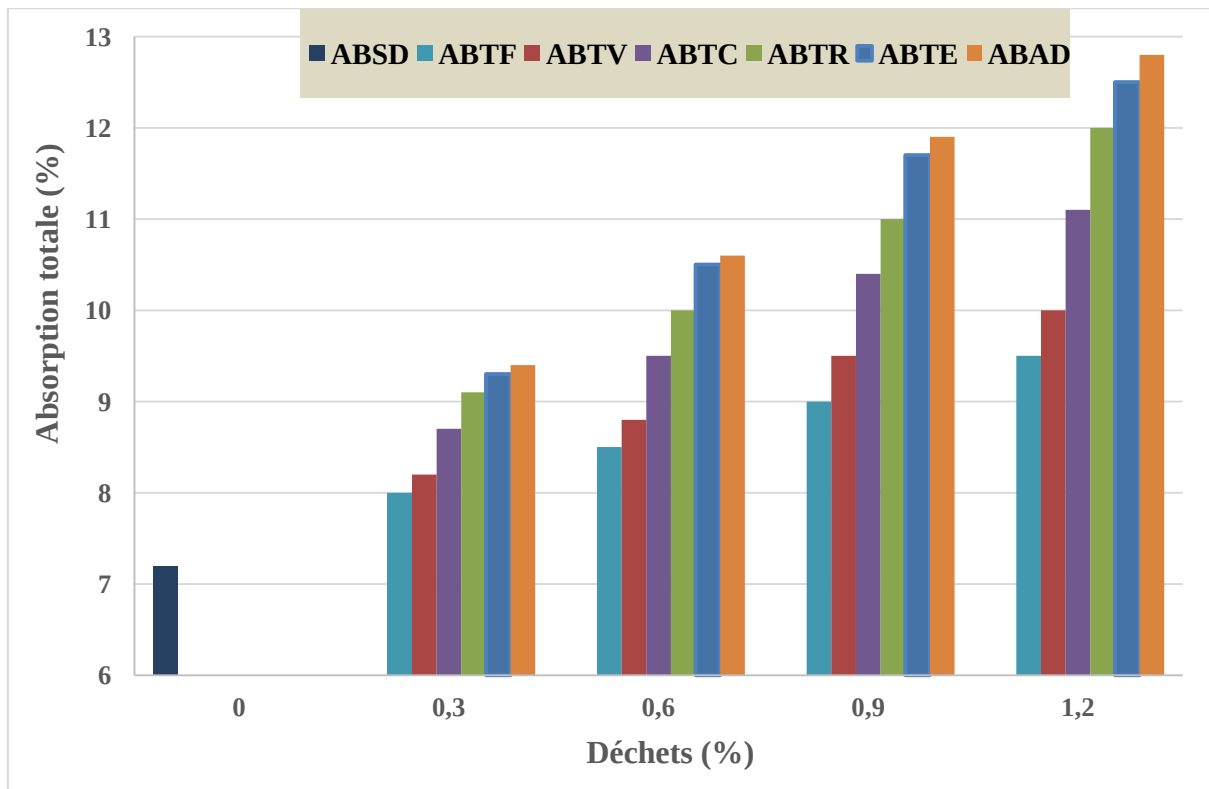


Figure 3.17 : Absorption total des briques d'adobe.

3.5.2.3 Gonflement

Les courbes illustrées à la Figure 3.18 représentent la variation du gonflement des briques d'adobe immergées dans l'eau en fonction des différentes teneurs en déchets de palmier dattier non traité et traité. Les résultats présentés à la Figure 3.18 montrent qu'il y a une augmentation du gonflement (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 180 %, 170 %, 160 %, 130 %, 80 % et 60 % pour une teneur en déchets de 1.2 %, le gonflement est varié de 0.5 % à 1.4 %. Par conséquent, il y a une diminution des valeurs de gonflement des briques (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF avec 3.7 %, 7.69 %, 21.74 %, 55.56 % et 75 %, pour 1.2 %

de teneur en déchets. Les valeurs les plus faibles de gonflement pour les briques renforcées est ABTF, tandis que les valeurs les plus élevées correspondent à ABAD, donc ces briques peuvent absorber l'eau plus rapidement que les autres briques dont les déchets de palmier sont incorporés. La structure des déchets se compose de (cellulose, hémicelluloses, lignine, pectine et cire) et permet d'absorption l'humidité de l'environnement qui provoque la faibles liaisons entre les déchets et la matrice, le traitement agissant comme agents adhésifs pour augmenter l'interaction de la matrice avec les déchets, ce qui est conforme avec l'étude de Ghavami et al [92] qui a révélé que l'introduction de l'émulsion de bitume a réduit considérablement l'absorption d'eau et la durabilité des fibres étudiées.

