

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamedkhi der –Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et d'Hydraulique

Référence...../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة

جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية والري

المرجع...../2020

Mémoire de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Thème

**Influence des granulats de déchet de caoutchouc sur
les propriétés physico -mécaniques et durabilité de
brique de terre crue**

Nom et Prénom de l'étudiant :

HAMLAOUI Ammar

Encadreur : IZEMMOUREN Ouarda

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

D'abord, je voudrais exprimer ma gratitude et mes remerciements à mon encadreur docteur **IZEMMOUREN Ouard** pour sa supervision efficace et éclairée ainsi que la qualité des nombreux conseils.

Merci à Monsieur le chef de département, **Dr. ABD ESSLEM Issam** pour son aide et ses encouragements.

J'exprime ma profonde gratitude au **Dr. TAALLAH, Bachir** et Pr. **GUETTALA, Abdelhamid** pour leur encouragement et leur aide, et tous les enseignants de notre département.

Je tiens également à remercier Monsieur **TOUR Abdelmoneem** responsable du laboratoire de matériaux de la construction et **Mlle KHINECH Rahwa** responsable du laboratoire de mécanique du sol pour leur précieux conseil et aides pendant la durée de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier tous les messieurs pour leur acceptation d'être membre du jury de thèse.

Je remercie très chaleureusement mes parents pour son orientation, ses encouragements, son soutien et ses conseils.

Merci à ma chère mère pour sa précieuse attention à mon égard.

Enfin, je remercie mes amis **RAIS Sara, BEN ZETTA Hichem** et **FERHAT Imed Eddine** qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

RÉSUMÉ

Afin de réduire la consommation d'agrégats naturels, des efforts ont été faits pour trouver des agrégats alternatifs. L'utilisation de particules de caoutchouc de pneus usés dans la brique de terre comme agrégat alternatif est l'une des ressources respectueuses de l'environnement qui soutient les objectifs de développement durable.

L'ajout de chaux dans la stabilisation des briques de terre crue contribue à améliorer certaines propriétés physiques et leur durabilité vis-à-vis de l'eau. Dans ce contexte, il semblerait avantageux d'utiliser les déchets de caoutchouc des pneus usés comme ajout avec la chaux pour stabiliser les briques de terre crue (adobe)

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des granulats de caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité des briques de terre crue stabilisées par la chaux.

Dans ce contexte, quatre pourcentages de granules de caoutchouc (15%, 30%, 45% et 60%) ont été utilisés, avec la chaux de 10% du poids du mélange sec pour la stabilisation et 30% de sable concassé. Les éprouvettes ont été soumises à des essais de résistance à la compression et des essais de durabilité : absorption capillaire et totale, gonflement et abrasion. En plus de certains essais qui donnent une idée générale sur les propriétés physiques des adobes, telle que la masse volumique apparente et la vitesse des ondes sonique.

Les résultats obtenus montrent que les granulats de caoutchouc contribuent à la diminution de la masse volumique, le gonflement et l'absorption totale d'eau lors de l'ajout de 30% de la teneur en caoutchouc.

Alors que, il réduit la résistance à la compression, la résistance à l'abrasion et augmente le coefficient de l'absorption capillaire.

Mots Clés : briques de terre crue, granules de caoutchouc, chaux, résistance à la compression, durabilité.

المخلص

من أجل تقليل استهلاك الركام الطبيعي، تم بذل الجهود لإيجاد مجاميع بديلة. يعد استخدام جزيئات المطاط من الإطارات البالية في الطوب الترابي كركام بديل أحد الموارد الصديقة للبيئة التي تدعم أهداف التنمية المستدامة.

تساعد إضافة الجير في تثبيت الطوب الطيني على تحسين بعض الخصائص الفيزيائية ديمومتها فيما يتعلق بالمياه. في هذا السياق، قد يبدو من المفيد استخدام نفايات المطاط من الإطارات المستعملة كإضافة مع الجير لتثبيت الطوب الطيني (اللين).

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير استخدام حبيبات المطاط على الخواص الفيزيائية الميكانيكية ديمومة الطوب الطيني المثبت بالجير.

في هذا السياق، تم استخدام أربعة نسب من حبيبات المطاط (15%، 30%، 45% و 60%) مع الجير بنسبة 10% من وزن الخليط الجاف للتثبيت و 30% من الرمل المسحوق. تم إخضاع العينات لاختبارات قوة الانضغاط واختبارات الديمومة: الامتصاص الشعري والكلي، الانتفاخ والتآكل. بالإضافة إلى بعض الاختبارات التي تعطي فكرة عامة عن الخصائص الفيزيائية للأدوبيات، مثل الكثافة الظاهرية وسرعة الموجة الصوتية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن ركام المطاط يساهم في تحسين الكثافة والانتفاخ وامتصاص الماء الكلي عند إضافة 30% من محتوى المطاط.

بينما يقلل من قوة الانضغاط ومقاومة التآكل ويزيد من معامل الامتصاص الشعري

الكلمات المفتاحية: طوب الطين، ركام المطاط، الجير، مقاومة الانضغاط، الديمومة.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
المخلص.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE	
CHAPITRE 1 :SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
Introduction	5
Techniques de construction en terre	5
Labauge	5
Le torchis	6
Le pisé	6
L'adobe	7
La terre, un matériau de construction.....	9
Généralités	9
Les argiles	10
Classification des argiles	10
Les familles d'argile	11
Kaolinite.....	11
Illite	12
La montmorillonite.....	13
La Vermiculite(2/1,d=12A°)	13
La Glauconie.....	13
Les Chlorites (2/1,d=14A°)	14
Stabilisation	14
Généralité.....	14
Définition.....	14
Les procédés de stabilisation	15

Stabilisationmécanique.....	15
Stabilisationchimiques.....	15
Stabilisationphysique.....	15
Processus physico-chimiques des réactionschaux-solargileux.....	15
Introduction	15
Hydratationetionisation.....	16
Echange cationique	17
Floculationetagglomération.....	17
Réactionpouzzolaniques.....	18
L'effet de divers ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilitéde l'Adobe.....	19
Déchets de caoutchoucdepneu	22
Introduction	22
Méthodes et potentiel d'utilisation de déchet pneumatiquesen Algérie	23
Source et compositions de caoutchouc usédés pneus.....	24
Les étapes indispensables au recyclaged'un pneu	26
L'effet des agrégats de caoutchouc sur les propriétés mécaniquesdubéton	28
L'effet des agrégats de caoutchouc sur la Durabilitédubéton	29
Résistance augel-dégel	29
Absorption et perméabilitéà l'eau	30
Résistance àl'abrasion	31
Conclusion.....	32

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 2 : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODESD'ESSAIS

Introduction	30
Matériauxutilisés.....	30
Sol.....	30
Origine dusol	30
Caractéristiques physiquesdusol	30
Sableconcassé.....	35
La chaux	36
Granulats des déchetsde caoutchouc	36
L'eau.....	37
Préparationdel'adobe.....	38

Matérielspécifique	38
Malaxagedesmélanges	38
Optimisationdescompositions.....	39
Sables.....	39
Le temps de cure	39
Vérification de la teneur en eau.....	40
Mélange	40
La cure des briques d'adobe	40
Essai de la masse volumique (NFP94-054).....	41
Résistances mécaniques.....	42
Essai de compression simple (NFP94-077)	42
Vitesse de propagation des impulsions des ultrasons	42
Essai de durabilité.....	43
Absorption capillaire	43
L'absorption totale.....	44
Gonflement	45
Résistance à l'abrasion	46
Conclusion.....	48

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 3 :PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Introduction.....	48
Effet de la teneur en granulats de caoutchouc sur la masse volumique de l'adobe.....	48
Effet du dosage de granulats de caoutchouc sur les résistances à la compression.....	49
Vitesse de sondage.....	52
Effet du dosage de granulats de caoutchouc sur la durabilité de l'adobe	53
Absorption capillaire	53
Absorption totale.....	54
Le gonflement.....	55
Résistance à l'abrasion	56
Conclusion.....	58

CONCLUSION GÉNÉRALE95

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 26

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : (a) construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) principe de labauge.....	5
Figure 1.2 : Construction en torchis (a et b), mur en torchis (c), principe de torchis(d)	6
Figure 1.3 : (a) Construction en pis, (b) Mosquée en pis édifiée en 1788, (c) principe de prise.....	7
Figure 1.4 : Construction en Adobe. a) Inde, Ladakh - Palais shey, b) au Yémen,.....	7
Figure 1.5 : a) : Structure cristalline de la Kaolinite. Bish and Von Dreele b)- Photographie au MEB d'une Kaolinite.....	12
Figure 1.6 : schéma de la structure de l'illite, (b) Photographie au MEB	12
Figure 1.7 : (a) Forme structurale d'une structure T-O-T.....	13
Figure 1.8 : Variation du PH d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutée.....	17
Figure 1.9 : Flocculation et agglomération du sol traité à la chaux.....	18
Figure 1.10 : Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH	19
Figure 1.11 : Réaction pouzzolaniques	19
Figure 1.12 : Fibres (en haut) de gauche à droite : paille, plante de maïs et fétuque.....	20
Figure 1.13 : Élimination des pneus usés aux États-Unis (2017),.....	23
Figure 1.14 : Matières premières du pneumatique.....	25
Figure 1.15 : Les étapes indispensables au recyclage d'un pneu.....	27
Figure 1.16 : Images MEB comparant les sphéroïdes (a) et les fibres (b) de déchets de.....	28
Figure 1.17 : Finition de la surface en granulats de caoutchouc	29
Figure 1.18 : Dégradation des échantillons de mortier au 200 ^e cycle de gel-dégel.....	30
Figure 1.19 : Images MEB d'échantillons de béton mousse mélangés avec les granulats de caoutchouc	31
Figure 1.20 : Résistance à l'abrasion	31
Figure 2.1 : Granulométrie des sol.....	31
Figure 2.2 : Classification des sols étudiés sur le diagramme de Casagrande.....	33
Figure 2.3 : La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe.	33
Figure 2.4 : Analyse granulométrique d'un sable concassé.....	35
Figure 2.5 : Analyse granulométrique de déchets de caoutchouc.	37
Figure 2.6 : L'aspect des agrégats de déchets de caoutchouc.....	37
Figure 2.7 : Le moule utilisé pour le moulage et la confection de l'Adobe.	38
Figure 2.8 : L'effet de temps de cure sur la résistance mécanique de brique.	39
Figure 2.9 : Cure à l'étuve des blocs d'Adobe.....	41

Figure2.10 : La mesure des dimensions de la brique à l'aide de pied à coulisse	41
Figure2.11 : Essai d'écrasement de l'éprouvette.....	42
Figure2.12 : Mesure de la vitesse de propagation.	43
Figure2.13 : Essai d'absorption capillaire d'eau.	44
Figure2.14 : Immersion totale des blocs.....	45
Figure2.15 : Etapes de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots,.....	46
Figure2.16 : (a) Blocs pour mesure du gonflement, (b) L'immersion des blocs pour mesure le gonflement	46
Figure2.17 : Essai de résistance à l'abrasion.	47
Figure3.1 : La résistance à la compression de l'adobe en fonction de la teneur en caoutchouc.....	50
Figure 3.2 : (a), (b), (c), et (f) : Les modèles de rupture des éprouvettes après l'essai de compression.	51
Figure3.3 : La vitesse de propagation du son en fonction du dosage en caoutchouc	53
Figure3.4 : Le taux d'absorption capillaire de l'adobe en fonction de la teneur en caoutchouc.....	54
Figure3.5 : Le taux d'absorption totale de l'adobe en fonction de la teneur en caoutchouc.....	55
Figure3.6 : L'amplitude du gonflement de l'adobe en fonction de la teneur en caoutchouc	56
Figure3.7 : Le coefficient d'abrasion de brique d'adobe (Ca) en fonction de la teneur en caoutchouc.	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Les différentes techniques de construction en terre.	8
Tableau 1.2 : L'effet de divers ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilité de l'Adobe.	20
Tableau 1.3 : Composition typique des pneus.	25
Tableau 2.1 : Les masses volumiques du sol.	32
Tableau 2.2 : Limites d'Atterberg.	32
Tableau 2.3 : Valeur du facteur de correction.	34
Tableau 2.4 : Les caractéristiques physiques du sable.	35
Tableau 2.5 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive,	36
Tableau 2.6 : Composition des différents mélanges dans cette étude.	40
Tableau 3.1 : La masse volumique de l'Adobe en fonction de la teneur en caoutchouc.	49

LISTE DES ABRÉVIATIONS

(BGN) : Béton de Granulats Naturels.

(MEB) : Microscopie Electronique à Balayage.

(BGC) : Béton en granulats de caoutchouc.

(GC) : Granulats de caoutchouc.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La brique de terre est le matériau le plus ancien et le plus largement utilisé pour la construction de maisons d'habitation. On estime qu'un tiers de la population mondiale et 50% de la population des pays en développement vivent encore dans les bâtiments en terre (Houben, 1994). La construction en terre offre de nombreux avantages, notamment une rentabilité, des niveaux d'énergie intrinsèque inférieurs, une masse thermique élevée et une utilisation réduite de matériaux non renouvelables (Walker, 1999 ; Mesbah, et al, 2004). L'intérêt pour la construction en terre dans les pays développés a été motivé par la demande d'une forme plus durable d'environnement bâti. À cet égard, les matériaux en terre ont été une alternative intéressante aux matériaux de construction conventionnels à forte demande d'énergie (Walker, 1999). De plus, on s'attend à ce que les structures en terre des pays en développement continuent d'exister non seulement en raison de leurs avantages économiques, mais aussi en raison de la tradition culturelle et de l'identité qui leur sont attachées (Zami, 2010).

L'application des matériaux en adobe fait face à plusieurs contraintes en raison de leur comportement fragile, de leur faible résistance à la traction et de leur détérioration lorsqu'ils sont exposés à l'humidité. Cependant, les propriétés de l'adobe peuvent être améliorées par compactage mécanique, stabilisation chimique avec du ciment, de la chaux et du bitume, et des inclusions de fibres telles que la paille (Mesbah, et al, 2004 ; Islam, 2010). La stabilisation chimique peut améliorer considérablement la résistance et la résistance à l'eau de l'adobe.

Les résidus de caoutchouc de pneus sont un sous-produit de l'industrie du pneu, dont la production mondiale a dépassé 2900000000 de pneus en 2017 (Raffoul et al, 2017). Lorsque les pneus ne sont plus utiles, ils sont jetés dans des décharges clandestines, qui sont sujettes aux intempéries et à l'accumulation d'eau produisant un environnement idéal pour la prolifération des insectes (Thomas et Chandra Gupta, 2016). Lorsqu'ils sont incinérés, les pneus émettent des gaz toxiques, ce qui exige un traitement extrêmement efficace et coûteux, rendant l'incinération impraticable (Geso glu et Güneyisi, 2011), par conséquent, l'un des meilleurs moyens de se débarrasser de ces déchets est de les utiliser dans le domaine de la construction comme additifs pour améliorer certaines propriétés physiques ou mécaniques. Selon Guo et al. (2017), les déchets de pneus ont été utilisés pour la première fois dans le béton par Eldin et Senoduci en 1993.

Donc, Ici la problématique suivante peut être posée : Est-ce que le déchet de pneu de caoutchouc comme un ajout permet d'améliorer les propriétés physico-mécaniques de brique de terre crue ou non ?

L'objectif général de cette recherche est d'apporter une contribution significative à la valorisation de la chaux et le déchet de granulats en caoutchouc dans la stabilisation de l'Adobe pour étudier l'amélioration de sa durabilité et résistance mécanique.

Le mémoire est structuré en deux parties :

La première partie est composée d'un seul chapitre (chapitre 1), qui est consacré à la revue bibliographique, expose les techniques d'utilisation de la terre en construction, rappelle sur les types d'argile et mode de stabilisation, propriétés du matériau terre à stabiliser et généralité sur les déchets de pneu de caoutchouc.

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

Le deuxième chapitre porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés dans cette étude (les sols, le sable concassé, la chaux et le déchet pneu de caoutchouc). Ce chapitre présente aussi les mélanges, le mode de conservation et les procédures d'essai expérimentales utilisés dans cette étude.

Les résultats obtenus tout au long des différentes phases de l'étude sont exposés et analysés dans le chapitre 3.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Depuis longtemps, la brique de terre est utilisée comme un matériau de construction, à cause de leur bondant, avec plusieurs bénéfiques caractéristiques telle que fait frais en été et chaud en hiver, mais avec le développement des matériaux de construction-t-elle que le béton, la brique de terre est de propriété faible en comparaison a celle-ci, car elle est très sensible à l'eau et par **conséquence** une faible résistance et durabilité médiocre.