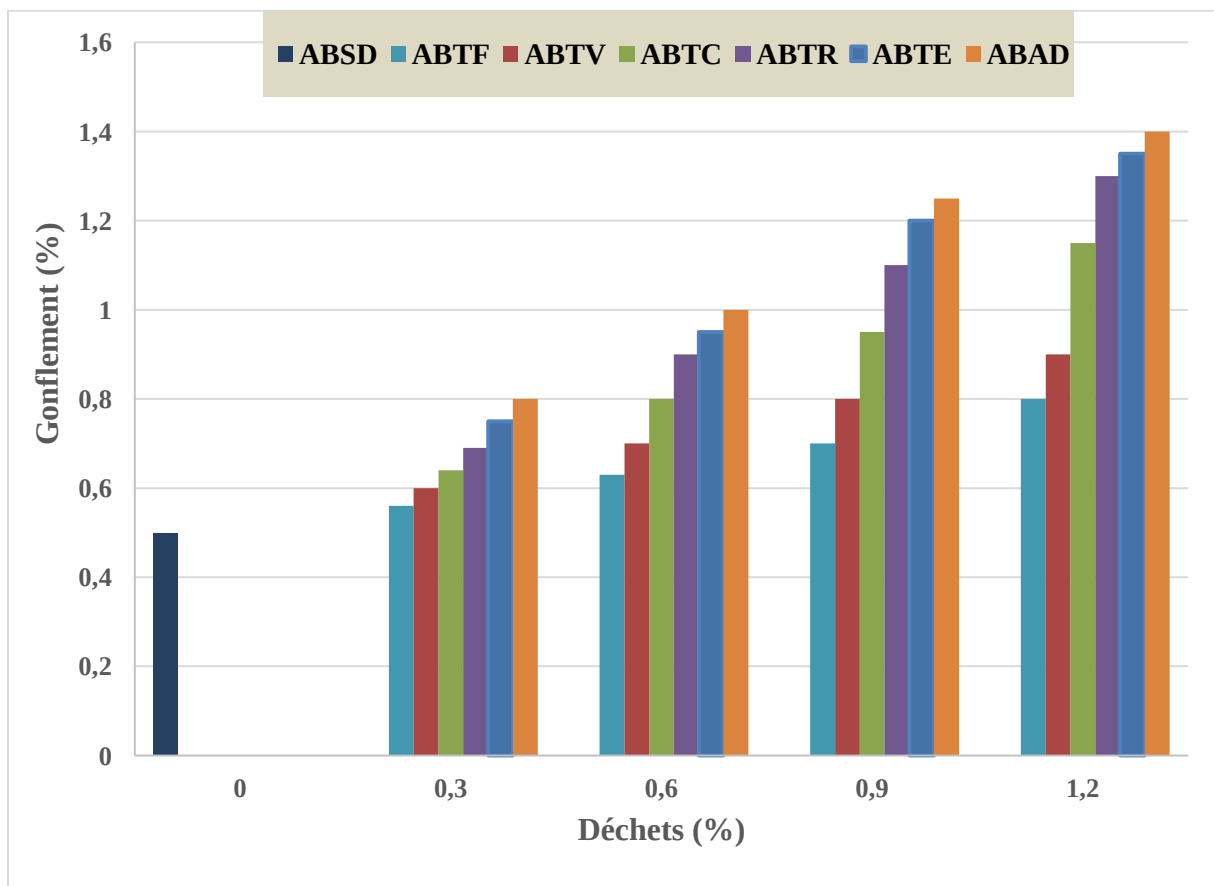


Figure 3.18 : Gonflement des briques d'adobe.

3.5.2.4 Résistance à l'abrasion

Cet essai consiste à soumettre les briques d'adobe à une érosion mécanique appliquée par frottement de la brosse métallique à une pression constante avec un certain nombre de cycles après la période de cure des briques, l'essai de résistance à l'abrasion illustre l'érosion des briques sous l'action abrasive du vent. Les résultats illustrés à la Figure 3.19 mettent en

évidence l'effet positif de l'addition des différentes teneurs en déchets non traités et traités a la résistance à l'abrasion, l'augmentation de la quantité de déchets est accompagnée par une augmentation générale de la résistance à l'abrasion, l'augmentation de la résistance à l'abrasion (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF est de 91.89 %, 97.3 %, 102.7 %, 108.11 %, 116.22 % et 123 % successivement pour une teneur en déchets de 1.2 %, est allant de 7.4 à 16.5 cm²/g. Par conséquent, il y a une augmentation des valeurs de résistance à l'abrasion des briques (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF de 2.82 %, 5.63 %, 8.45 %, 12.68 % et 16.2 % successivement, pour une teneur en déchets de 1.2 %. On peut voir que les ABTF présentent un degré élevé de rugosité de surface par rapport aux ABAD. Le coefficient d'abrasion (Ça) des briques était supérieur à la valeur recommandée de 5 cm²/g selon NF XP 13-901 [94]. On remarque que la propagation des fissures a été limitée par la présence de déchets, ce qui entraîne un effet de rapprochement avec la matrice et augmentait le frottement à l'interface entre les déchets et la matrice. En outre, l'interaction des déchets entre eux et la flexibilité des déchets les fait se comporter comme un maillage structurel qui maintient la matrice ensemble augmentant l'intégrité structurale des briques. Cela implique que l'incorporation des déchets dans la matrice a augmenté la résistance des briques et rend les briques plus durables. On a observé au cours des essais que les déchets contenus dans les briques protégeaient les particules de la matrice d'avoir été séparés, ce qui augmentait la durabilité des briques.

L'élimination des impuretés superficielles des matériaux non cellulosiques, des substances inorganiques, et des cires a permis d'obtenir des surfaces plus rugueuses et une meilleure séparation des déchets grâce à des traitements avec des produits d'imperméabilité qui ont conduit au développement de la surface plus rugueuse. Les études ahmad et al, Sarbaz et al [111, 112], ont montré que la durabilité et les propriétés mécaniques des composites de fibres naturelles sont améliorées lorsque les fibres sont enduites d'agents hydrofuges.

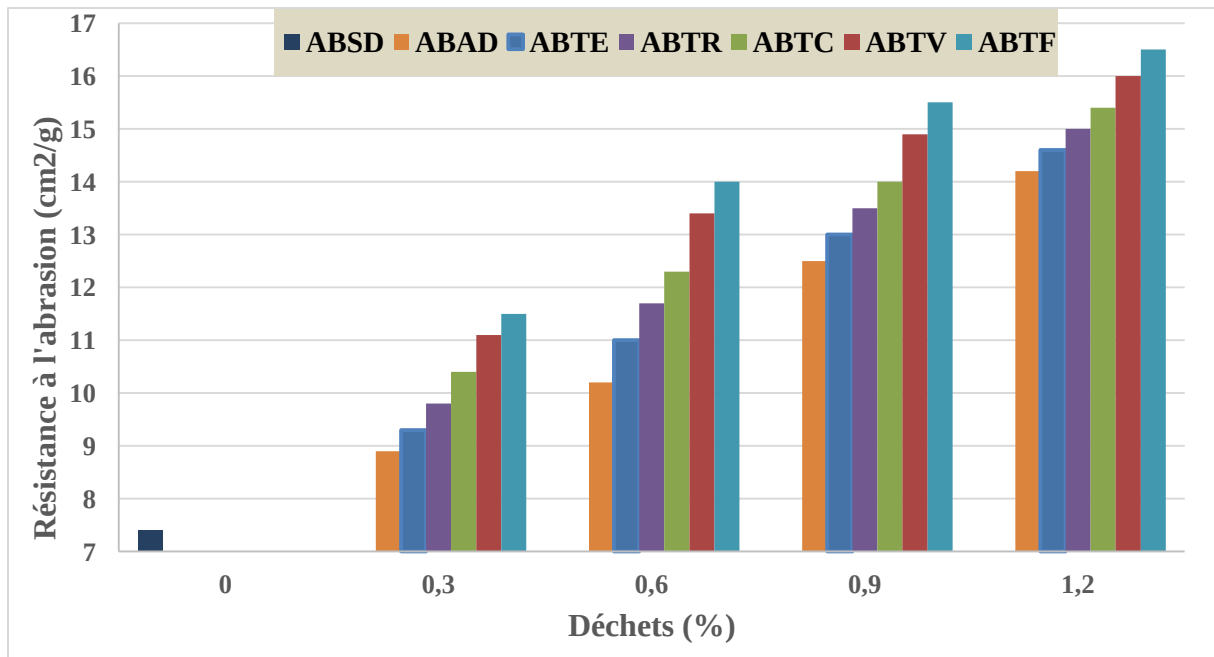


Figure 3.19 : Résistance à l'abrasion des briques d'adobe.

3.5.2.5 Séchage/mouillage

. Dans la présente étude 12 cycles de séchage et de mouillage ont été appliqués, chaque cycle consistait à mouiller les briques pendant 5 h en les immergeant dans de l'eau à température ambiante de 22 °C, puis en les faisant sécher au four à 60 °C pendant 42 h. Le but de cet essai était de déterminer la capacité des briques non renforcé et renforcé à résister à l'usure qui peut être causé par les utilisateurs, l'environnement et la météo. L'essai a été effectué conformément à la norme ASTM D559 [99], Freidin et al [113] établit les lignes principales pour la perte de poids maximale et suggère que la perte de poids soit inférieure à 5 % pour les bâtiments permanents et peut avoir une valeur supérieure de 10 % pour les bâtiments ruraux sous n'importe quel climat, en outre Kevin [114] a déclaré que la perte de poids est limitée à 10% pour les briques dans les régions avec des chutes de pluie annuelles inférieures à 500 mm. La Figure 3.20 montre que l'ajout de déchets non traités et traités a réduit la perte de poids et amélioré la durabilité des briques d'adobe, il convient de mentionner que les valeurs de perte de poids des adobes remplis de déchets traités sont légèrement inférieures à celui de briques sans déchets et les briques remplies de déchets non traités. Les valeurs de perte de poids (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF sont de 56.25 %, 66.67 %, 78.57 %, 100 %, 150 % et 177.78 % successivement pour une teneur en déchets de 1.2 %, et vont de 2.5 % à 0.9 % MPa. Par conséquent, il y a une diminution des valeurs de perte de poids des briques (par rapport aux ABAD) des ABTE, ABTR, ABTC,

ABTV, et ABTF avec 6.67 %, 14.29 %, 28 %, 60 % et 77.78 % successivement, pour 1.2 % de teneur de déchets, l'ajout des déchets traités par Flintkote diminuent considérablement la perte de poids pour environ 177.78 % par rapport aux déchets sans traitement. Toutes les briques sont satisfaites du critère de durabilité, on sait que la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 500 mm dans la région de Biskra (Algérie) et la perte de poids ne dépasse pas 5 %, donc pour toutes les briques renforcées par des déchets non traités et traités stabilisés avec la chaux on peut conclure qu'ont peut utilisés les briques d'adobe pour la construction de bâtiments dans les régions humides où les précipitations annuelles sont inférieures à 500 mm. Les briques d'adobe sont généralement affectées par les changements dimensionnels des déchets qui peuvent se produire en raison de changements d'humidité et de température [92]. Selon Ghavami et al, Hejazi et al [92, 115]. Les changements dans la dimension des déchets se produisent pendant le séchage de la matrice, ce qui peut entraîner une mauvaise liaison interfaciale, ce comportement des déchets dans la matrice peut affaiblir la liaison entre les déchets et la matrice. Avec les traitements, il est apparu que la réduction de la variation dimensionnelle était supérieure à l'absorption d'eau; le traitement a été appliqué pour éviter le développement de moisissures à l'intérieur de la matrice et ainsi éviter les dommages accélérés des briques.