Techniques de construction enterrer

À travers les différentes régions du monde, la diversité des savoir -faire et la large portée qui adopte le processus de construction avec le matériau de la terre, de nombreuses techniques différentes sont utilisées comme méthode de construction, avec un nombre infini, il existe douze techniques d'utilisation de la terre pour la construction et présentées dans le tableau 1.1 (Houben, et al, 2006) parmi celles-ci les techniques que nous mentionnons quatre d'entre elles sont les plus courantes :

La bauge

Est une technique rurale.

On la retrouve principalement en Normandie, en Bretagne et en Vendée.

La terre utilisée pour sa mise en œuvre est argilo-limoneuse, généralement mélangée à des fibres végétales. C'est une terre plus grasse, plus collante. Des mottes de terre plastique sont assemblées directement sur le mur. Construit par levées de 40 à 60cm le mur est traditionnellement réalisé sans coffrage et façonné au fur et à mesure du montage.



Figure 1.1 :(a) construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) principe de la bauge. (Delbecque 2011, Bruno 2005).

Letorchis :

Le torchis est une technique de remplissage en terre crues, 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. La technique est appliquée verticalement mais aussi horizontalement, pour un torchis d'isolation dans un plancher en bois



Figure 1.2 :Construction en torchis (a et b), mur en torchis (c), principe du torchis (d), (Delbecque, 2011, Bruno, 2005).

Lepise

Utilise une terre argilo graveleuse, non végétale. On le retrouve plutôt dans la région Rhône Alpes.

La mise en œuvre du pisé nécessite un coffrage et le montage du mur se fait par tassement de la terre en couches successives à l'aide d'un outil pneumatique.

Le pisé requiert un travail de la terre à une teneur en eau humide, c'est à dire avec très peu d'eau dans la matière pour la mettre en œuvre. Une fois le mur monté, le décoffrage se fait immédiatement pour permettre à l'eau de s'évaporer, donc le mur mettre à sécher.



Figure 1.3 :(a) Construction en pis, (b) Mosquée en pise édifiée en 1788, (c) principe de prise. (Delbecque.2011, Bruno, 2005).

L'adobe

Est une brique de terre crue.

Il s'agit de briques de terre qui ont été séchées à l'air sans avoir été cuites dans un four. On utilise une terre argileuse à laquelle on peut ajouter des fibres végétales. Les briques sont traditionnellement moulées à la main dans un moule en bois puis séchées à température ambiante. Le matériau utilisé est «préfabriqué», c'est-à-dire qu'il est fabriqué avant le chantier, puis livré sur site pour être assemblé comme une maçonnerie conventionnelle.

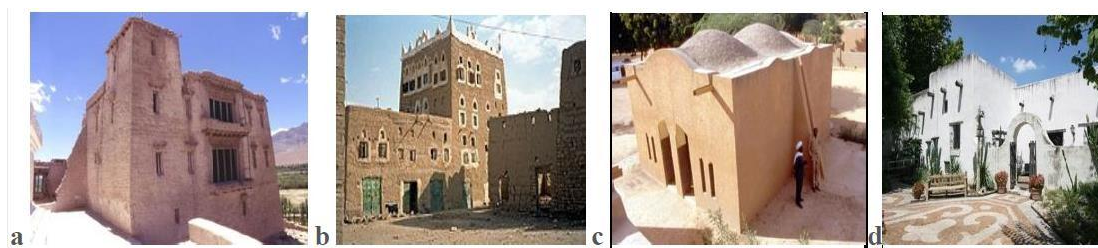














Figure 1.4 : Construction en Adobe. a) Inde, Ladakh - Palais shey, b) au Yémen, c) Burkina Faso, Boncoucou - Médical centre, d) USA, Palais du Gouverneur espagnol 1772. (Earth- auroville, cité par Bellebcir, 2019).

Tableau 1.1 : Les différentes techniques de construction en terre (houben, 2016).

	<p>1- TERRE CREUSE :</p> <p>l'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre : habitat troglodytique</p>
	<p>2- TERRE RECOUVRANTE :</p> <p>structure terre recouvre une la construite avec un autrematériau.</p>
	<p>3- TERRE REMPLISSANTE :</p> <p>la terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe</p>
	<p>4- TERRE DÉCOUPÉE :</p> <p>des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.</p>
	<p>5- TERRE COMPRIMÉE :</p> <p>des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou descoffrages.</p>
	<p>6- TERRE FAÇONNÉE :</p> <p>la terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces</p>
	<p>7- TERRE EMPILÉE :</p> <p>des boules de terre sont empilées pour reconstituer des murs épais.</p>

	<p>8- TERRE MOULÉE :</p> <p>la terre est moulée à la main ou à l'aide de moules (formes diverses).</p>
	<p>9- TERRE EXTRUDÉE :</p> <p>la terre est extrudée par une puissante machine</p>
	<p>10- TERRE COULÉE :</p> <p>la terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.</p>
	<p>11- TERRE-PAILLE :</p> <p>une barbotine argileuse liée des fibres et constitue un matériau léger.</p>
	<p>12- TERRE GARNISSANTE :</p> <p>la terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.</p>

La terre, un matériau de construction

Généralités

Généralement, la fraction solide de la terre est composée de (houben, 2006) :

Matière organique: Ce sont essentiellement des résidus de décomposition de créatures vivantes et sont visibles ou en décomposition, concentrées dans la couche de surface avec une épaisseur de 5 à 35 cm, le matériau en décomposition se caractérise par son inactivité physique et chimique et sa grande capacité d'absorption qui atteint de 100 à 500%, ce qui le rend mécaniquement instable, en plus de sa nature acide, qui peut provoquer des réactions

avec l'eau et affecter les matériaux en contact avec lui. La quantité et la concentration de matière organique affectent fortement les propriétés du sol avec une teneur en eau de 2 à 4%.

Matières minérales : les argiles résultant de la dégradation physique et de la modification chimique des roches mères sous-jacentes, elles constituent la plus grande partie du sol en général et sont classées en deux groupes :

- Les minéraux inaltérés: ont les mêmes composants que les roches mères dont ils sont issus, ce sont les cailloux et gravier, les sables et les silts.
- Les minéraux altérés: résultant d'un changement chimique des minéraux dans la roche mère, ils sont de taille moins de 2μ , formant une pâte s'ils sont humides, ils sont appelés colloïdes car ils forment le liant de la terre, et l'argile est le principal composant colloïdal pour cela, nous appelons le terme de fraction argileuse plus que le terme colloïdal.

Les argiles

Le rapport de l'argile au sol est la partie granuleuse moins de 2μ , l'argile diffère de divers autres composants constitutifs de la Terre par sa composition chimique et physique. Chimiquement, les argiles sont des phyllosilicates plus ou moins hydratés formés par l'association de feuillets et d'espace interfoliaires.

Physiquement, l'argile est souvent plate et allongée, stratifiée. Sa surface spécifique est infiniment plus grande que la surface des particules sphériques ou angulaires.

Les argiles sont notoirement sujettes au gonflement et au retrait (Houben, 2006).

Classification des argiles

Différentes classifications des phyllosilicates ont été proposées. La première, établie par l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Étude des Argiles, 1966-1972), se base sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième, établie par Mering et Pedro (1969) prend en compte la localisation des substituants, leurs distributions et le type des cations compensateurs. La classification la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi quatre groupes.

Minéraux de type 1/1 ou T-O (à 7 Å) : le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et octaédrique. Les feuillets sont reliés par l'intermédiaire des liaisons labiles de

type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets.

Minéraux de type 2/1 ou T -O-T (à 10 Å) : le feuillet est encadré par deux couches tétraédriques. Les couches tétraédriques peuvent soit contenir des atomes de silicium et d'oxygène, soit présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Dans ce cas, les feuillets présentent un déficit en charges positives (substitution Si^{4+} par Al^{3+}).

Minéraux de type 2/1/1 ou T -O-T-O (à 14 Å) : le feuillet est constitué d'une couche octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques.

Minéraux inter stratifiés : ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus. L'épaisseur du feuillet est variable. En général, les groupes d'argiles les plus importants sont les kaolinites, les illites et les smectites.

Les familles d'argile

Il existe de nombreux types d'argile, mais ceux sont des types principales, ils sont les suivants (Houben, 2006) :

Kaolinite

La plus fréquente dans la nature de formule chimique $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Les feuillets ont une structure composée d'une couche de tétraèdres d'oxygène à cœur de silicium et d'une couche d'octaèdres d'oxygène (ou hydroxyde) à cœur d'aluminium. La kaolinite ne présente des charges négatives qu'en bordure des feuillets et sa capacité de fixation d'ions est faible. La distance inter foliaire est fixe, elle est de 7 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,005 à 2 μm. La surface externe SE est de 10 à 30 m² par gramme ; la surface interne SI = 0. La kaolinite est plutôt stable au contact de l'eau.

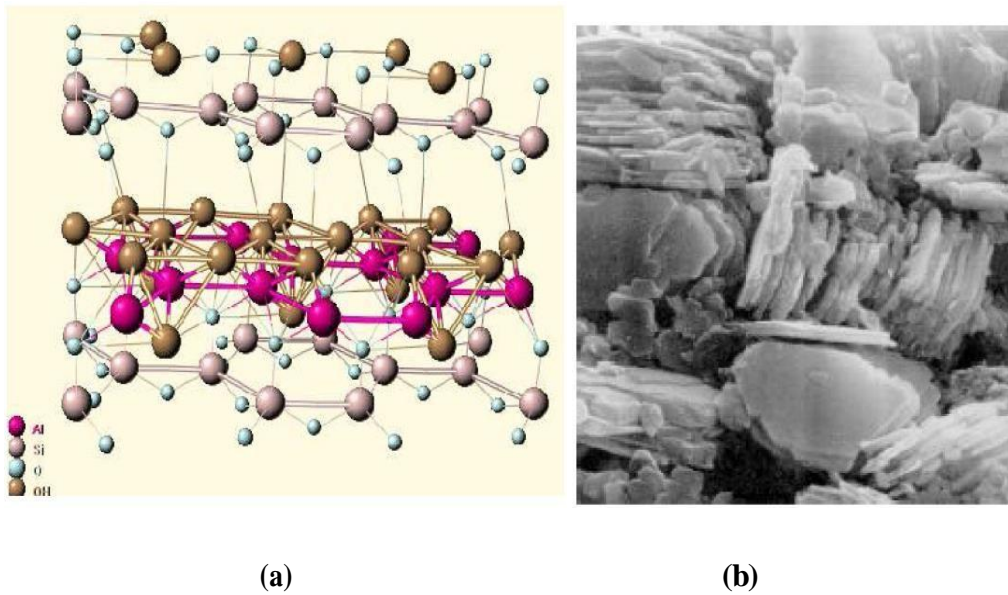


Figure 1.5 :a) : Structure cristalline de la Kaolinite. Bish and Von Dreele(1989) cité par (El Ouahebi, 2013), b)- Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993).

Illite

Sous formule approximative $K_{0.9}Al_2(Al_{0.9}Si_{3.1}O_{10})(OH)_2$ et de structure composé a deux couches tétraédrique principalement siliceuse bloquent une couche octaédrique, principalement alumineuse, des ions **Mg** ou **Fe** peuvent remplacer en partie **Al** dans la couche alumineuse, des ions **Al** se substituent à **Si** dans la couche siliceuse; ainsi le feuillet est non saturé, les charge négative sont équilibrées par des ions **K** qui unissant les feuillets.

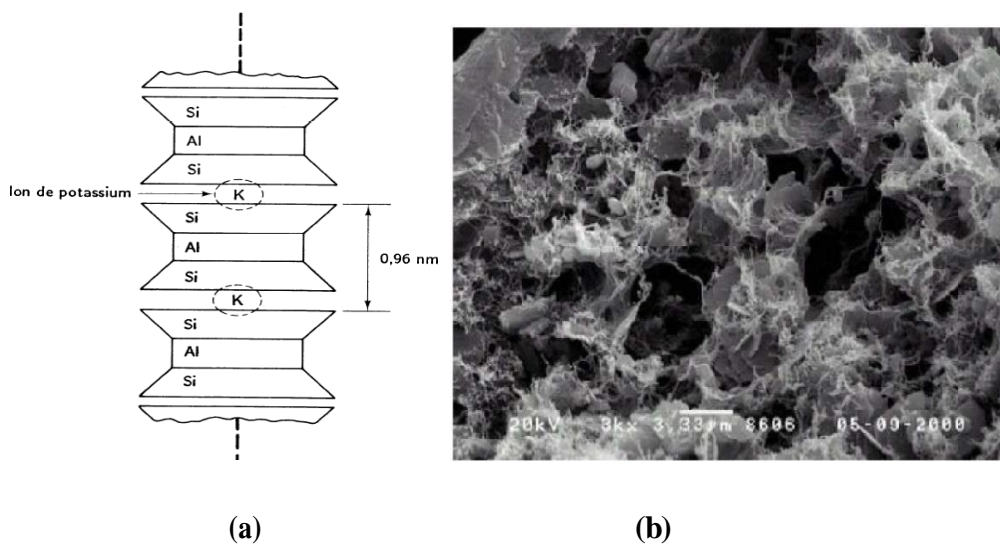


Figure 1.6 :schéma de la structure de l'illite, (Lambe, 1953), (b) Photographie au MEB (Hibouche, 2013).

La montmorillonite

Connue sous l'appellation de « terre de Sommières » de structure similaire à celle de l'illite, mais on observe des substitutions dans la couche octaédrique d'alumine : les ions **Al** peuvent être permutés par **Mg, Fe, Mn, N...** Les feuillets ne sont pas électriquement neutres et faiblement liés et les ions interfoliaires ne sont pas des ions **K**. Ce sont des cations échangeables (Na, Ca) et des molécules d'eau. Les feuillets peuvent s'écarter de 14 à 20 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,001 à 0,02 µ; SE est de 80 m²/g et SI de 800 m²/g. Les montmorillonites ne sont pas stables au contact de l'eau: très gonflantes.

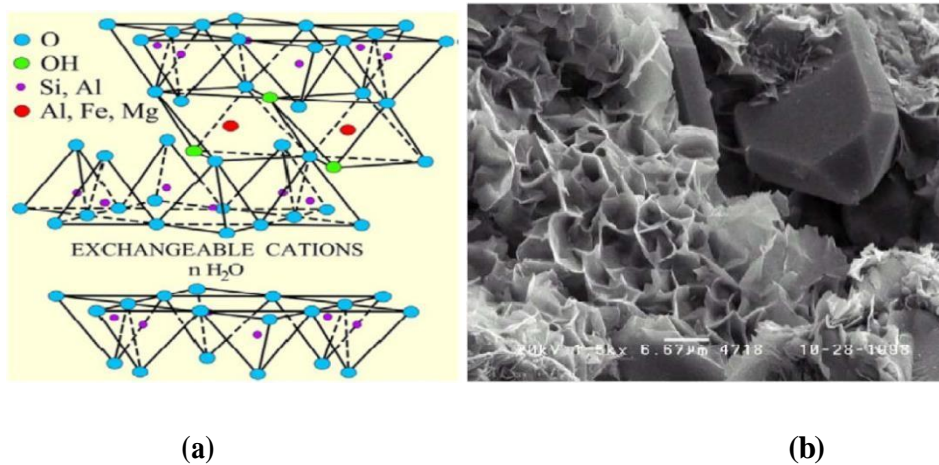


Figure 1.7 :(a) Forme structurale d'une structure T-O-T (Poppe et al, 2001)

(b) Photographie au MEB montmorillonite. (Hibouche,2013)[6].

La Vermiculite (2/1, d=12Å•)

Elle est fréquente dans les sols de la zone tempérée. La couche octaédrique contient du **Fe** et du **Mg**. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes (Cité par : Zerrouki, 2019).

La Glauconie

C'est un minéral vert ferrifère proche de l'illite exclusivement formée en milieu marin peu profond (cité par : Zerrouki, 2019).

Les Chlorites (2/1, d=14Å)

L'espace inter foliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Al est remplacé localement par le Fe. Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques ; elles sont également formées pendant la diagenèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif (cité par: Zerrouki, 2019).

Stabilisation

Généralité

La durabilité des constructions dépend principalement du comportement du matériau vis-à-vis de l'eau. Depuis les temps anciens, les humains ont découvert que la terre peut se fissurer lorsqu'elle sèche ou gonfle et se transforme en boue en présence d'eau. Par conséquent, ils ont créé des toitures (surfaces hydrofuges) pour protéger les murs de l'eau de pluie, et ils ont également utilisé la pierre pour éviter les dommages résultant de la consommation d'eau des murs. De plus, assurer la stabilité reste une solution globale pour atteindre les caractéristiques souhaitées et éviter les risques susmentionnés.

Définition

La stabilisation c'est un terme utilisé pour signifier l'amélioration de certaines propriétés du sol vis-à-vis l'eau, et pour assurer les caractéristiques nécessaires pour cela, qui sont les suivantes

- Une faible mouillabilité;
- Une faible porosité;
- Une cohésion à l'état humide adéquate;
- Une absence des fissures de retrait;
- Un gonflement minimal.