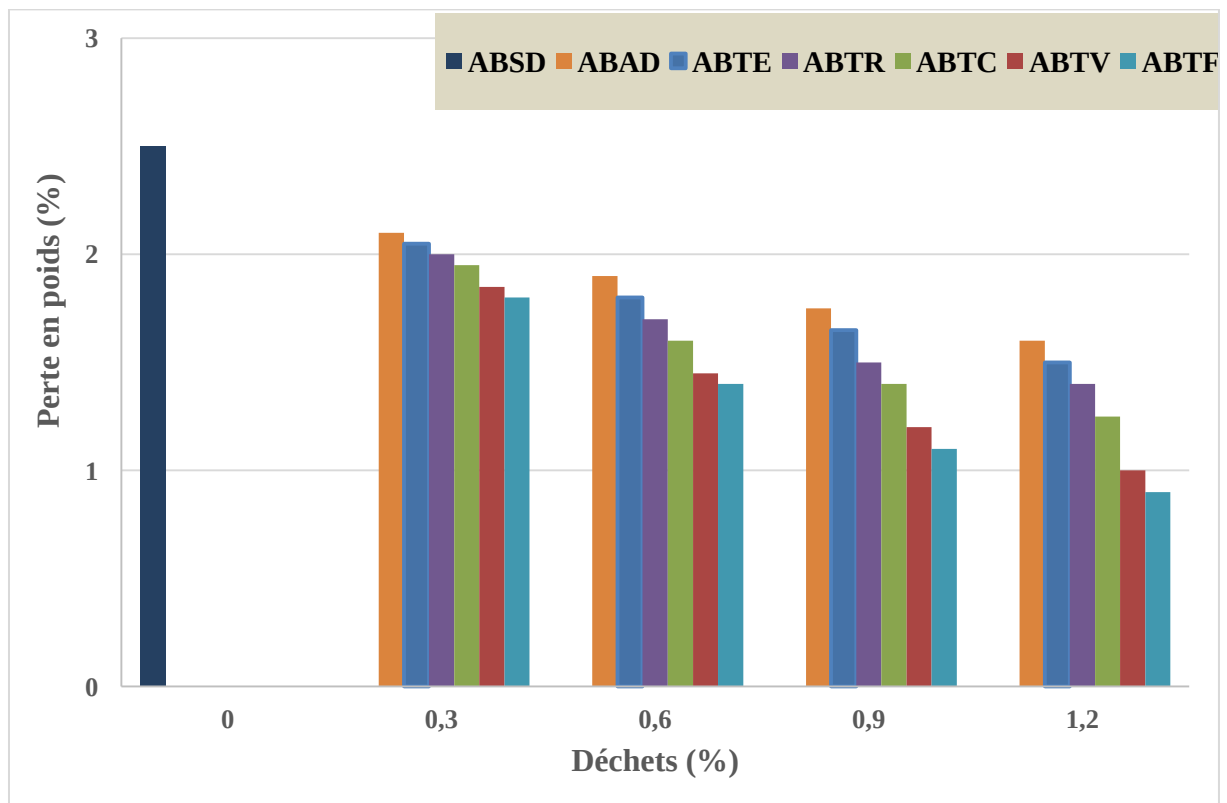


Figure 3.20 : Séchage/Mouillage des briques d'adobe.

3.5.2.6 Attaque sulfatique externe

La distribution de la perte de masse dans le temps (95 jours) est montrée dans la Figure 3.21. Cette figure montre que la perte de masse est de l'ordre de 8.2 % pour les ABSD et de 7.7 %, 7.5 %, 7 %, 6.6 %, 6 % et 5.8 % pour les ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, ABTF successivement, pour 1.2 % de teneur de déchets. En général, les briques exposées pendant de plus longues périodes aux phases d'absorption capillaire ont entraîné une perte de masse plus élevée. Cette procédure est arrêtée à 95 jours d'immersion dans la solution de sulfate parce qu'on observe que la perte de poids est presque stable et il n'y a pas de tendance à la rupture des briques. L'attaque en sulfate réduit la qualité et la résistance des briques, et permet de diminuer leur cohésion et, par conséquent, affecte sa solidité et sa durabilité, il semble probable que l'ettringite (sulfo-aluminate de calcium) avait été formé à la suite de cette réaction est également responsable de la perte de poids des briques. L'ettringite est le produit formé lorsque ions sulfatés attaquent les matériaux cimentaires; il occupe un volume supérieur à celui des réactifs provenant qu'il est formé et cela se traduit par l'expansion des matériaux. L'ajout de déchets non traités et traités a réduit la perte de poids et amélioré la durabilité des briques d'adobe, il convient de mentionner que les valeurs de perte en poids des adobes remplis de déchets traités sont légèrement inférieures à celui de briques non traité. Les valeurs de la diminution de perte en poids (par rapport aux ABSD) des ABAD, ABTE, ABTR, ABTC, ABTV, et ABTF sont de 6.94 %, 9.33 %, 17.14 %, 26.15 %, 36.67 % et 46.55 % successivement pour une teneur en déchets de 1.2 %, et vont de 8.2 % à 5.8 % MPa. Les valeurs de la perte en poids des adobes remplis de déchets traités sont inférieures à celles des adobes remplis de déchets non traités. Les déchets jouent un rôle de pont dans les briques, transfert des contraintes, et de retarder le développement de fissures, rendent les briques avec une structure plus condensée et plus résistante à l'érosion par sulfate.

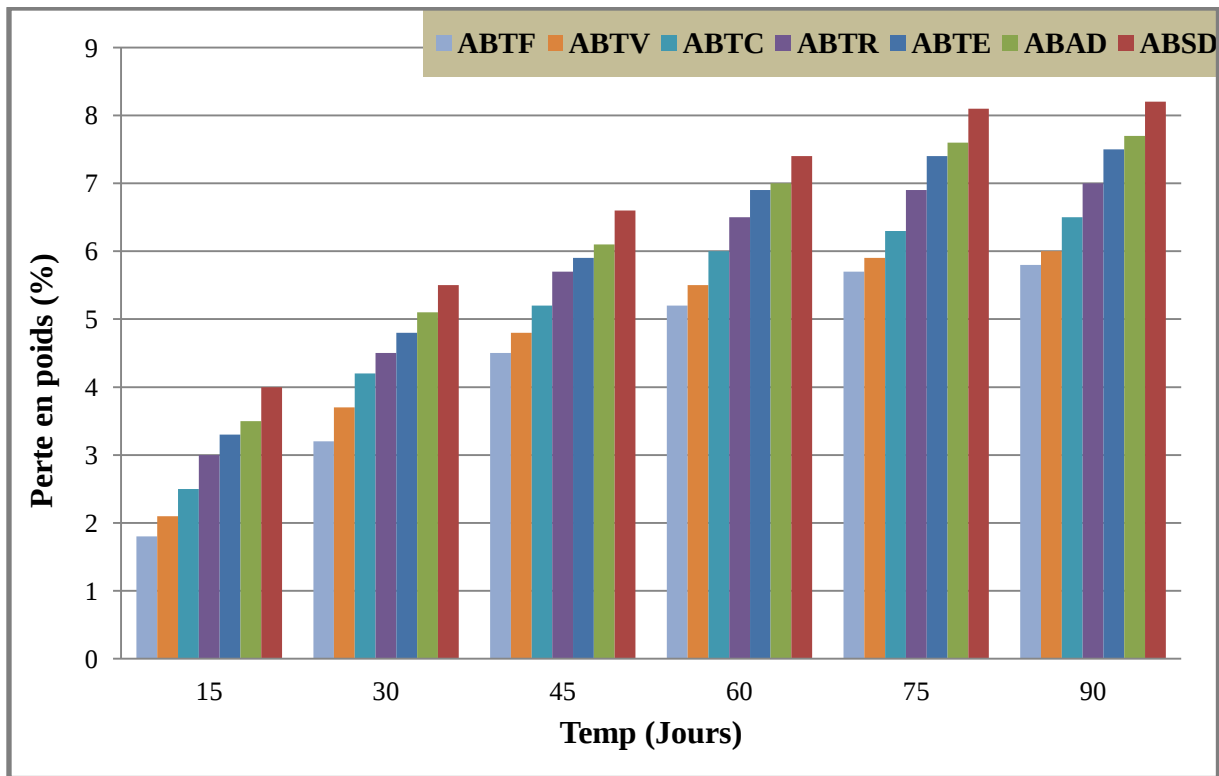


Figure 3.21 : Attaque sulfatique externe des briques d'adobe renforcées avec 1.2% de déchets.