Les procédés de la stabilisation

Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est un procédé qui fonctionne par pression, pour obtenir des propriétés mécaniques de haute qualité, avec une garantie : haute densité, compression et réduction de porosité et perméabilité. Malgré qu'il reste sensible à l'eau

Stabilisation chimiques

Des produits chimiques peuvent également être ajoutés à la terre pour modifier ses propriétés, en provoquant des réactions chimiques et physiques entre la terre et les produits ajoutés, la quantité et le type de ces produits dépendent principalement de la qualité de la terre.

Il existe deux façons de traitement chimique : dans la masse et traitement de surface.

Le traitement chimique repose sur des produits chimiques ou des liants pour augmenter la concentration des ions d'eau libres ou réduire les phénomènes d'échange indésirables, qui sont de deux types.

Liants organiques (polymère, résine naturelle, goudron)

Liants hydrauliques (ciment, chaux, bitume).

Stabilisation physique

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur :

La texture : la modification des propriétés des sols par l'amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité à fin de diminution la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.

Fibres végétales : Qui ajoutés aux terres argileuses pour le renforcement et l'empêchant des fissures au moment du retrait de l'argile lorsque la terre sèche.

Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux

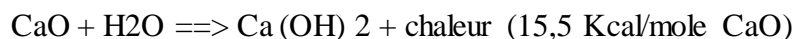
Introduction

D'après NEDJAH I et al, 2015, le traitement des sols à la chaux est une technique ancienne et efficace dans les travaux de génie civil qui obtient une stabilisation par la

Production des différentes réactions physiques et chimiques entre le sol et la chaux, Ce dernier peut exister sous les trois formes suivantes :

Chaux vive : elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO (en général à plus de 90 %).

Chaux éteinte (ou hydratée): elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique :



Lors de l'incorporation de chaux à un sol humide, trois processus physico-chimiques essentiels se produisent : (1) l'hydratation et l'ionisation de la chaux ; (2) la modification de la capacité d'échange cationique ; (3) le développement des réactions pouzzolaniques : réactions entre la chaux, la silice (SiO₂) et l'alumine (Al₂O₃) contenus dans les particules du sol, créant des produits cimentaires (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H) qui lient les particules de sols entre elles (Eades et Grim, 1960 ; Diamond et al., 1964). Il peut se produire aussi la carbonatation, en fonction des conditions dans lesquelles le traitement est réalisé.

Hydratation et ionisation

NGUYEN indiqué Lors du mélange de la chaux vive (CaO) au sol, l'hydratation de la chaux vive se traduit par la réaction suivante :



Cette réaction est exothermique et produit la portlandite Ca(OH)₂ lorsque les conditions nécessaires sont atteintes : pH de 12,4 et concentration en calcium de la solution de 22 mmol/L.

Ensuite, hydroxyde de calcium peut être dissout par la réaction d'ionisation suivante :



L'augmentation de pH est d'autant plus élevée que la quantité de chaux est importante (Figure I.8). Le pH peut atteindre une valeur de 12,6 au maximum, proche du pH d'une solution aqueuse saturée en chaux.

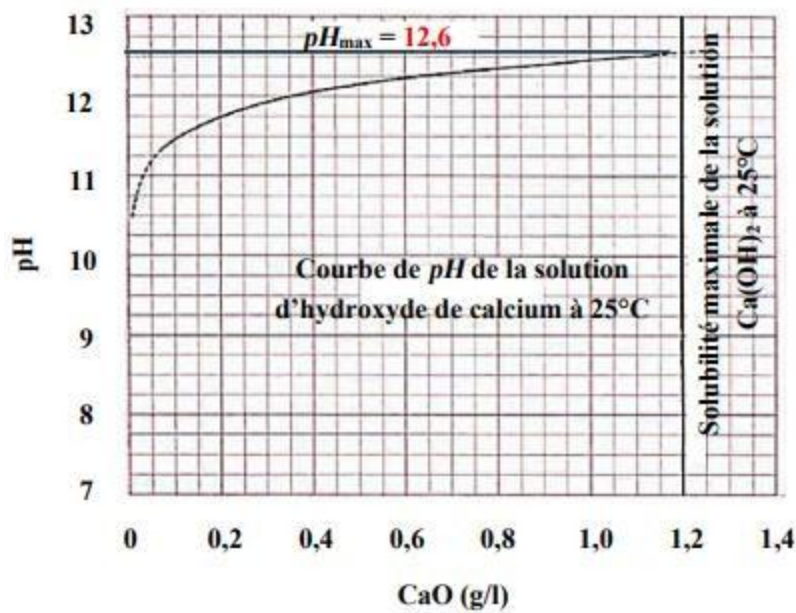


Figure 1.8 : Variation du PH d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau en fonction de la quantité de chaux ajoutée (Marrot, 2010).

Echange cationique

Les cations Ca^{2+} en solution se substituent aux cations adsorbés à la surface des argiles et dans leurs espaces interfoliaires (Little, 1987). Cet échange se produit car les ions de calcium divalents peuvent remplacer facilement des cations monovalents, et des ions en plus forte concentration remplacent aisément ceux dont la concentration est moindre.

Généralement, les cations de plus grande valence remplacent ceux dont la valence est plus faible, et les cations de grande taille remplacent ceux dont la taille est plus petite mais de même valence. A concentrations égales, voici l'ordre de substitution classique, où le cation de droite remplace celui de gauche : $i^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$

Floculation et agglomération

La floculation et l'agglomération sont la conséquence de l'échange cationique. Ce processus change la texture de l'argile à partir de celui d'une matière plastique et grains fins à celle d'un sol granulaire. Floculation altère leur structure à partir d'une structure horizontale, parallèle à une orientation plus aléatoire bord -à-face. Floculation a été attribuée à la forte teneur en électrolyte, au pH élevé et à la réduction de l'épaisseur à double couche à travers l'échange de cations [Diamond et al, 1963 ; Hilt and Davidson, 1960 ; Eades and Grim, 1960 ; Boardman et al. 2001].

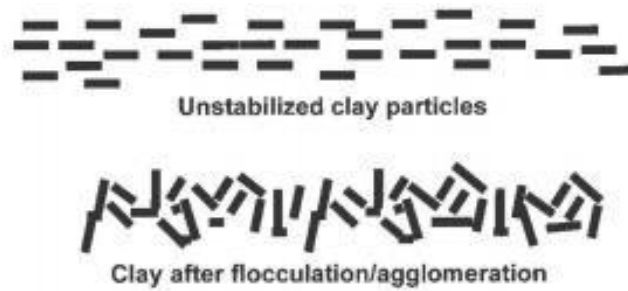


Figure 1.9 : Flocculation et agglomération du sol traité à la chaux, [Prusinki and Bhattacharja, 1999].

L'agglomération est supposée se produire que des particules d'argile floculées commencent à former des liaisons faibles au niveau des interfaces bord - surface des particules d'argile à cause du dépôt de matériaux à base de ciment au niveau des interfaces des particules d'argile (figure 1.9).

Réaction pouzzolaniques

A une valeur de pH élevée due à l'hydratation de la chaux vive et à l'ionisation d'hydroxyde de calcium, les silicates et aluminates présents dans le sol sont susceptibles de subir une dissolution, d'après leur diagramme de solubilité (Figure 1.10). Ces éléments dissouts peuvent réagir avec les cations Ca^{2+} substitués (Figure 1.11) pour former des aluminates de calcium hydraté (C -A-H), des silicates de calcium hydratés (C -S-H) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (C -A-S-H) qui précipitent, et dont une fraction se combine à l'eau présente, créant ainsi des liaisons de même nature que des produits cimentaires (Eades et Grim, 1960 ; Bell, 1996 ; Rao et Shivananda, 2001). Ces réactions sont dites réactions pouzzolaniques. La nature des produits cimentaires formés varie en fonction de la nature des minéraux argileux : une montmorillonite mènerait, contrairement à une kaolinite, à la formation de C -S-H plutôt qu'à la formation de C-A-H (Boardman et al, 2001). Hilt et Davidson (1960), Eades et Grim (1966), Locat et al. (1990), Little (1995) ont trouvé qu'il existe un dosage en chaux minimal, nommé « Point de Fixation de la Chaux »(PFC), pour initier les réactions pouzzolaniques.

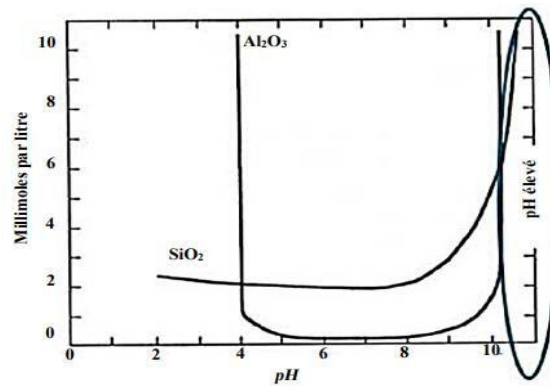


Figure 1.10 : Solubilités aluminates et des silicates en fonction du PH (Little 1987).



Figure 1.11 : Réaction pouzzolaniques (Marrot, 2010).

L'effet de divers ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilité de l'Adobe

La stabilisation des briques d'adobe a été pratiquée pendant longtemps par des liants conventionnels tels que le ciment, la chaux et par les fibres de paille. En raison d'améliorer les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des briques d'adobe, plusieurs travaux ont été consacrés à l'incorporation de différents ajouts.

Serrano et al. (2016), a étudié six sous-produits sont utilisés comme additifs dans les briques d'adobe pour étudier la variabilité des propriétés mécaniques. Fibres de maïs (CP), fibre de fétuque (F), paille (S) et les noyaux d'olive broyés (O) sont des sous-produits agricoles ; et les granulats de caoutchouc (R) et le polyuréthane (PU) sont des déchets utilisés comme sous-produits de transport et d'appareils (Figure 1.12). Les résultats montrent que la résistance à la flexion peut être améliorée par l'ajout de (S) et (CP), au contraire, (F) et (O) ne

sont pas recommandés pour augmenter la résistance à la flexion des briques en adobe et l'ajout d'additifs est en général déconseillé pour augmenter la résistance à la compression, sauf en (CP), où la résistance à la compression reste constante dans la plage étudiée.

Le tableau 1.2 Comprend quelques recherches antérieures sur l'effet des divers additifs industriels, minéraux ou naturels sur les propriétés de l'adobe.



Figure 1.12 : Fibres (en haut) de gauche à droite : paille, plante de maïs et fétuque.

(En bas) de gauche à droite : noyaux d'olive, granulats de caoutchouc et polyuréthane.

Tableau 1.2 : L'effet de divers ajouts sur les propriétés mécaniques et la durabilité de l'Adobe.

Auteurs	Dimensions	stabilisants	renforcement	Résultats
A. Seco et al. (2018)	Briques de 65 mm de diamètre et 75 mm de hauteur pour Briques prismatiques de dimension 225 × 110 × 60 mm	Ciment Portland Chaux hydraté Chaux hydraulique	Déchets de construction et de démolition (béton 50% du poids du sol et céramique 30% du poids du sol)	50% des déchets de béton et 30% de céramique augmentent les résistances mécaniques et l'absorption d'eau et cycles de gel-dégel.
Banadaki H, et al. (2019)	Panneaux muraux en	Ciment	Barres d'armature en	- L'augmentation du rapport de renforcement

	adobe, d'une longueur de 1 020 mm, d'une hauteur de 800 mm et d'une épaisseur de 200 mm		acier (NSM)	pourrait améliorer positivement la résistance latérale, le déplacement et la dissipation d'énergie ultime sous une charge cyclique latérale
Ouedraogo. M et al. (2019)	Adobes prismatiques de dimension 4 x 4 x 16 cm ³		Paille de fonio Pourcentages (2%, 4%, 6% et 8% en poids)	<ul style="list-style-type: none"> - Les résistances à la compression et à la flexion des adobes contenant de la paille de fonio sont principalement améliorées. - Augmentation de l'absorption d'eau des adobes mélangés par la paille de fonio - La conductivité thermique des adobes diminue avec l'ajout de paille.
Muñoz. P et al. (2020)	Adobes prismatiques de dimension 4 x 4 x 16 cm ³		Déchets de papier Pourcentages (2%, 5%, 8%, 10%, 12%, 15% et 18%)	<ul style="list-style-type: none"> un taux de remplacement optimal de 10% est suggéré. À ceratio, la résistance à la compression est augmentée de 25%, la conductivité thermique diminue de 50%,
Quagliarini. E, Lenci. S (2010)	Bloc d'adobe de dimension 0,15 x 0,23 x 0,13 m ³	Naturel (Sable grossier)	Fibres naturelles (paille)	<ul style="list-style-type: none"> - Tous les mélanges testés ont donné une bonne résistance à la compression - Les fibres naturelles (paille) contrôlent le comportement «plastique» et influencent la manière de rupture des échantillons d'adobe

Déchets de caoutchouc de pneu

Introduction

La production de pneus pour véhicules augmente de façon exponentielle la croissance rapide de la population et le développement des transports.

D'importants déchets de caoutchouc sont produits à partir de pneus usagés après un certain temps de service. Raffoul et al, a déclaré que les déchets de pneus sont presque proportionnels à la production de pneus étant donné que la production annuelle mondiale de pneus dépassé 2,9 milliards de pneus en 2017. Cette quantité massive des déchets non biodégradables occupent une grande surface et entraînent des dangers. Brûler ou utiliser un pneu comme carburant peut produire des substances toxiques gaz nocifs pour l'environnement et pouvant provoquer des destructions pollution de l'air naturel (Thomas, 2015 ; Muñoz-Sánchez, et al, 2017). Le caoutchouc des pneus contient du styrène, un composant fortement toxique très nocif pour l'homme (Kaewunruen, 2018). Par conséquent, le déversement de pneus usagés peut être très dangereux pour l'humanité.

Le recyclage des déchets de quelque manière que ce soit est bénéfique. Au cours des derniers ans, les chercheurs ont tenté d'établir une ligne directrice appropriée pour recycler les déchets de pneus de différentes manières. Le recyclage mondial des pneus usagé a été évalué à 0,95 milliard USD en 2016 et devrait croître à un taux de croissance annuel composé de 2,1% au cours de la prévision période (Global Tire Recycling Market Share). Le même rapport a révélé que les comptes de l'Amérique du Nord pour environ 31 % de la part des revenus du recyclage mondial des pneus marché.

En réponse aux préoccupations environnementales croissantes, les pneus usagés sont désormais recyclés d'une manière qui profite non seulement l'environnement mais contribue également à la croissance économique. Comme illustré à la figure 1.14, sur la base du rapport des fabricants de pneus américains Association (U.S. Tire Manufacturer Association), seulement 16% des pneus usagés sont déversés dans des décharges tandis que les autres sont recyclés de différentes manières. L'énergie récupérés à partir de pneus usagés contribuent également à dans les pays développés. Environ 6% à 8% des pneus usagés sont recyclés comme matériaux de génie civil aux États-Unis (Fig. 1.13) et

dans Les pays de l'UE, mais seulement environ 0,4% des pneus usagés sont recyclés en Australie

(U.S. Tire Manufacturers Association, ETRMA's statistics on scrap tire collection and recycling in Europe).

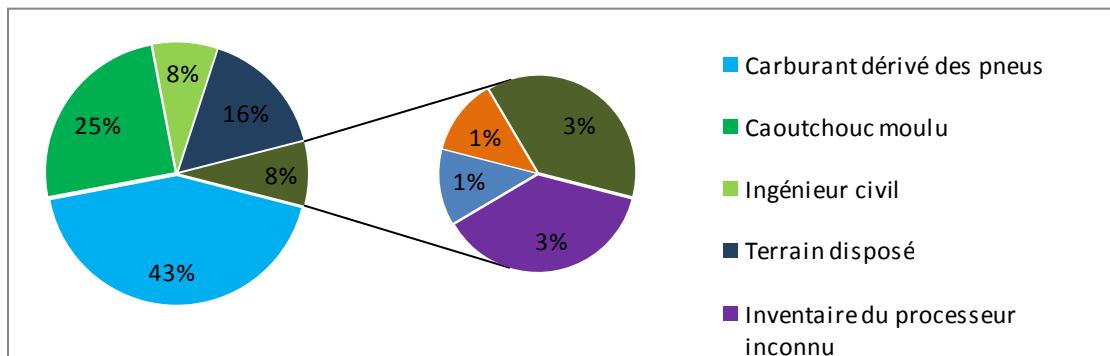


Figure 1.13 : Elimination des pneus usés aux Etats -Unis (2017),
(U.S. Tire Manufacturer Association).