3.6 Conclusion

Le présent document visait principalement à évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe contenant des déchets de palmier dattier. Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- La teneur optimale de 12 % de chaux nous a donné la meilleure résistance à la compression des briques d'adobe.
- L'augmentation de la teneur en déchets de palmier dattier jusqu'à 1.2% a entraîné une baisse de la résistance à la compression sèche des briques d'adobe, mais sans jamais tomber en dessous de la valeur minimale de résistance à la compression de 2 MPa qui est recommandée par les différentes normes de construction en terre.
- Les résultats indiquent que la résistance à la traction par flexion a augmenté de l'ordre de 83.33 % à mesure que la teneur en déchets de palmier dattier augmentait.
- L'incorporation de déchets de palmier dattier a augmenté l'action capillaire, l'absorption totale d'eau et le gonflement des briques d'adobe.

- La valeur du coefficient d'absorption d'eau a augmenté de moins de 20 %, ce qui signifie que les briques d'adobe ont été classées comme ayant une faible absorption capillaire selon la norme NF XP 13-901
- L'ATE de toutes les briques d'adobe étudiées n'a pas dépassé 15 %, qui est la limite recommandée par différentes normes internationales BRU-B2, BIS 1725 [98,109].
- L'essai de séchage/mouillage, résistance à l'érosion et l'essai de résistance à l'abrasion ont montré que lorsque la teneur en déchets de palmier dattier est passée de 0.3 % à 1.2 %, la durabilité des briques d'adobes était améliorée.
- L'attaque sulfatique externe a un impact négatif sur l'adobe en termes de concentration et de temps, il a été constaté que l'incorporation de déchets de palmiers dattiers permettait d'obtenir des briques d'adobe moins vulnérables à l'attaque au sulfate que celles sans déchets.
- Les adobes avec les déchets traités par différents produits ont indiqué des propriétés mécaniques et de durabilité plus élevées que les déchets non traités en termes de résistance à la compression et à la traction, d'absorption d'eau, de gonflement, de résistance à l'abrasion et d'essais de séchage/mouillage, ainsi les ABTF et les ABTV présentent un potentiel élevé de résistance à l'eau et durabilité pour tous les essais.
- Les briques renforcées avec déchets permettent d'augmenter le temps de la rupture des briques plus graduellement, ce qui peut être important pour les zones sujettes aux tremblements de terre
- La modification des caractéristiques indésirables des déchets par les traitements permet d'augmenter le comportement de la matrice/déchets ainsi que la durée de vie des déchets.
- Les modifications des déchets entraînent une réduction de l'absorption d'eau des déchets, ce qui entraîne une excellente adhérence entre les déchets et la matrice et améliore les propriétés de résistance et de durabilité à long terme des briques d'adobe.
- Les propriétés mécaniques et de durabilité des briques d'adobe dépendent fortement de l'adhérence de l'interface entre les déchets et la matrice, par conséquent, les déchets sont biodégradables et doivent être protégés contre tout agent circonférentiel afin d'assurer leurs rendements à long terme, la modification de la surface des déchets par des méthodes de traitement réduit la nature hydrophile des déchets et diminue le taux de biodégradation dans les milieux naturels.

- Le classement de l'efficacité des différents produits de traitement utilisés dans cette recherche par ordre croissant est : l'eau, résine, chaux, vernis et le flintkote pour tous les essais mécaniques et durabilités.
- Les résultats de cette étude peuvent être utilisés efficacement pour les briques d'adobe comme un matériau de construction durable et respectueux de l'environnement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette thèse, on s'intéresse à l'amélioration des performances des briques d'adobe, en exploitant les matériaux locaux : la terre et les déchets de palmier dattier, qui constituent l'une des richesses végétales les plus abondantes en Algérie et qui de nos jours, restent peu exploités. Pour améliorer l'insensibilité à l'eau des briques on a fait appel aux liants, à savoir la chaux. Donc le but de cette thèse est d'examiner les propriétés mécaniques et la durabilité des briques d'adobe avec déchets de palmier dattier non traité et traité par différents produits.

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art approfondi sur l'utilisation des briques de terre, et les moyens de stabilisation, en se focalisant sur son renforcement par les fibres d'une manière générale, notamment les fibres végétales, tout en donnant plus d'importance aux fibres de palmier dattier. Le chapitre 1 décrit aussi les résultats sur les mécanismes de la stabilisation sol-ciment, sol-chaux. Il a été également discuté en chapitre 1 les résultats obtenus par d'autres chercheurs concernant la caractérisation et le choix du sol pour la production des briques de terre. La littérature a montré que le choix du sol exige la connaissance de quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont:

La texture ou granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion.

Pour la stabilisation des briques de terre, plusieurs travaux ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) comme stabilisants améliorent la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des briques. Mais la stabilisation des briques par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Alors que des auteurs ont constaté que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction, d'autres auteurs ont montré que l'amélioration des performances du composite est seulement dans certaines limites.

Le deuxième et le troisième chapitre constituent la partie expérimentale de la thèse.

Le deuxième chapitre a fait le point sur l'identification, la caractérisation et les techniques de mesure préconisées pour les matériaux utilisés à savoir : (le sol, le sable concassé, la chaux, les déchets de palmier dattier non traité et traité). Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré que le sol satisfait aux critères de stabilisation pour la production des briques d'adobe en ce qui concerne la granulométrie, les limites de plasticité et la présence de matières organiques.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre on a étudié l'effet de la présence des déchets de palmier dattier, sur les propriétés mécaniques et durabilité des briques d'adobe, à savoir la résistance à la compression sèche RCS, la résistance à la traction par flexion RTF, l'absorption totale et capillaire d'eau, le gonflement, résistance à l'érosion, résistance à l'abrasion, séchage/mouillage et l'attaque en sulfate.

Les résultats obtenus ont révélé que la résistance mécanique d'adobe à base de chaux augmente avec l'augmentation du temps de cure à l'étuve, et que le meilleur résultat a été enregistré après 9 jours de cure avec une température de 65C°.

En analysant les résultats de l'effet de l'incorporation des déchets de palmier dattier sur la résistance mécanique des briques d'adobe à base de chaux, on a constaté que la RCS diminué avec l'augmentation des teneurs en déchets qui est attribué à la domination de l'effet des déchets sur celui de la teneur en chaux, puisque la quantité des produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés. Ainsi, il y a une amélioration de la RTF avec l'augmentation des teneurs en déchets est attribuée à la capacité des déchets à maintenir la matrice du sol ensemble, évitant ainsi la fissuration et la rupture soudaine qui se traduit par l'amélioration de la ductilité du matériau et à la capacité des déchets à équilibrer une partie des forces de traction grâce à une bonne adhérence de déchets/matrice, donnant par suite une résistance meilleure.

Pour évaluer le degré d'insensibilité à l'eau et la durabilité des briques d'adobe, il a été constaté que l'absorption totale, capillaire et le gonflement après immersion dans l'eau augmentent avec l'augmentation de la teneur en déchets, ceci est attribué à la capacité d'absorption d'eau des déchets, cette capacité des déchets à absorber l'eau peut être attribuée à leur structure poreuse et à leur caractère hautement hydrophile en raison de la présence de groupes hydroxyles de cellulose et d'hémicellulose qui améliorent l'absorption de l'eau. Mais malgré cette augmentation les valeurs de l'absorption d'eau étaient inférieures à la valeur maximale recommandée par certaines normes. En ce qui concerne la résistance à l'érosion, l'abrasion, séchage/mouillage et l'attaque en sulfate, montre l'effet favorable des déchets de palmier dattier qui peut être attribué à la forte interaction et aux liaisons serrées de déchets/matrice qui en résultent et qui maintiennent les particules de la matrice ensemble plus fermement que dans le cas des briques non renforcées. Les observations visuelles effectuées

au cours des essais ont permis de conclure que la forte cohésion entre les déchets de palmiers dattiers et la matrice était certainement due à la bonne performance des déchets de palmiers dattiers qui empêchaient la pénétration de l'eau dans les briques.

Les propriétés mécaniques et durabilité des briques d'adobe renforcé par des déchets de palmier dattier traité par différents produits donnent des résultats meilleurs que celle des briques renforcé par des déchets non traités, ce traitement agissait sur la lamelle moyenne et la paroi primaire des déchets, dégradant les hémicelluloses, cires et graisses, laissant ainsi apparaître des fibrilles de cellulose parfaitement alignées. La surface des déchets apparaît donc chimiquement plus homogène et également plus rugueuse, laissant plus de surfaces accessibles et augmentant ainsi la réactivité des déchets. La réactivité et l'homogénéisation des groupements de surface des déchets étant améliorées, le contact déchets/matrice est renforcé. Les meilleurs résultats des traitements sont donnés par flintkote, vernis, chaux, résine et d'eau successivement

Finalement, on a montré l'effet bénéfique des déchets de palmier dattier sur les performances mécaniques, et notamment sur la durabilité des briques d'adobe stabilisé par la chaux. On peut aussi conclure que les résultats de cette étude pourraient être utiles pour les briques exposés à des conditions climatiques sévères.

PERSPECTIVES

Perspectives

Dans une perspective de recherche, trois domaines méritent ainsi d'être approfondis :

- Pour bien comprendre les phénomènes liés à l'amélioration de l'adhérence entre les déchets de palmier dattier et la matrice de terre, il faut coupler l'étude par des approches microstructures (MEB).
- Etude des propriétés thermiques des briques d'adobe renforcé par des déchets de palmier dattier traité.
- Etude traitement chimique des déchets de palmier dattier par acétylation et ses effets sur la durabilité des briques d'adobe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographique

- [1] Houben, H., & Guillaud, H. (1989). Traité de construction en terre CRATerre. *L'Encyclopédie de la construction en terre*, 1, 300.
- [2] Merniche, S. (2014-2015). Terre Crue Stabilisation Par Le Sang ENSAPM-Département Transition. *Séminaire De Recherche*.
- [3] Caille, E. (2001). Technique Terre Crue L'éternel Opprobre. *Moniteur De L'architecture*.
- [4] Anger, R., & Fontaine, L. (2009). Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture. *éditions Belin cité des sciences et de l'industrie, Parigi*.
- [5] Friedrich, K. (1998). *L'habitat Ecologique Quel Matériau Choisis ?*.
- [6] RICHARD, P. (2010). Adobe, mémoire Maître en environnement. *Université de Sherbrooke Canada*.
- [7] Makrim, M. (2010). Projet De GE 12 Construction En Terre. *Technologie Compiègne*.
- [8] Wilfredo Carazas, A. (2003). *Adobe, Guide De Construction Parasismique*.
- [9] Guillaud, H. (1997). Encyclopédie De Bâtiment Tom 2. *Ecole d'Architect De Grenoble*.
- [10] Volhard, F. (1991). La Construction En Terre- Paille, Ancien Matériau Nouvelle Technique. *Edition Craterre*.
- [11] Houben H, P E. (1988). Bloc De Terre Comprimée, Choix De Matériel De Production. *Editions Du CDI, Bruxelles*
- [12] DJOUHRI, M. (2007). Confection d 'une brique à base de sable de dune» mémoire magister. *Université de Ouargla*.
- [13] Louis- Marie, P., Fabien, H., Victor, M., et All. Le Mur En Adobe. *Dossier De Restitution Technique*.
- [14] Miraucourt, D. (2017). Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso. *Mémoire De Fin D'étude*.
- [15] Berrehail, T. (2009). La Terre Un Matériau De Construction, Une Alternative Pour Un Matériau Durable. *Mémoire De Magister, Université Mentouri Constantine*.
- [16] Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal. ISBN 2-553-00222-3, 808p.
- [17] Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production. *CRATerre-EAG, GATE, 1*.
- [18] Houben, H., Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. London: Intermediate Technology Publications.