Méthodes et potentiel d'utilisation de déchet pneumatiques en Algérie

Il existe deux types de déchets pneumatiques :

- * Pneus non réutilisables d'occasion qui doivent être éliminés ou dirigés vers une autre utilisation.
- * Pneus réutilisables d'occasion qui doivent être rechapés ou vendus comme pneus usagés.

Pour les premiers types, il existe trois méthodes pour éliminer les pneus mis au rebut, qui sont les suivantes :

- a) Mode décharge
- b) Mode énergie
- c) Mode de récupération de matière

Malheureusement, la culture des principes des 3R (réduire, réutiliser, recycler) est médiocre en Algérie (Bouanini, 2012).

Particularité, en Algérie, l'empilement de pneus usés dans des décharges à ciel ouvert est encore courant jusqu'à présent. Pour la limiter, depuis 2001, le gouvernement algérien a choisi d'éliminer les déchets solides municipaux (en tant que pneus usagés) par la technique de la décharge, qui est un stockage souterrain des déchets. Elle a lancé un ambitieux

programme de décharges dans tout le pays, 65 d'entre elles ont été recensées, au cours de la période 2001 -2005, 16 ont été achevées, 28 en cours et 21 en phase d'étude (Brahim, 2012). Par ailleurs, fin 2007, ce nombre a augmenté suite aux résultats des projets pilotes, notamment celui d'Oueld Fayet, il est passé à 80 projets, dont 20 sont achevés, 34 en construction et 26 en cours d'étude et 15 nouveaux projets. Les wilayas concernées sont Skikda, El -Taref, Annaba, Guelma, Souk Ahras, Batna, Tebessa, Media, Tizi-Ouzou, Sétif, Biskra, Alger, M'Sila, Ouargla, Blida, Djelfa, Jijel, Bejaia et Chelf (MATE, 2008a).

Source et compositions de caoutchouc usés des pneus

La principale source de déchets de caoutchouc est les déchets de pneus, qui sont largement classés dans les pneus d'automobiles et de camions (Gerges, et al, 2018). La plupart du temps, les pneumatiques de diverses sources ont des propriétés et des compositions physiques différentes. Ainsi, ils ont un effet différent sur la résistance du béton lors de leur utilisation.

Les ingrédients communs des pneus sont les caoutchoucs naturels et synthétiques, le noir de carbone, le métal, les textiles et les additifs. La GC peut être extrait des pneumatiques en utilisant un broyage mécanique à température ambiante ou cryogénique ou à pyrolyse.

Un schéma typique d'un pneu montrant toutes ses parties est présenté sur la (Fig.1.14)

La teneur en caoutchouc avec d'autres ingrédients principaux de différents pneus est indiquée dans le tableau 1.3.

Les constituants du caoutchouc sont vulcanisés ensemble pour obtenir les caractéristiques spécifiques des pneus. Parallèlement, l'incorporation de divers additifs tels que des stabilisants, des antioxydants et dans la production de caoutchoucs de pneus le rend non biodégradable, résistant à la décomposition photochimique, aux réactifs chimiques et aux températures élevées (Ramarad, et al, 2015).

Ainsi, la gestion des pneus usagés est techniquement, économiquement et écologiquement difficile. Bien que les pneus de voiture et de camion soient composés d'une combinaison spéciale de composants, la plupart d'entre eux contiennent presque la même quantité de caoutchouc naturel et synthétique. Environ 14% à 55% de caoutchouc peuvent être extraits de tout type de pneu en fonction des compositions réelles. La plus grande partie du caoutchouc provient des bandes de roulement et des flancs des pneus.

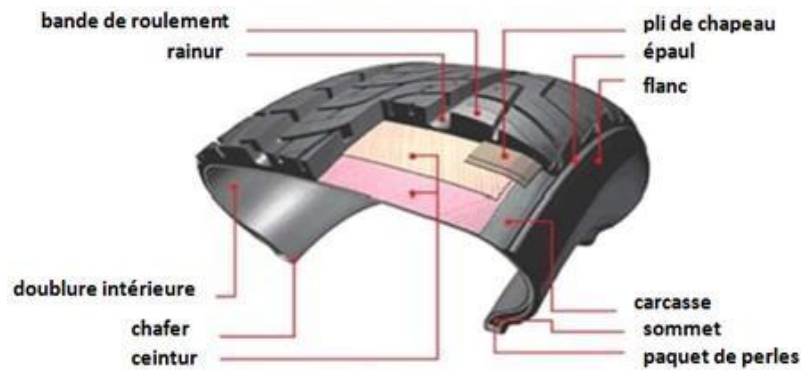


Figure 1.14 :Matières premières du pneumatique (Krishna C. Baranwal, 2003).

Tableau 1.3 :Composition typique des pneus (Muñoz-Sánchez, et al, 2017 ; Lopez-,Zaldívar et al ,2017; Gupta, et al, 2014; Fraile- Garcia, et al, 2018 ; Aslani,et al 2018 ; Angelin,et al, 2017 ; Chen,etal,2001).

Type de pneu	Composition (%)					
	Caoutchouc naturel	Caoutchouc synthétique	carbone Noir	Acier	Cendre	Autres (tissu, textiles, charges et accélérateurs)
pneu d `auto	14	27	28	14 - 15		
Pneu de camion	27 23.1	14	28 28	14 - 15 14.5	5.1	16.5
pneu d `auto	21 - 42	17.9	30 - 38		3 - 7	
pneu d `auto	41 - 48	40 - 55	22 - 28	13 - 16		4 - 6
Pneu de camion	41 - 45		20 - 28	20 - 27		0 - 10

Les étapes indispensables au recyclage d'un pneu

Les étapes de production, ce sont les processus qui sont mis en œuvre pour convertir les matières premières en produits finis qui peuvent être vendus pour satisfaire la demande sur les marchés, et cela, selon les étapes de production de notre projet, est représenté par:

A- Collecte et transport : Lorsque vous faites changer vos pneus en garage ou en centre de montage, vos vieux pneus sont récupérés par le professionnel, (fig. 15, a, b e t c).

B- Tri des pneus : Arrivés sur le site, il faut trier les pneus par taille et par composition afin de les traiter de la bonne manière, (fig. 15, d et e).

C- Déchiquetage : De puissantes machines déchiquettent les pneus, gomme et ferraille, afin de n'obtenir que de gros copeaux de caoutchouc et des résidus métalliques, (fig. 15, f, g et h).

D- Récupération de l'acier (Séparation) : Les fibres métalliques sont séparées de la gomme et récupérées, cet acier est aussi recyclé de son côté, (fig. 15, i et j).

E- Broyage final : Une fois qu'il ne reste que des granulés de gomme, le tout est poussé dans un crible et broyé en tailles différentes selon l'usage auquel il est destiné, (fig. 15, k et L).

F- Test et distribution: Les particules sont examinées en fin de processus et leur qualité contrôlée, puis acheminées selon leur réutilisation.

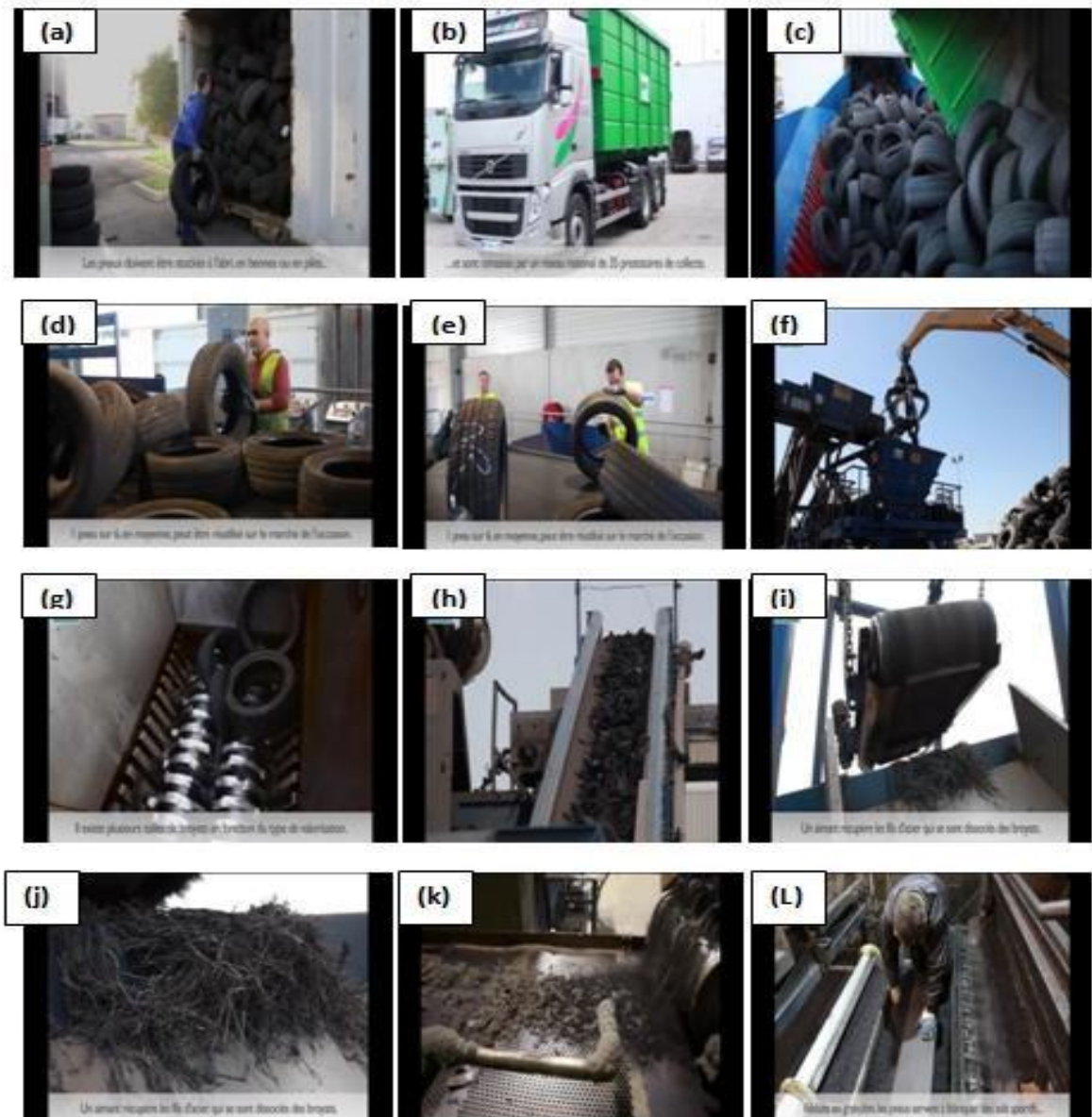


Figure 1.15 :Les étapes indispensables au recyclage d'un pneu

(Aliapur, 2013).

L'effet des agrégats de caoutchouc sur les propriétés mécaniques du béton

Un certain nombre d'études expérimentales ont indiqué que l'ajout de granulats de caoutchouc GC aux mélanges de béton réduit sa résistance à la compression, sa résistance à la flexion, sa résistance à la traction par rupture et son module d'élasticité dans la plupart des cas. Ce phénomène est principalement attribué aux facteurs suivants :

1 Contrairement aux a la patte de ciment dur, les particules de caoutchouc souple sont sujettes à la déformation sous charge, ce qui entraîne le développement des microfissures dans le béton. Des fissures se développeront rapidement au niveau de la zone de transition interfaciale entre les agrégats GC et la pâte de ciment à chargement continu, ce qui entraînera une défaillance du BGC (Gonen,2018).

2 La mauvaise interaction chimique entre les différentes phases des particules GC lisses et la matrice de ciment conduit à une mauvaise adhérence à la zone de transition (Rivas - Vaquez, et al,2015).

3 Le béton contenant des agrégats GC provoque de nombreux vides d'air et réduit les propriétés mécaniques (Gonen, 2018 ; Gupta, et al,2019).

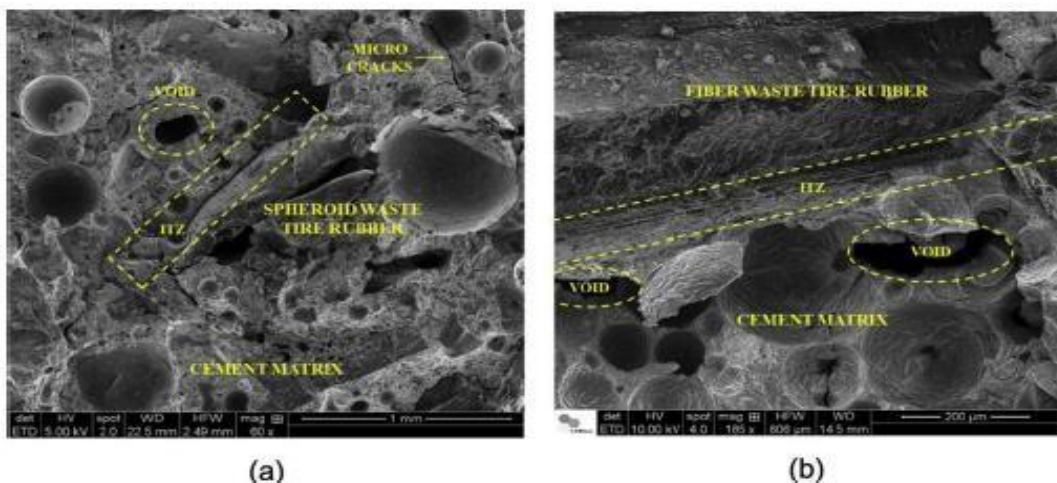


Figure 1.16 : Images MEB comparant les sphéroïdes (a) et les fibres (b) de déchets de Caoutchouc de pneus (Angelin, et al, 2019 city par : Li, et al, 2019).

L'effet des agrégats de caoutchouc sur la Durabilité du béton

Résistance au gel-dégel

Les dommages gel-dégel du béton sont responsables des dommages aux structures et sont la principale raison du vieillissement des infrastructures (Richardson, et al, 2016). Le béton contenant des particules de granulats de caoutchouc GC appropriées peut augmenter la résistance au gel -dégel et obtenir des avantages environnementaux (Gonen, 2018).

Richardson et al, 2016, ont observé que les pertes de masse relatives de BGN et de BGC (GC graduées jusqu'à <0,5 mm) avec 70 cycles de gel -dégel sont respectivement de 0,6% et 0,07%. La figure 1.17. Montre que les particules <0,5 mm GC étaient de forme irrégulière et avaient une surface rugueuse lorsqu'elles étaient vues à différents grossissements, ce qui emprisonnerait l'air et créerait un système de vide d'air pour améliorer la résistance au gel -dégel du béton.

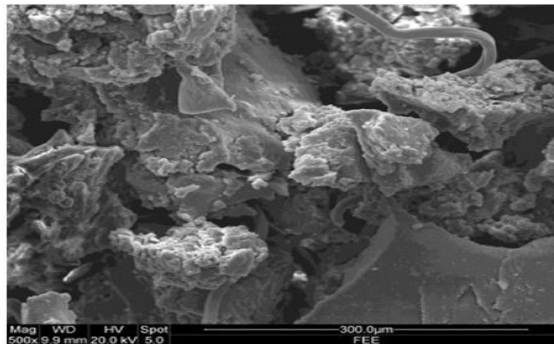


Figure 1.17 : Finition de la surface en granulats de caoutchouc

(Richardson, et a, 2016).

Baricevic et al, 2018, ont déterminé que la perte de masse cumulée du béton projeté sans fibres de polymère de pneu recyclées est quatre fois supérieure à celle du béton projeté avec des fibres de polymère de pneu recyclées après 56 cycles de gel -dégel. Après 200 cycles de gel-dégel, la perte de masse du mortier de contrôle est la plus importante et la détérioration est la plus grave, mais les échantillons de mortier contenant 30% de GC produisent une meilleure résistance au gel -dégel que les autres échantillons Fig.18.

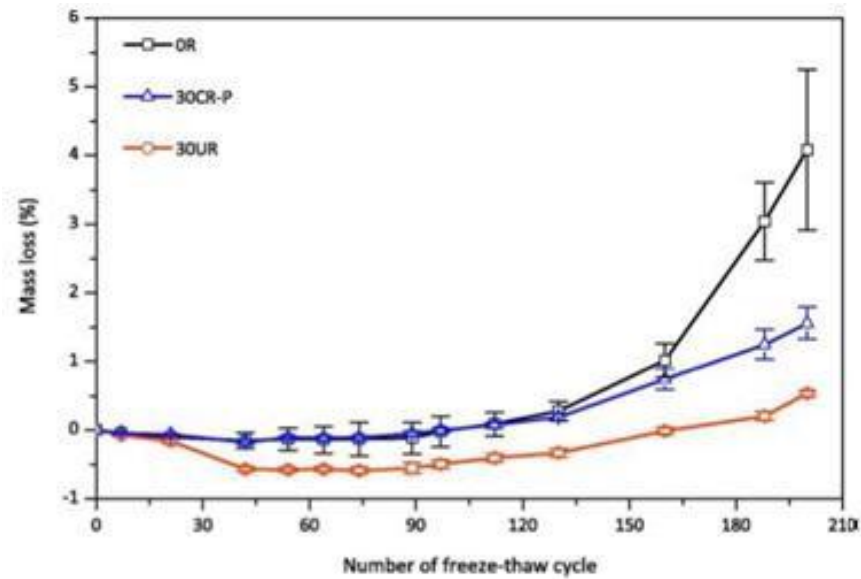
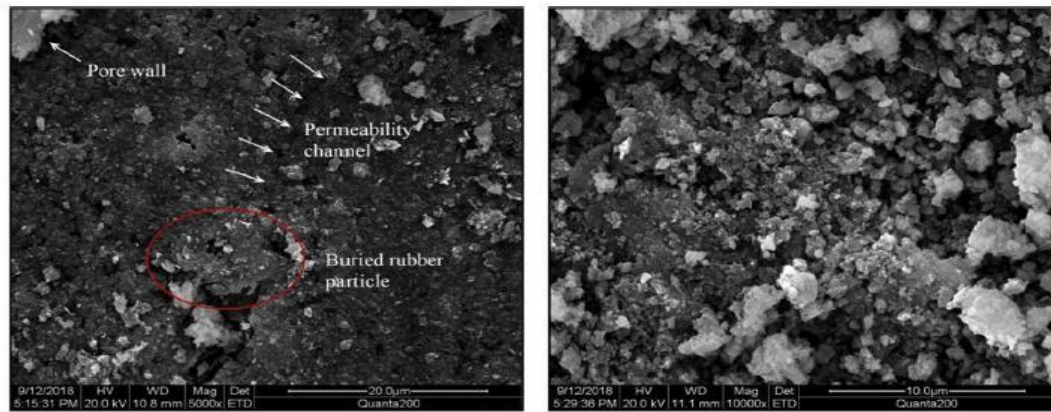


Figure 1.18 :Dégradation des échantillons de mortier au 200e cycle de gel-dégel (Si, et al, 2017).

Absorption et perméabilité à l'eau

De nombreuses études ont montré que l'absorption d'eau du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de remplacement des particules de GC. Les granules de caoutchouc de béton peuvent former des pores ouverts et des capillaires efficaces qui sont facilement remplis d'eau ; ainsi, le BGC a des valeurs d'absorption d'eau plus élevées que le BGN. Cependant, certains chercheurs ont trouvé une tendance à la baisse progressive avec l'augmentation du contenu en, et elle commence à augmenter progressivement lorsque le contenu en GC dépasse une certaine valeur.

Wang, et al, 2019, ont observé que le béton de mousse présente une bonne propriété d'étanchéité lorsque la teneur en GC est inférieure à 3%. La morphologie microscopique du béton mousse avec GC est illustrée à la Fig. 1.19. Les images MEB en 19 (a) montrent que les particules GC sont enfouies dans le béton pour bloquer les canaux capillaires et réduire l'absorption d'eau. Néanmoins, au-delà de 3% de CR, la liaison entre les agrégats de GC et la pâte de ciment est faible et les canaux de perméabilité augmentent, comme le montrent les images MEB en 19 (b).



(a) Specimen with 2% crumb rubber content (J3) (b) Specimen with 4% crumb rubber content (J5)

Figure 1.19 : Images MEB d'échantillons de béton mousse mélangés avec les granulats de caoutchouc (Wang, et al, 2019).

Résistance à l'abrasion

D'après Da Silva et al, 2015, le BGC exerce un effet positif sur la résistance à l'abrasion. La résistance à l'abrasion du béton haute résistance contenant du caoutchouc de pneus usés est illustrée à la figure 1.20. Les résultats montrent que la profondeur d'abrasion diminue en fonction que la teneur en GC augmente. D'autres études ont rapporté des résultats similaires. La résistance à l'abrasion du BGC est évidente lorsque la teneur en GC est comprise entre 30% et 50%.

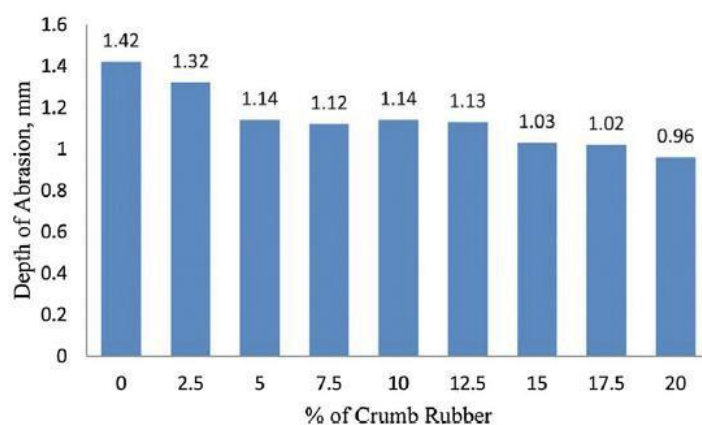


Figure 1.20 : Résistance à l'abrasion (Thomas, et al, 2016).

Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général sur la construction en terre. L'ensemble des processus physico-chimiques engendrés par l'ajout de la chaux dans le sol a été présenté. Ensuite, l'effet de divers ajouts sur les propriétés mécaniques et durabilité de l'adobe ont été bien analysés dans les études antérieures. Ces études montrent que l'ajout des fibres végétales et sous-produits industriels comme granulats de caoutchouc et le polyuréthane améliore certaines propriétés de l'adobe comme la résistance à la flexion, l'isolation thermique, la masse volumique et l'ajout de ces additifs est en général déconseillé pour augmenter la résistance à la compression, en revanche l'ajout de déchets de papier augmente la résistance à la compression de l'adobe.

Encore dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les déchets des pneus de caoutchouc et leurs effets sur les résistances mécaniques et durabilité des adobes.

D'après les travaux antérieurs, il y a un manque d'étude sur l'utilisation des granulats de caoutchouc dans la stabilisation des briques d'adobes. En effet, dans le cadre du présent travail, une étude est réalisée pour comprendre l'effet des granulats de caoutchouc sur les caractéristiques physico-mécaniques et durabilité de l'adobe.

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 2:

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

Introduction

Il est nécessaire de connaître les différentes propriétés physiques, chimiques et mécaniques des matériaux utilisés dans la fabrication de l'adobe, à travers lesquelles la qualité de l'argile peut être identifiée. Alors, ce chapitre contient d'abord les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. Ensuite nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et durabilité de l'adobe.

Matériaux utilisés

Dans ce travail, nous avons incorporé un ajout de nature (synthétique), qui est le déchet de pneus de caoutchouc, avec la chaux et du sable concassé pour stabiliser l'adobe.

Sol

Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de la wilaya de Biskra (Algérie), sol spécifiquement choisi en raison de son abondance et son disponibilité dans la région.

Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrié à 2 mm (Houben, 1994) a indiqué que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10 mm ; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression, les caractéristiques physiques du sol sont :

a) La composition granulaire

Une donnée importante permettant la caractérisation d'un sol est la courbe granulométrique exprimant la distribution de la taille des grains qui constituent un sol. Dans le laboratoire, cette courbe est déterminée à travers de deux essais : l'analyse granulométrique et la sédimentométrie.

L'essai de granulométrie par tamisage à voie humide a été effectué sur un échantillon d'argile imbibée dans l'eau pendant une journée avant la réalisation de l'essai.

Cet essai a été effectué selon la norme NFP 94 -056. Une fraction de passant du tamis (0,08mm) a été analysée par un essai de sédimentation cette essai est réalisé conformément à

la norme NF P94 - 01. Le principe est basé sur la loi de Stokes (équation 2.1). Initialement, les particules du sol sont séparées les unes des autres par l'ajout de dé flocculant (Hexa -méta - phosphate de sodium). Après 24h de repos, on agite manuellement pour répartir aléatoirement des particules bien séparées. Ensuite, on met la burette dans un bain thermostaté à 20C °. La mesure de la densité est effectuée par l'aréomètre.

$$d = \sqrt{\frac{18.v.\mu}{g.(\rho_s - \rho_w)}} \quad (2.1).$$

Avec : v - vitesse de sédimentation ; μ - viscosité du fluide ; ρ_s et ρ_w densité du sédiment et densité du liquide.

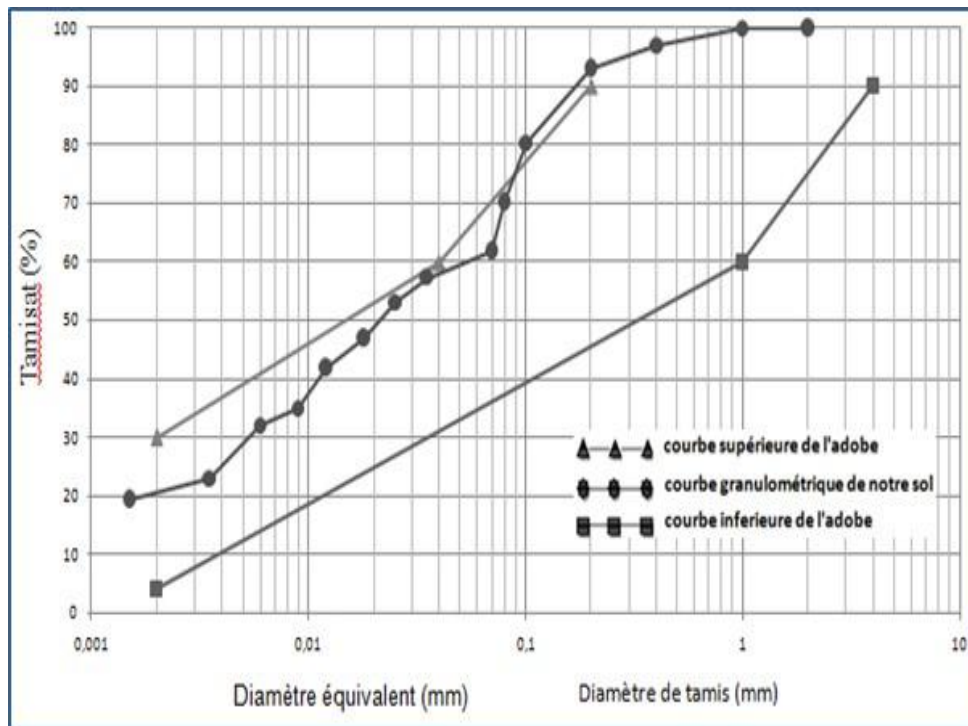


Figure 2.1 :Granulométrie de sol.

On constate selon la courbe granulométrique du sol, qu'elle se situe bien dans le fuseau limite recommandé pour l'adobe.

b) Les masses volumiques (NF P94-054)

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

Tableau 2.1 : Les masses volumiques su sol.

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
1240	2580

c) Les limites d'Atterberg :

Sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant entre autre d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces valeurs de teneurs en eau permettent de caractériser également les différents états des sols : liquide, plastique et solide sans retrait de ces matériaux. Cet essai est réalisé sur la partie de sol passant au tamis de 400 µm, (d < 0,4 mm).

Les limites d'Atterberg comprennent :

- La limite de liquidité $W(NF P94-051$ ou $-052-1)$, se détermine par la "Méthode de la Coupelle de Casagrande".
- La limite de plasticité $W(NF P904-051)$, se détermine par la "Méthode du rouleau".
- La limite de retrait $W(XPP94-060-1)$.

Tableau 2.2 : Limites d'atterberg.

Limites d'Atterberg		
Limite de liquidité $W_l(\%)$	Limite de plasticité $W_p(\%)$	L'indice de plasticité IP (%)
36.5	17.9633	18.5



Figure 2.2 : Classification des du sol étudiésur le diagramme de Casagrande.

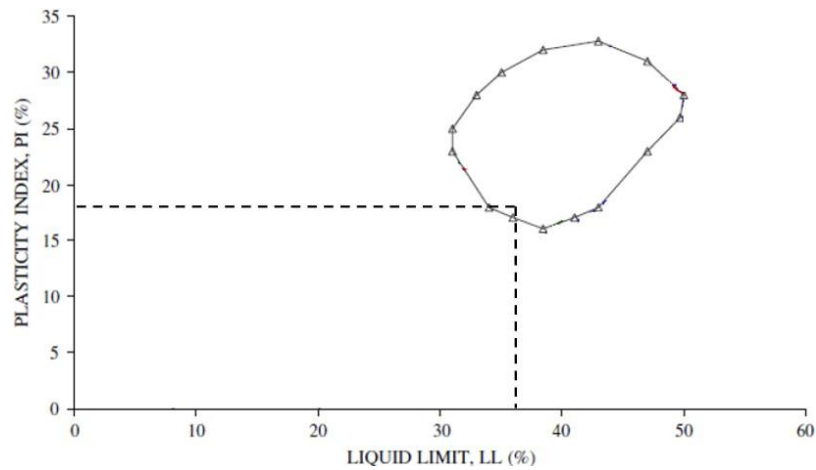


Figure 2.3 :La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe.

En abandonnant les deux valeurs $w_l = 36,5$ avec $I_p = 18,5$ sur la zone des limites d'Atterberg de l'Adobe, et comme on peut le voir sur la figure 2.3, On remarque que le sol se situent dans la zone, donc, le sol présent une plasticité tout à fait adaptée à la production de l'Adobe.

d) Essai au bleu de méthylène (ANF P 18-592)

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sol à adsorber du bleu de méthylène à la surface externe et interne des particules étudiées. C'est un essai particulièrement adapté à l'étude des argiles ou fraction argileuse d'un sol qui présente, selon leur composition minéralogique, des surfaces spécifiques plus au moins importantes. Le test consiste à imbiber 30 grammes de sol dans 100 cm³ d'eau distillée pendant une heure ; cette solution est ensuite agitée pendant cinq minutes et on injecte des doses successives bien déterminées de bleu de méthylène de 5 cm³ dans la suspension de sol jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argiles. Au bout d'une minute, une goutte de solution est prélevée et déposée sur un papier filtre. Une auréole incolore indique que tout le bleu injecté a été adsorbé et une auréole bleue, que nous avons atteint le degré de saturation d'adsorption.

Cet essai a été conduit selon la norme française NF P18 -592 au Laboratoire de génie civil (MDS) de l'université de Biskra. Une valeur au bleu de méthylène de VBS a été présentée dans le tableau 2.3.

$$V_{BS} = 100 \times \frac{B \times C}{M_s} \quad (2.2)$$

Où :

- **B** : Masse du bleu introduite(grammes).
- **Ms** : Masse de l'échantillon à l'état sec
- **C** : concentration de la solution du bleu(0,1g/l)

Tableau 2.3 : Valeur du bleu de méthylène.

Echantillon	Valeur du Bleu V _{BS} (g/ml)	Classification du sol
Sol d'Al-Alia Biskra	6.5	Sols argileux

Sable concassé

Le sable choisi a été essentiellement utilisé pour la correction granulair de la sole, un seul type de sable a été utilisé dans notre recherche, il s'agit du sable concassé de la région de Ain-Touta, les caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR, sont présentées sur le tableau 2.4. La courbe granulométrique du sable est représentée sur la figure 2.4.

Tableau 2.4 : Les caractéristiques physiques du sable.

Sable Concassé	Masse volumique apparente MV_{app} (kg/m^3)	Masse volumique absolue MV_{app} (kg/m^3)	Equivalent de sable ES (%)	
	1320	2260	visuel	au piston
			55.17	45.51

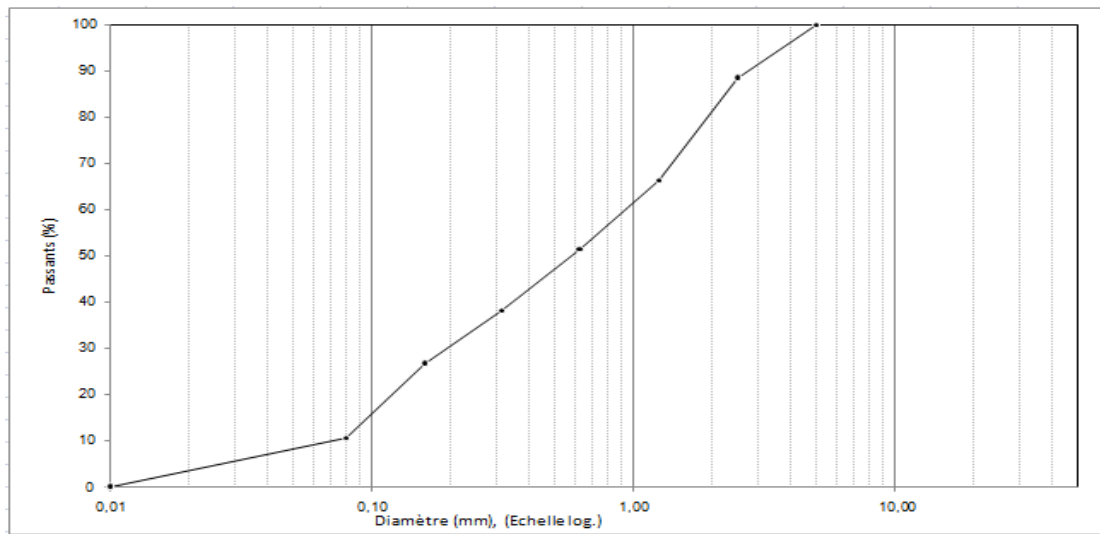


Figure 2.4 : Analyse granulométrique du sable concassé.