- [19] Walker, P. (2002). The Australian earth building handbook. In *The Australian Earth Building Handbook*. SAI Global Limited.
- [20] Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and building materials*, 21(2), 237-251.
- [21] Guettala, A. (2003). *Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau* (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Université de Biskra).
- [22] Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996, January). Soft ground improvement in lowland and other environments. AsCE.
- [23] IZEMMOUREN, O. (2016). *Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [24] Flament, C. (2013). *Valorisation des fines de lavage de granulats: application à la construction en terre crue* (Doctoral dissertation, Artois).
- [25] Kavak, A., & Baykal, G. (2012). Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay. *Environmental earth sciences*, 66(7), 1943-1955.
- [26] Le Roux, A., Rivière, A. (1969). *Traitement Des Sols Argileux Par La Chaux*. Bulletin De Liaison Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, Paris.
- [27] Millogo, Y., Morel, J. C., Traoré, K., & Ouedraogo, R. (2012). Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials*, 26(1), 663-669.
- [28] Millogo, Y., Hajjaji, M., & Ouedraogo, R. (2008). Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2386-2392.
- [29] 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.
- [30] Nalbantoglu, Z., & Tuncer, E. R. (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. *Canadian geotechnical journal*, 38(1), 154-160.
- [31] Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687.
- [32] Baley, C. (2013). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Tech. *L'ingénieur*.
- [33] Taallah, B. (2014). *Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

- [34] AMROUNE, S. (2016). *Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier* (Doctoral dissertation, GUELMA).
- [35] Kriker, A. (2005). *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec* (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [36] Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and environment*, 41(9), 1274-1278.
- [37] Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C., & Mircea, C. (2016). Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks. *Procedia technology*, 22, 259-265.
- [38] Mesbah, A., Morel, J. C., Walker, P., & Ghavami, K. (2004). Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. *Journal of materials in Civil Engineering*, 16(1), 95-98.
- [39] Raut, A. N., & Gomez, C. P. (2017). Development of thermally efficient fibre-based eco-friendly brick reusing locally available waste materials. *Construction and Building Materials*, 133, 275-284.
- [40] Chan, C. M. (2011). Effect of natural fibres inclusion in clay bricks: Physico-mechanical properties. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3(1), 51-57.
- [41] Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. (2015). Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks. *Construction and Building Materials*, 83, 314-319.
- [42] Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing compressive strength of soil using natural fibers. *Construction and Building Materials*, 93, 943-949.
- [43] Sharma, V., Marwaha, B. M., & Vinayak, H. K. (2016). Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 141-155.
- [44] Piattoni, Q., Quagliarini, E., & Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2067-2075.
- [45] 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.

- [46] Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71-78.
- [47] Muntohar, A. S. (2011). Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4215-4220.
- [48] Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L., & Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122, 300-307.
- [49] Smeu, S., Gal, A., & Badea, C. (2014). Environmental friendly building materials: Unfired clay bricks. *Journal of Environment*, 3(3), 47-50.
- [50] Vega, P., Juan, A., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., & Llamas, B. (2011). Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3020-3023.
- [51] Corrêa, A. A. R., de Paula Protásio, T., de Lima, J. T., Tonoli, G. D., & Mendes, L. M. (2015). Mechanical properties of adobe made with sugar cane bagasse and “synthetic termite saliva” incorporation. In *Key Engineering Materials* (Vol. 634, pp. 351-356). Trans Tech Publications Ltd.
- [52] Tonnayopas, D. (2013, November). Green building bricks made with clays and sugar cane bagasse ash. In *Proceedings of the 11th International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering* (pp. 7-14).
- [53] 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.
- [54] Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139-146.
- [55] Taallah, B., & Guettala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62.
- [56] Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of cultural heritage*, 11(3), 309-314.

- [57] Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2016). The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and Building Materials*, 106, 179-188.
- [58] Yetgin, Ş., Çavdar, Ö., & Cavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 22(3), 222-227.
- [59] Rojas-Valencia, M. N., & Aquino Bolaños, E. (2016, November). Sustainable adobe bricks with construction wastes. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management* (Vol. 169, No. 4, pp. 158-165). Thomas Telford Ltd.
- [60] Turanli, L., & Saritas, A. (2011). Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1747-1752.
- [61] Bock-Hyeng, C., Ofori-Boadu, A. N., Yamb-Bell, E., & Shofoluwe, M. A. (2016). Mechanical properties of sustainable adobe bricks stabilized with recycled sugarcane fiber waste. *International Journal of Engineering Research and Application*, 6(9), 50-59.
- [62] Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797-809.
- [63] Serrano, S., Barreneche, C., & Cabeza, L. F. (2016). Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation. *Construction and Building Materials*, 108, 105-111.
- [64] Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., & Neto, V. F. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829-837.
- [65] Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International journal of sustainable built environment*, 4(2), 348-358.
- [66] Khoudja, D., Taallah, B., Izemmouren, O., Aggoun, S., Herihiri, O., & Guettala, A. (2021). Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste. *Construction and Building Materials*, 270, 121824.
- [67] Salih, M. M., Osofero, A. I., & Imbabi, M. S. (2020). Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(4), 839-854.