La chaux

Pour stabiliser le sol, tous les types de La chaux peuvent être utilisés, comme énoncé dans le principe de fixation des matériaux destinés à la construction, mais l'avantage reste pour la chaux aérienne au lieu de la chaux hydraulique. La chaux utilisée dans cette étude est de la chaux vive (CaO) produite dans la ville de Hassasna, Unité Erco, wilaya de Saida. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive, (Izemouren, 2016).

Analyse chimique	Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
		Pourcentage massique	82.77	10.63	3.27	1.35	1.88	0.11	0.15
Caractéristiques physiques	Masse volumique Absolue	2230 Kg/m ³							
	Masse volumique Apparente	1490 Kg/m ³							
	Surface spécifique	300 m ² /Kg							

Granulats des déchets de caoutchouc

Les granulats de déchet de caoutchouc (sans fibres d'acier) utilisés dans cette étude ont été obtenus par meulage mécanique de pneus usés d'une usine locale (Algérie). Leurs dimensions étaient comprises entre 0,2 et 4 mm (figure 2.6). Sa masse volumique absolue, telle que calculée selon le code ISO 2781-2008, s'est avérée être de 0,98 g / cm³ et son granulométrie est présent à la figure 2.5. (Cité par Samiha, 2019).

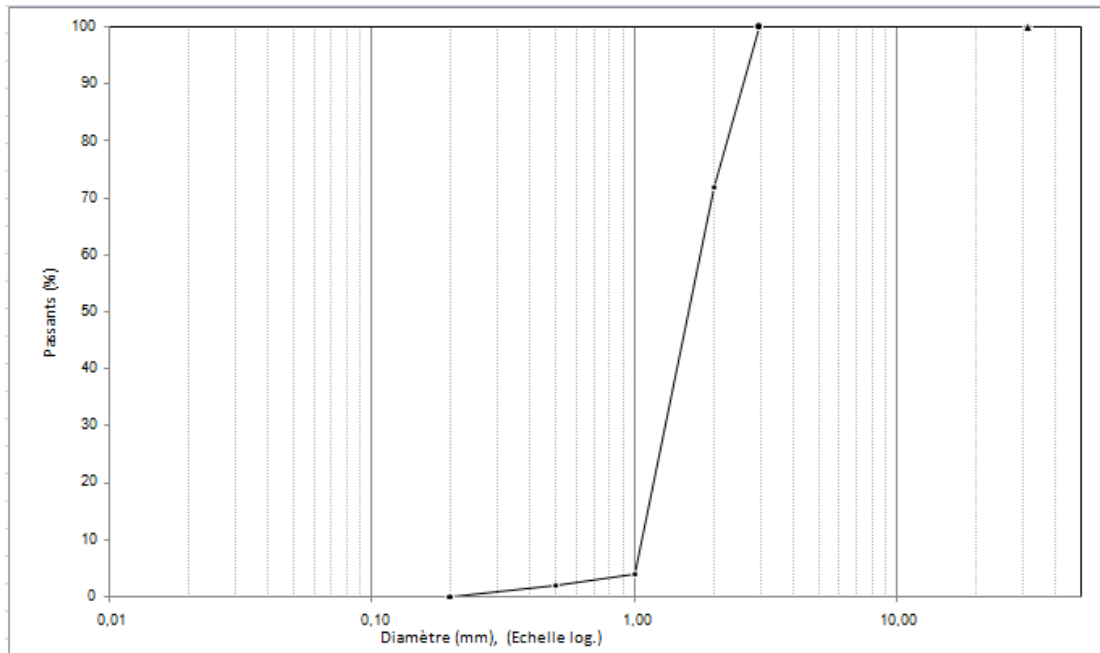


Figure 2.5 :Analyse granulométrique de déchet de caoutchouc.



Figure 2.6 :L'aspect des agrégats de déchets de caoutchouc.

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.

Préparation de l'adobe

Matériels spécifiques

Dans notre travail, tous les essais que nous avons effectués étaient en moules cubiques en acier ($10 \times 10 \times 10$) cm³, le démoulage des éprouvettes se fait par tirage du moule vers le haut et l'échantillon glisse vers le bas (Figure 2.7).



Figure 2.7 : Le moule utilisé pour le moulage et la confection de l'adobe.

Malaxage des mélanges

D'après Michel (1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 63°C, les matériaux (sol+sable +chaux) sont d'abord mélangés à sec dans un malaxeur à ciment de 5 litres à une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant 2 minutes. Les granulats de caoutchoucs ont été ajoutés progressivement et de manière aléatoire mais de manière homogène au mélange (sol+sable +chaux) et mélangés jusqu'à obtenir un composite homogène. Une fois les granulats de caoutchoucs ont été incorporés dans les mélanges d'adobe, une quantité optimale de l'eau potable a été ajoutée jusqu'à l'obtention de mélanges d'adobe homogènes. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes environ. Le matériau est mis en place dans les moules juste après le malaxage.

Optimisation des compositions

Sables

Le choix des proportions optimales de sable dans notre étude est basée sur l'étude réalisée par (Izemmouren et Guettala, 2014) sur les briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra et stabilisé par deux types de sable concassé, qui a montré que la teneur du sable augmente les résistances mécaniques. Cependant, pour les essais de la durabilité, la teneur du sable ne présente pas d'écart important par rapport aux briques stabilisées par le sol seul. Cette teneur à une valeur optimale (30%) qui donne les meilleurs résultats.

Le temps de cure

D'autre part, nous avons mené des essais de compression simple dans les jours 6, 8, 10 et 12 pour obtenir le temps optimal nécessaire à la chaux pour créer une résistance maximale. Afin de réduire la période de stockage des briques d'adobe qui a provoqué l'hydratation accélérée et la réaction pouzzolanique entre la chaux et terre. Les résultats illustrés sur la figure 2.8. On remarque que les résistances mécaniques augmentent en fonction du temps de cure jusqu'à 8 jours et ensuite diminuent légèrement à 10 et 12 jours.

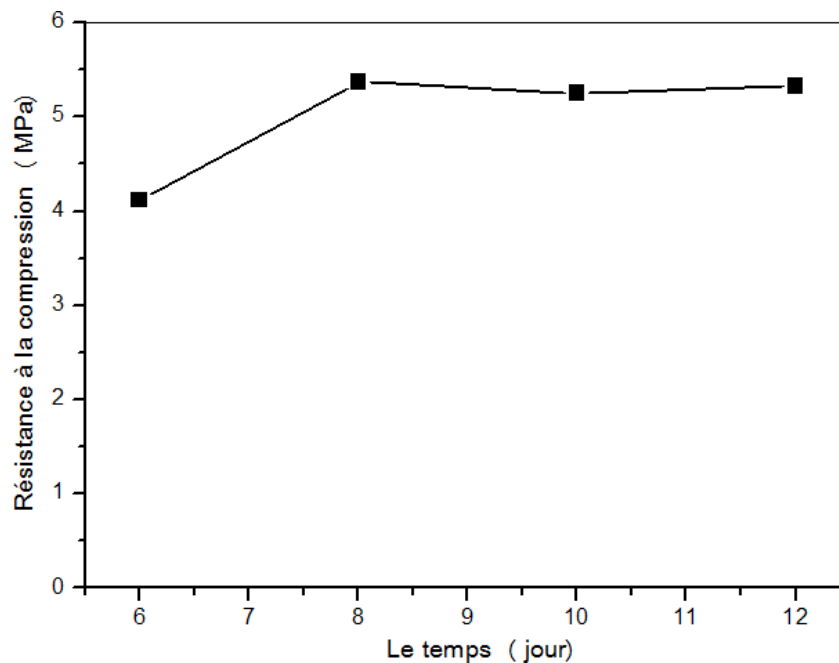


Figure 2.8 : L'effet de temps de cure sur la résistance mécanique de brique.

Vérification de la teneur en eau

La teneur en eau est déterminée par les limites d'Atterberg. CRA terre (CRA terre, 1979) a signifié dans le cas d'un moulage manuel, pour vérifier si la teneur en eau est correcte, il existe un moyen assez simple, qui consiste à tracer un sillon en (V) de 8 cm de profondeur dans le mélange, à l'aide d'un bâton taillé en coin. Celui-ci doit laisser une trace nette. Les parois du sillon se gonflent et tendent l'une vers l'autre sans se toucher.

Mélange

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égal à 2Kg.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le tableau 2.6.

Tableau 2.6 :Composition des différents mélanges dans cette étude.

Numéro du mélange	Sol (%)	Sable Concassé (%)	Ajouts (caoutchouc) (%)	Chaux (%)	L'eau (%)
	par rapport au mélange (sol+sable)		par rapport au mélange sec global		par rapport au mélange
1	70	30	15	10	28
2	70	30	30	10	28
3	70	30	45	10	28
4	70	30	60	10	28

La cure des briques d'adobe

Nous avons préservé les éprouvettes de l'influence du soleil et du vent pour éviter un séchage rapide. Par conséquent, notre préparation des blocs était la suivante :

Les éprouvettes sont placées dans les moules immédiatement après la fin du malaxage. Nous avons couverts les moules avec un film plastique tout en les gardant à l'endroit de la coulée pour faciliter le processus de démoulage et maintenir leur humidité et leur forme, après 24 heures, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les

arêtes à cause de la fragilité des briques, puis ils sont à nouveau recouverts d'un film plastique pour assurer son étanchéité ils sont ensuite stockés dans l'étuve à 65 °C (C'est la température appropriée pour que les échantillons d'argile ne brûlent pas). La durée de stockage est conforme à l'essai précédent que nous avons fait avec la connaissance du temps de cure. Enfin, les films plastiques sont enlevés et nous maintenons les briques à la même température pendant 2 heures pour assurer la stabilité de la masse.



Figure 2.9 : Cure à l'étuve des blocs d'Adobe.

Essai de la masse volumique (NF P94-054).

La masse volumique d'un sol ρ est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (v) qu'il occupe (y compris les vides qui contiennent). $\rho = m / v$.

Dans notre travail, le volume a été obtenu en mesurant les dimensions des éprouvettes de différents côtés avec le pied à coulisse électronique.



Figure 2.10 : La mesure des dimensions de la brique à l'aide de pied à coulisse Électronique.

Résistances mécaniques

Essai de compression simple (NF P94-077)

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cubiques de différentes dimensions ou sur des cylindres. Conformément à la norme.

Pour nos essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques (10x10x 10) cm³, à l'aide d'une presse. La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (2.3)$$

Où: **R_c**: Résistance à la compression des blocs en (MPA).

F : Charge maximale supportée par les blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm².



Figure 2.11 :Essai d'écrasement de l'éprouvette.

Vitesse de propagation des impulsions des ultrasons

Cette technique est standardisée par la norme NF P 18 -418. L'équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est le PUNDIT. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'onde sonore) à parcourir une distance connue. L'auscultation sonore, basée

sur la mesure de temps parcourus et d'énergie transmise, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation. La vitesse des ondes, v , est calculée par la formule :

$$v = \frac{L}{t}$$

Où : L est la distance entre les transducteurs (m). La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm.

t : est le temps de propagation (s).



Figure 2.12 : Mesure de la vitesse de propagation.

Essai de durabilité

Absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai de Sportivity détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ placée dans un bac contenant de l'eau, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur presque de 5 mm de la profondeur du bac. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps la formule suivante :

$$C_b = \frac{100 \times P}{s \sqrt{t}} \quad (2.4)$$

Où :

- **P** : ($M_h - M_d$) Poids d'eau absorbée en(g).
- **t** : Le temps en heures ($t = 10$ min).
- **S** : Surface de la face sciée (100 cm^2).



Figure 2.13 :Essai d'absorption capillaire d'eau.

L'absorption totale

D'après (Bungey et Millard, 1996 ; cité par Izemouren, 2016), l'essai consiste à poser des échantillons dans un bac à eau pendant 24 h et on mesure l'augmentation de la masse des échantillons (P_h). L'indice A de l'absorption totale de l'eau de chaque bloc est conventionnellement exprimé par la formule :

$$A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} (2.5)$$

Où :

- **Ph** : poids de l'échantillon à l'état humide.
- **Ps** : poids de l'échantillon à l'état sec.



Figure 2.14 :Immersion total des blocs.

Gonflement

La mesure du gonflement 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 selon la figure 2.15.
- Mesurer la distance entre plots : l_0 .
- Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.15.
- Après 96 heures (4 jours) d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : l_1 .

L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta L_g \text{ (mm/m)} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (2.6)$$

l_0 : la distance avant immersion

l_1 : la distance après immersion

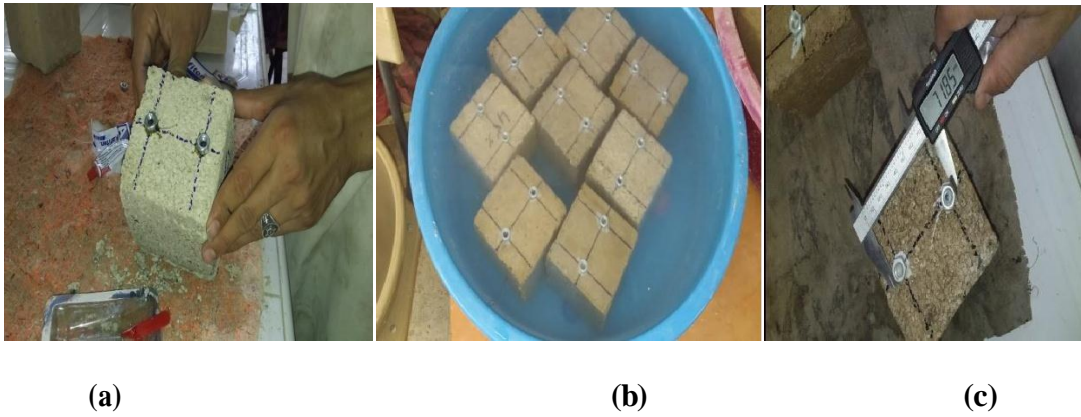


Figure 2.15 : Etapes de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots, (b) immersion dans l'eau, (c) mesure du gonflement.

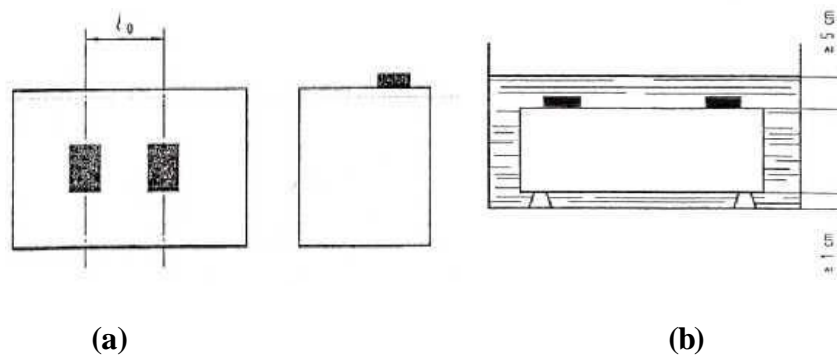


Figure 2.16 : (a) Blocs pour mesure du gonflement, (b) L'immersion des blocs pour mesure le gonflement (norme XP 13-901).

Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion des briques de terre crue s'effectue suivant la norme expérimentale NF XP 13-901. Il s'agit de soumettre un béton de terre crue à une érosion mécanique appliquée par frottement d'une brosse à pression constante sur un nombre de cycles donnés après une cure de 8 jours dans l'étuve.

Le brossage se fait à raison d'un aller et retour par seconde pendant une minute (soit 60 allers-retours). La largeur brossée du béton de terre comprimée ne doit pas excéder de plus de 02 mm la largeur de la brosse). De cet essai est déduit le coefficient d'abrasion (Ca) de la brique qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion.

$$Ca(\text{cm}^2/\text{g}) = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad (2.7)$$

Où :

- **Ca** : coefficient d'abrasion de la brique,
- **S** : Surface d'abrasion de la brique en cm^2 ,
- **m_0** : masse initiale de la brique avant abrasion en gramme
- **m_1** : Masse de la brique après l'essai d'abrasion en gramme.



Figure 2.17 : Essai de résistance à l'abrasion.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené des essais physiques qui nous permettent de présenter les propriétés de différentes matières premières et de donner une idée générale des principales propriétés qui entrent dans la formulation des briques, ce sont les sols et les stabilisants : sable concassé, chaux et granules de caoutchouc.