- [68] Tolêdo Filho, R. D., Scrivener, K., England, G. L., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and concrete composites*, 22(2), 127-143.
- [69] Mokhtari, F. (1991). Contribution al'étude de composites a base de liant pouzzolaniques et de bamboo. *These de doctorat. France, INSA de Lyon*, 161.
- [70] Alawar, A., Hamed, A. M., & Al-Kaabi, K. (2009). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606.
- [71] Kaddami, H., Dufresne, A., Khelifi, B., Bendahou, A., Taourirte, M., Raihane, M., ... & Sami, N. (2006). Short palm tree fibers–Thermoset matrices composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), 1413-1422.
- [72] Taha, I., Steuernagel, L., & Ziegmann, G. (2007). Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 14(7-9), 669-684.
- [73] Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., Vitoux, F. (1979). Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection *An Architecture*, Paris, France, 265p.
- [74] Vilenkina, N. (1956). Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux.
- [75] Almi, K., Benchabane, A., Lakel, S., & Kriker, A. (2015). Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(15), 1231-1240.
- [76] Boutabba, H., & Mili, M. (2012). L'appel de détresse des Ksour de la Saoura. *Un essai de revalorisation du Ksar Kénadsa. Séminaire International RIPAM 4. Université de M'sila, Algérie*
- [77] 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.
- [78] Standards New Zealand. (1998). *NZS 4298 Materials and Workmanship of Earth Buildings*,
- [79] Fitzmaurice, R. (1958). Manual on stabilized soil construction for housing. Technical Assistance Program, United Nations.
- [80] RILEM TC 127-MS MS-A. 1. (1998). Determination of the resistance of wallettes against sulphates and chlorides. *Mat. Struct.*, 31, 2-9.

- [81] de Janeiro, R. (1995). NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água por capilaridade. *Rio de janeiro*.
- [82] Venkatarama Reddy, B. V., & Hubli, S. R. (2002). Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry. *Materials and Structures*, 35(5), 293-300.
- [83] Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 C. *Applied clay science*, 50(2), 191-198.
- [84] Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.
- [85] Maubec, N. (2010). *Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux-Etudes des interactions avec les argiles*(Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- [86] Bureau, G. C. (1991). New Mexico adobe and rammed earth building code. *General Construction Bureau, USA*, 311, 312.
- [87] Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., & Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28(1), 36-44.
- [88] Al Rim, K., Ledhem, A., Douzane, O., Dheilily, R. M., & Queneudec, M. (1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement and Concrete Composites*, 21(4), 269-276.
- [89] Khedari, J., Watsanasathaporn, P., & Hirunlabh, J. (2005). Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. *Cement and concrete composites*, 27(1), 111-116.
- [90] Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Construction and Building Materials*, 178, 204-210.
- [91] Danso, H. (2020). Effect of rice husk on the mechanical properties of cement-based mortar. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 101(2), 205-213.
- [92] Ghavami, K., Toledo Filho, R. D., & Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 39-48.
- [93] Ziegler, S., Leshchinsky, D., Ling, H. I., & Perry, E. B. (1998). Effect of short polymeric fibers on crack development in clays. *Soils and Foundations*, 38(1), 247-253.
- [94] AFNor, X. P. (2001). P13-901 “Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions-Spécifications-Méthodes d’essais-Conditions de réception”. *Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNor*.

- [95] Kerali, A. G. (2001). *Durability of compressed and cement-stabilised building blocks* (Doctoral dissertation, University of Warwick).
- [96] Ismail, S., & Yaacob, Z. (2011). Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibres. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 19(1), 33-43.
- [97] Sbiai, A. (2011). *Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier: effet de l'oxydation au tempo sur les fibres* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- [98] BIS, I. (1982). 1725: Specification for Soil Based Blocks Used in General Building Construction. *BIS, New Delhi, India*.
- [99] ASTM D559. (1989). American Society for Testing and Materials. Wetting and drying compacted soil cement mixtures.
- [100] Bezerra, W. V., & Azeredo, G. A. (2019). External sulfate attack on compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 200, 255-264.
- [101] Massaad, G., Rozière, E., Loukili, A., & Izoret, L. (2016). Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks. *Construction and Building Materials*, 127, 918-931.
- [102] Ozerkan, N. G., Ahsan, B., Mansour, S., & Iyengar, S. R. (2013). Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 131-142.
- [103] Morel, J. C., & Gourc, J. P. (1997). Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements. *Geosynthetics International*, 4(5), 481-508.
- [104] Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883-2892.
- [105] Bureau, G. C. (1991). New Mexico adobe and rammed earth building code. *General Construction Bureau, USA*, 311, 312.
- [106] Pejic, B. M., Kostic, M. M., Skundric, P. D., & Praskalo, J. Z. (2008). The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers. *Bioresource technology*, 99(15), 7152-7159.
- [107] Bateni, F., Ahmad, F., Yahya, A. S., & Azmi, M. (2011). Performance of oil palm empty fruit bunch fibres coated with acrylonitrile butadiene styrene. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1824-1829.
- [108] Bouhicha, M., Aouissi, F., & Kenai, S. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and concrete composites*, 27(5), 617-621.

- [109] BRU-B2. (1974). "Soil-Stabilizations, building Research Unit data sheet", *Ministry of Lands, Housing and Urban Development's. Dar Es Salaam, Tanzania.*
- [110] Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and building materials*, 111, 719-734.
- [111] Ahmad, F., Bateni, F., & Azmi, M. (2010). Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotextiles and geomembranes*, 28(1), 93-99.
- [112] Sarbaz, H., Ghiassian, H., & Heshmati, A. A. (2014). CBR strength of reinforced soil with natural fibres and considering environmental conditions. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(7), 577-583.
- [113] Freidin, K., & Erell, E. (1995). Bricks made of coal fly-ash and slag, cured in the open air. *Cement and Concrete Composites*, 17(4), 289-300.
- [114] Kevin, H. A. (2002). *An investigation in to the erodibility of earth wall unit* (Doctoral dissertation, PhD thesis, University of Technology Sydney).
- [115] Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and building materials*, 30, 100-116.

LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE

Liste des publications et communications issues de la thèse

Publications internationales :

Zaidi, A., Izemmouren, O., Taallah, B., & Guettala, A. (2021). Mechanical and durability properties of adobe blocks filled with date palm wastes, *World Journal of Engineering*, 19(4), 532-545.

Communications internationales :

Zaidi, A., Izemmouren, O., Taallah, B., & Guettala, A. (2021). Enhancing sustainability of rural adobe houses by addition of vernacular fiber reinforcement. *First International Conference on Geotechnical, Structural and Advanced Materials Engineering*. University of Biskra. Algeria