Les données présentées dans ce chapitre proviennent de la bibliographie ou des essais de caractérisation réalisés au cours de notre étude.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux et à mieux comprendre l'effet des différents paramètres étudiés sur les propriétés de l'adobe ajoutée.

DEUXIEME PARTIE

CHAPITRE 3 :

PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Introduction

À partir du premier chapitre, c'est-à-dire la recherche bibliographique, nous constatons qu'il est nécessaire de mener des essais visant à étudier l'effet de l'ajout de granulés de caoutchouc sur les propriétés physiques de l'adobe, ce chapitre a donc été spécialement conçu pour analyser et interpréter un programme expérimental qui vise à étudier l'effet de la présence de granulas de caoutchoucsur:

- vitesse des ondes soniques(ultrason)
- Résistance s mécanique s (la résistance à la compression)
- La densitéapparente de l'argile
- L'absorption capillaire et totale del'adobe
- Le gonflement
- Essai del'abrasion

En plus d'une expérimentation sur la résistance à la compression de l'adobe stabilisé par la chaux afin de choisir un temps de cure pour la suite de l'étude. Outre le matériau terre et chaux, il y a aussi le matériau granulats de caoutchouc, que nous avons ajouté à des taux variables. Afin de connaître l'effet du pourcentage de variation sur les différentes caractéristiques, en plus d'atteindre le ratio optimal sipossible.

Effet de la teneur en granulats de caoutchouc sur la masse volumique del'adobe

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque du matériau qui dépend de plusieurs paramètres : la composition, le malaxage, la cure et autres.

Les mesures de la masse volumique dès l'adobe à base de 10 % de chaux et curé à 8 jours à l'étuve en fonction de la teneur en granulats de caoutchouc sont montrées sur le tableau3.1.

A travers le tableau 3.1, on peut très bien voir que la masse volumique est inversement réduite avec l'augmentation du pourcentage d'addition de caoutchouc. Plus la teneur en caoutchouc est élevée, plus la valeur de la masse volumique est faible. Nous remarquons que l'ajout de 60% des GC diminue de la masse volumique à27 %.

Ceci s'explique simplement par le fait que les granulats de caoutchouc a une masse volumique très faible par rapport du sol, où la masse volumique des grains de caoutchouc est de 0,92 g / cm³, (cité par ramdani, 2019).

Tableau 3.1 : La masse volumique du l'Adobe en fonction de la teneur en caoutchouc.

Le pourcentage de l'ajout en caoutchouc	0%	15%	30%	45%	60%
La masse volumique (Kg/m ³)	1564.22	1520.71	1450.06	1289.36	1128.43

Effet du dosage de granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression

Afin d'étudier l'effet du dosage de granulats de caoutchouc sur les résistances à la compression des briques d'Adobe, on a ajouté au sol Cinq pourcentages (0%, 15%, 30%, 45% et 60%) de granulats de caoutchouc par rapport au poids du sol, les briques ont été stabilisées par 10% de chaux vive et conservées à l'étuve avec une température de (65 ± 2°C) pendant 8 jours.

Il est bien connu que les performances de compression de la brique d'argile dépendent entièrement de la compression de la matrice totale qui représente la fraction totale dans les échantillons d'argile, mais dans le cas d'agrégats, des ajouts ou des renforcements, la résistance à la compression dépend de la matrice d'argile, des ajouts et de la zone de transition intermédiaire.

La résistance à la compression des éprouvettes cubiques est rapportée sur la figure 3.1. Il est à noter que l'ajout de déchets de caoutchouc entraîne une perte de résistance à la compression.

La résistance à la compression est diminuée progressivement à mesure que la teneur en caoutchouc est augmentée de 0 à 60%.

En particulier, il convient de noter que la perte après ajout de (15%, 30%, 45% et 60%) au mélange est d'environ 10.37%, 62.03%, 71.66%, 85.74%, respectivement. ce résultat est acceptable avec l'état de l'art, Serrano et al 2016, et après la comparaison l'effet de l'ajout de type GC avec les fibres de paille « S »(utilisée comme matériau de référence), indiqué que l'incorporation de GC est diminué la résistance à la flexion de 0,164 jusqu'a 0,095 N / mm², et la résistance de compression est diminué de 2,521 jusqu'a 1,206N / mm² des adobes.

Il y a deux raisons possibles pour la diminution de la résistance à la compression après avoir été caoutchoutée. Premièrement, la différence entre le module élastique et la résistance à la compression des particules de caoutchouc et matrice de l'argile est la cause principale (Güneyisi, 2004). L'autre raison est que les particules de caoutchouc ont une hydrophobicité élevée, ce qui augmente la porosité de la matrice de l'argile et réduit par conséquent sa résistance (Ilker Bekir Topcu, 2009).

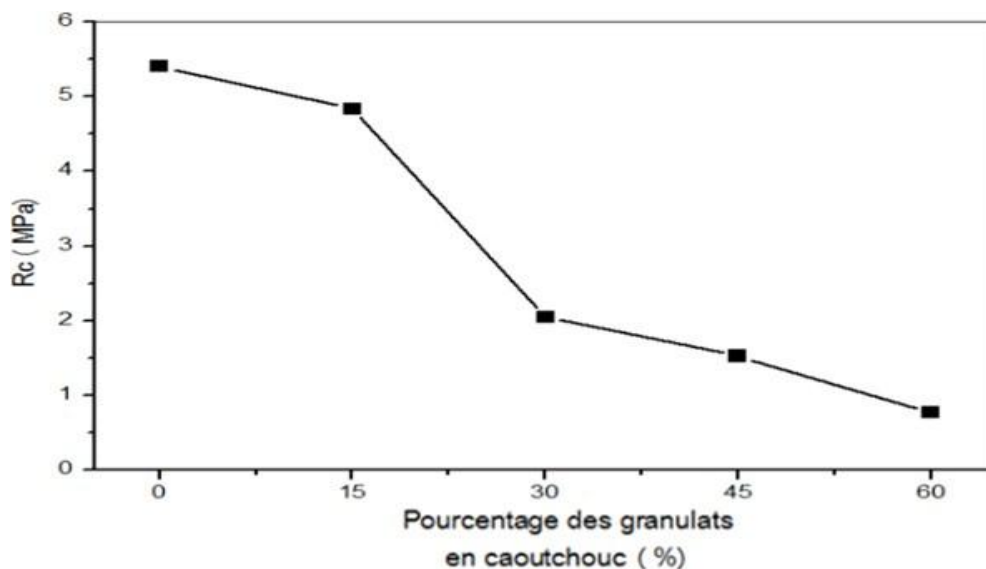


Figure 3.1 : La résistance à la compression de l'adobe en fonction de la teneur en Caoutchouc.

La figure 3.2 montrent les modèles de rupture des éprouvettes après d'essais de compression.

L'essai de compression des éprouvettes a montré différentes formes de rupture, ce lié au taux d'addition.

Dans l'éprouvette de référence, la rupture commence sous la forme de petites fissures horizontales sur les côtés jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement divisé en deux parties, soit avec une fente complètement horizontale, soit avec un angle incliné de 45°, comme indiqué dans la figures 3.2 (a) et (b).

De plus, avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc à 30% et 45%, le modèle de rupture diffère sous la forme d'une défaillance, qui est lancée en divisant la surface supérieure des côtés et qui plonge à l'intérieur de l'échantillon, entraînant sa défaillance complète, comme indiqué dans la figures 3.2 (c) et (d).

A 60%, l'éclatement se présente sous la forme d'une rupture fragile de l'échantillon, qui se présente sous la forme d'une éradication totale en séparant les granules de caoutchouc de la matrice d'argile, comme indiqué dans les figures 3.2 (e) et (f)

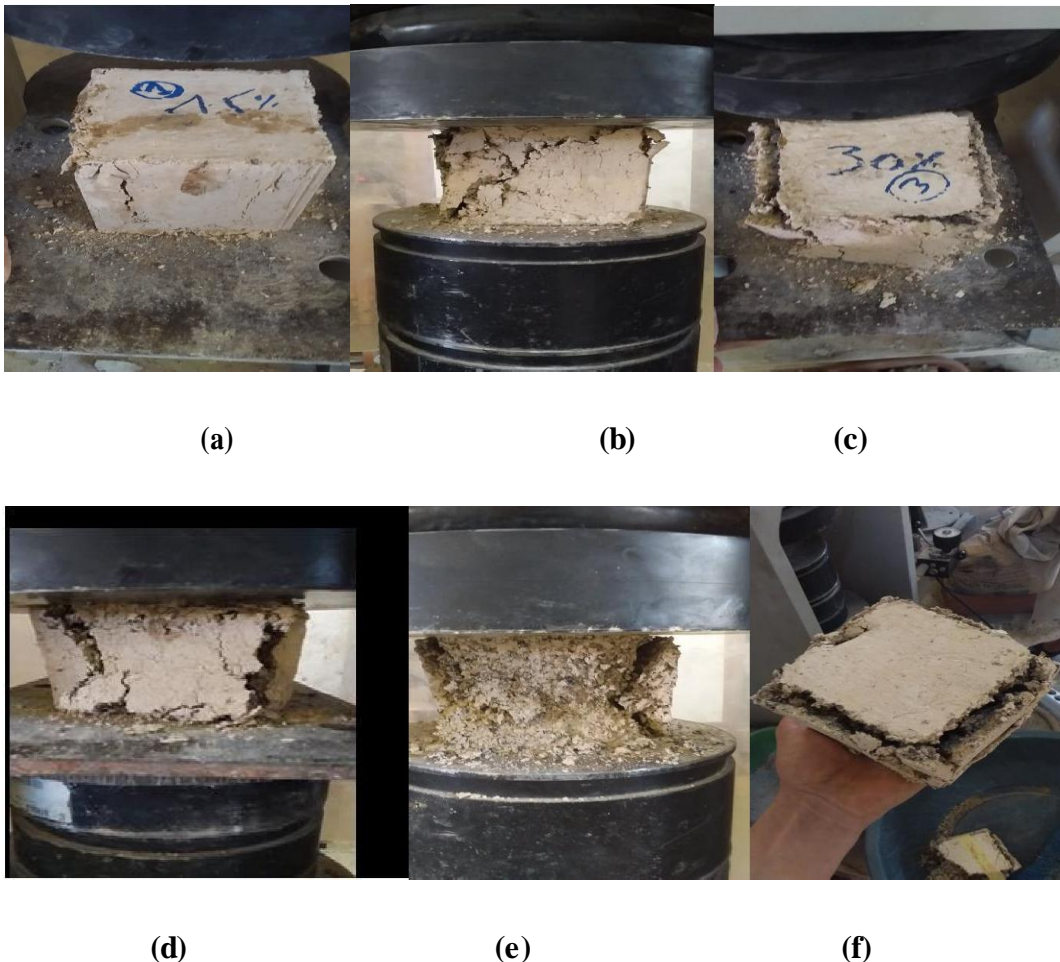


Figure 3.2 : (a), (b), (c), et (f) : Les modèles de rupture des éprouvettes après l'essai de compression.

3.3.1 Vitesse des ondes sonique

Dans notre travail, nous avons utilisé la mesure en transparence (directe) parce qu'il est utilisé dans plusieurs options, y compris dans le cas des éprouvettes. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

La vitesse de propagation du son dans les briques est un indice qui définit le taux de vide dans la matrice, ce dernier influence, directement, sur :

- la compacité ;
- la résistance à la compression ;
- l'isolation thermique et acoustique.

La figure 3.3 montre que la vitesse de propagation du son est diminuée en fonction de différents dosages en caoutchouc. Les valeurs varient entre (2920.12 m/s et 791.5 m/s) dans l'intervalle (0%, 60%) des GC.

Et plus en détail, on peut constater la diminution de la vitesse de propagation d'environ 30.67%, 55.24%, 60.03%, 72.89%, avec une variation de teneur de granulats en caoutchouc de 15%, 30%, 45%, 60%, successivement.

Cette résultat influence inévitablement sur la brique, qui réduit par conséquent sa compacité, la résistance à la compression et l'isolation thermique et acoustique.

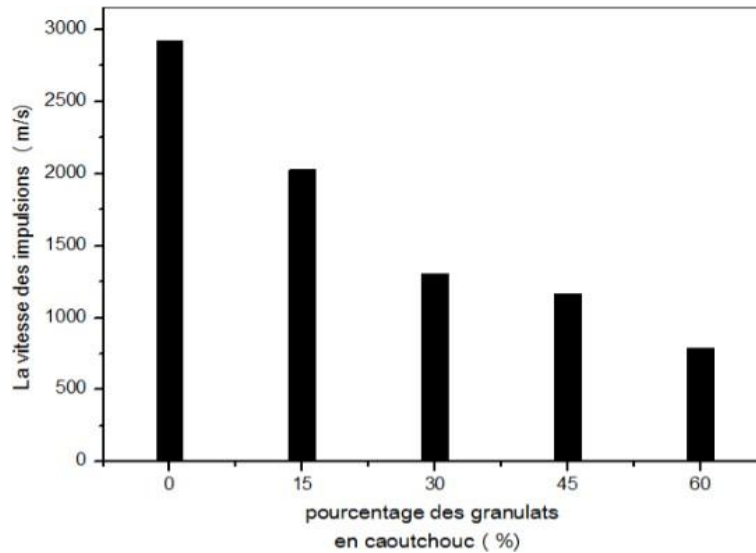


Figure 3.3 : La vitesse de propagation du son en fonction du dosage en caoutchouc.

Effet du dosage de granulats de caoutchouc sur la durabilité de l'adobe

Absorption capillaire

Dans cet essai, l'effet des granules de caoutchouc sur la capacité d'absorption était clair. De la figure 3.4, Nous constatons que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité augmente d'environ 4.13%, 11.83% et 23.32% avec l'incorporation de 15%, 30%, 45% de granulats de caoutchouc, successivement. Cette résultat est influé inconvenable sur la brique, Entre la valeur de 45% et 60% de GC, le coefficient d'absorption diminue d'environ 5,38% par rapport la dernière valeur (45%), mais augmente d'environ 18.97% par rapport autémoin.

Ilker Bekir Topcu, 2009, indiqué que les particules de caoutchouc ont une hydrophobicité élevée, ce qui augmente la porosité de la matrice de l'argile. Alors, augmente par conséquent son coefficient d'absorption

Mais on constate que le taux d'absorption est faible à 60%, et cela explique deux possibilités :

Soit la forte augmentation de la teneur en caoutchouc réduit les vides dans la structure interne.

Quant à l'exact opposé, c'est-à-dire lorsqu'il y a une augmentation excessive du pourcentage de vides, et par conséquent la structure de la brique n'empêche même pas l'eau qu'il faut absorbée.

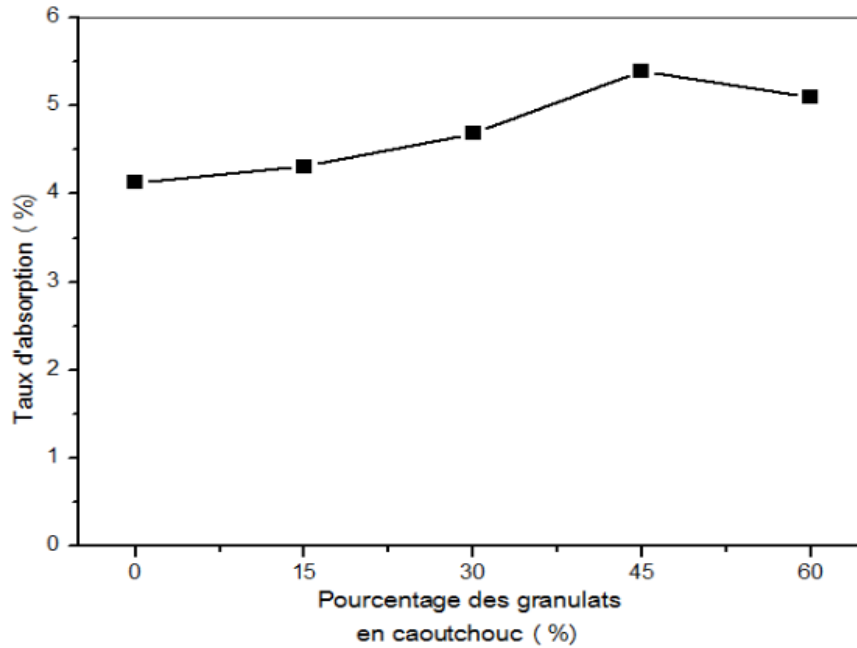


Figure 3.4 :Le taux d'absorption capillaire de l'adobe en fonction de la teneur en Caoutchouc.

Absorption totale

L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le contrôle du volume total des vides dans l'Adobe, est obtenue par immersion dans l'eau. La connaissance de la valeur d'absorption totale d'eau est importante peut être employée à définir la qualité et la classification selon la durabilité exigée pour son domaine d'utilisation.

Les résultats illustrés sur la Figure 3.5 montrent la variation de l'absorption d'eau avec l'introduction de granulats en caoutchouc.

À travers l'histogramme 3.5, On peut constater la diminution de l'absorption d'eau d'environ (3.95 et 8.88 %) avec une variation de la granules de caoutchouc de 15% à 30 % respectivement, l'augmentation de la teneur en GC ne résulte pas d'une réduction continue de l'absorption. parce qu'elle augmente d'environ (15.99 %) avec l'incorporation de l'ajout de GC pour atteindre la valeur maximale (21,69%) au ratio de 60%.

De cela, nous concluons que le meilleur résultat d'absorption ou bien la valeur optimale est 16.61% et c'est la valeur que nous avons obtenue après l'ajout de 30% de GC.

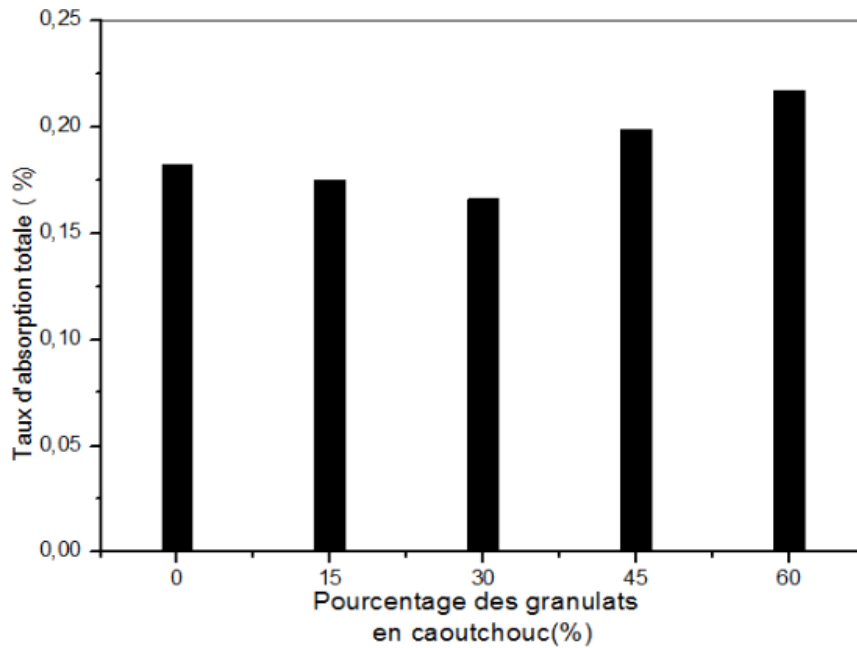


Figure 3.5 : Le taux d'absorption totale de l'adobe en fonction de la teneur en Caoutchouc.

Legonflement

Après avoir immersion des éprouvettes pendant une période laquelle le poids des éprouvettes a été stabilisé, les résultats présentés sur la figure 3.6 qui illustrent l'effet positif de l'addition de GC sur le risque de gonflement. Les valeurs de gonflement sont 8.43mm/m, 3.92 mm/m dans la gamme de 0% à 60 % de GC respectivement. On constate que le gonflement diminue avec l'augmentation du dosage de l'ajout, cette diminution commence par 3,08% jusqu'à 55,87% dans l'intervalle (15%, 60%) des GC, respectivement. Ce qui est un pourcentage significatif.

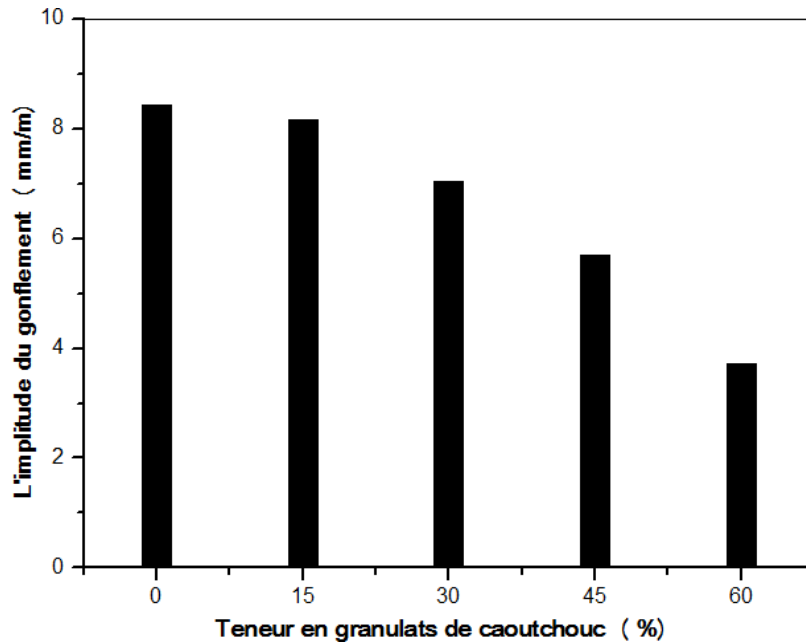


Figure 3.6 : L'amplitude du gonflement de l'adobe en fonction de la teneur en Caoutchouc.

Résistance à l'abrasion

D'après l'analyse de la Figure 3.7, on a remarqué que le coefficient de l'abrasion diminue avec l'augmentation de l'incorporation du granulat de caoutchouc. Les valeurs varient entre (48.97 et 5.22 cm²/g) dans la gamme de 0% à 60 % de GC, respectivement, où la plus grande valeur du coefficient d'abrasion est obtenue par 0% de GC. En termes de pourcentage la diminution de coefficient d'abrasion est de l'ordre de 89.34% avec une teneur de 60%. Ceci explique l'effet négatif de GC sur la résistance d'abrasion, cela est dû à la Hétérogénéité entre le GC et la matrice argileuse, ce qui crée une faible liaison entre les granulats de caoutchouc et la matrice de l'argile, en plus de ce que nous avons fait précédemment, les granules de caoutchouc augmentent la porosité de la brique d'argile donc il devient disjoint, lâche et non compacte. Les rendant non solides et plus vulnérables au risque de l'abrasion.

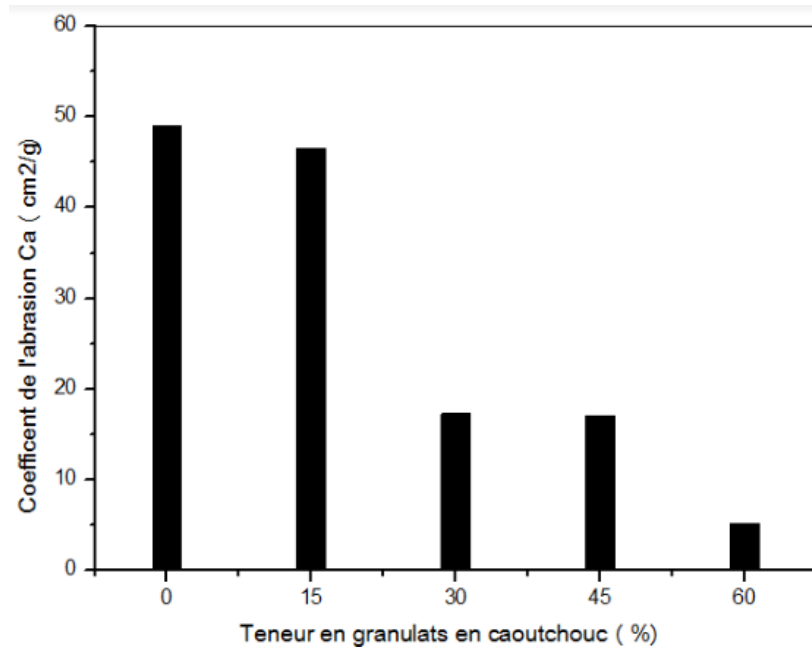


Figure 3.7 : Le coefficient d'abrasion de brique d'adobe (Ca) en fonction de la teneur en caoutchouc.

Conclusion

Cette chapitre nous a permis d'étudier les propriétés physico-mécaniques et durabilité de l'adobe en combinant des granulés de caoutchouc dans différentes proportions, en plus du stabilisant qui est représenté par la chaux, bien que ce dernier soit caractérisé par une réaction pouzzolanique lente, mais nous avons développé des méthodes de traitement et de réduction du temps de stockage qui nous permettent de Atteindre une résistance acceptable.

D'après l'étude expérimentale, nous pouvons tirer les principales conclusions suivantes :

- Une diminution de la masse volumique apparente jusqu'à 43 5,79 kg / g a été observée avec une augmentation de la teneur en GC de 60%, ce qui est une valeursignificative.
- La résistance mécanique diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc d'environ 85.74% avec la teneur de 60%, et un changement du motif d'éclatement associé au changement du rapport de GC.
- Concernant l'absorption, le pourcentage d'absorption capillaire augmente avec l'augmentation de la teneur 15%, 30%, 45% en GC successivement, jusqu'à atteigne 23.32% qui donne par la teneur de 45% et augmentée d'environ 18.97 par rapport au témoin. Quant à l'absorption totale, la valeur la plus basse est adoptée par l'addition de 30% qui égale a 16.61%.
- Une diminution très significative de la valeur de gonflement avec une augmentation de la teneur en GC d'environ 3.08% avec la teneur de 15%

Une diminution de la valeur de la résistance à l'abrasion avec une augmentation de la teneur en GC d'environ 89.34% avec la teneur de 60%

- La vitesse des impulsions diminue avec une augmentation de la teneur en GC d'environ 30.67% avec la teneur de 15%.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Comparée à d'autres matériaux de construction industriels tels que le béton, l'acier et la brique d'argile cuite, la terre offre des caractéristiques supérieures telles que l'isolation thermique élevée, la régulation de l'humidité, le respect de l'environnement et la durabilité.

Ces caractéristiques ont récemment encouragé les chercheurs et les firmes d'ingénierie à utiliser la terre dans leurs nouveaux projets de construction.

Il y'a beaucoup de techniques pour utiliser la terre dans la construction, ceci est observé à travers les bâtiments du patrimoine : le pisé, le torchis, la terre paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée, l'adobe ...etc. Ce dernier est utilisé dans ce travail, c'est une technique ancienne, dénommé la brique de terre crue, qui a une évolution moderne. Comparé à l'adobe ancien, la brique d'Adobe moderne présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

L'objectif principale de ce travail est étudié les effets du déchet de granulats de caoutchouc sur la résistance mécanique et la durabilité des briques d'adobes qui ont stabilisé à la chaux. Le choix de ce matériau est justifié par leur faible coût et par leur abondance en quantités importantes en Algérie, en plus d'être des déchets, donc son exploitation dans le domaine de la construction ou d'autres domaines en soi est un avantage.

Pour atteindre notre but, nous avons divisé notre étude en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la revue bibliographique qui a permis de mettre en évidence l'intérêt de recherches sur :

* La recherche sur la terre qui comprenait les Techniques de construction en terre, la fraction solide de la terre, Classification des argiles, les familles d'argile, les procédés de la stabilisation ;

* La recherche sur le déchet de caoutchouc de pneu qui comprenait la Source et compositions, Les étapes indispensables au recyclage, L'effet des agrégats de caoutchouc sur les caractéristiques du béton ;

* La recherche sur Processus physico-chimiques des réactions chaux -sol argileux qui comprenait l'Hydratation, l'ionisation, l'échange cationique, la floculation et l'agglomération,

réaction pouzzolaniques, Carbonatation, et en fin l'influence de l'ajout de chaux sur les résistances mécaniques des briques de terre crue.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit : sol local d'Alia-Biskra, chaux vive de Saida, sable concassé et déchet de caoutchouc de pneu comme un ajout. Ensuite, nous avons procédé à l'élaboration des différentes formulations et la confection des briques et finalement la phase des essais.

Le troisième chapitre rassemble l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Nous avons étudié l'effet de déchet de granulats en caoutchouc sur les résistances mécaniques et la durabilité de la brique s d'adobe stabilisé par la chaux.

D'après les résultats expérimentaux on peut tirer les points suivants :

- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc diminué la résistance à la compression des briques d'adobe d'environ 10.37% avec une teneur 15% par rapport au témoin.
- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc diminué la masse volumique apparente des briques d'adobe d'environ 27% avec une teneur 60% par rapport au témoin.
- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc augmente l'absorption capillaire des briques d'adobe d'environ 4.13%, 11.83% et 23.32% avec l'incorporation de 15%, 30%, 45%, successivement, mais diminue si le taux d'addition dépasse 45% c'est-à-dire dans l'intervalle (45%, 60%) et dans le même intervalle elle est plus grand d'environ 18.9% par rapport au témoin.
- Le pourcentage de granulats en caoutchouc de 30% donne la valeur minimale de l'absorption totale 16.61%. En terme de pourcentage, qui inférieure de 8.88 % par rapport au témoin.
- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc diminué la valeur de la résistance à l'abrasion des briques d'adobe d'environ 4.94% avec une teneur 15% par rapport au témoin.
- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc diminué la vitesse des ondes des briques d'adobe d'environ 72.89%, avec une teneur de 60%.
- L'ajout du déchet de granulats en caoutchouc diminué la valeur de gonflement des briques d'adobe d'environ 55,87%, avec une teneur de 60%.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aliapur- le recyclage des pneus usagés, comment ça marche ?,video, (2013)

Angelin .A.F, Miranda Jr .E.J.P , Dos Santos .J.M.C, Lintz .R.C.C, Gachet-Barbosa .L.A, Rubberized mortar: the influence of aggregate granulometry in mechanical resistances and acoustic behavior, *Constr. Build. Mater.* 200 Gachet-Barbosa ,248–254,(2019).

Angelin.A.F, Da Silva .F.M, Barbosa .L.A.G, Lintz.R.C.C, DeCarvalho.M.A.G, Franco .R. A.S, Voids identification in rubberized mortar digital images using KMeansand Watershed algorithms, *J. Clean. Prod.* 164 ,455–464,(2017).

Aslani.F, Ma.G, YimWan.D.L, Tran Le.V.X, Experimental investigation intorubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of selfcompactingconcrete, *J. Clean. Prod.* 172 (2018).

Banadaki H M, Morshed R, Eslami A. In-plane cyclic performance of adobe walls retrofitted with near-surfacemounted steel rebars, *Engineering Structures* 194, 106–119, (2019).

Baricevic .A, Pezer .M, Rukavina .M.J, Serdar .M, Stirmer .N, Effect of polymerfibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete, *Constr. Build. Mater.*176,135–144, (2018).

Bell, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils .*Engineering Geology* 42 (1996), 223-237, (1996).

BELLEBCIR, O.Effet des déchets de palmier dattier sur la durabilitéde l’adobe stabilisé à la chaux. Mémoire de Master .UniversitéMohamedkhider –Biskra. p 64. (2019).

Bish, DL, Von Dreele, RB. Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions inkaolinite, Locality: Keokuk, Iowa, USA, Note: clay Clays and Clay Minerals, v. 37, p. 289-296. 1989.

Boardman, D, Glendinning, S. and Rogers, C, 'Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes', *Geotechnique* 51(6), 533-543, (2001).

Bouanini S, Assessing the Management of Municipal Solid Waste for Well-Being Fulfillment in Algeria [dissertation]. Nanchang University, China 2012.

Bruno, P. Terre crue, techniques de construction et de restauration, Collection : Au pied du mur, Editions Eyrolles, (2005).

Chen .J.H, Chen. K.S, Tong .L.Y, On the pyrolysis kinetics of scrap automotive tires, J. Hazard. Mater. 84 , 43–55, (2001).

CRAterre (Centre international de la construction en terre), l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, 1979

Da Silva. F.M, Barbosa .L.A.G, Lintz .R.C.C, Jacintho .A.E.P.G.A, Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber, Constr. Build. Mater. 91, 71–79, (2015).

Delbecque, D. Approche contemporaine de la construction en terre Histoire de la construction en terre, (2011).

Diamond, S. White, J. L. and Dolch, W. L, 'Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack : Technical paper', (1963).

Diamond, S., White, J. L., et Dolch, W. L. Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. Proceedings, 12th National Conference on Clays and Clay Minerals, 359-379. (1964).

Djemaci ,B, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité [Municipal waste management in Algeria: Analysis prospective and efficiency elements] [dissertation]. Université de Rouen (2012).

Eades, J. L., et Grim, R. E, A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway Research Board Bulletin , n°139, 61 -72, (1966).

Eades, J. L., et Grim, R. E. Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization. Highway Research Board, Bulletin 262, 51-63. (1960).

Elouahabi M. Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc. Thèse de Doctorat, Université de Liège France, p 189, 2013.

ETRMA's statistics on scrap tire collection and recycling in Europe, (n.d.).

<https://weibold.com/etrmas-statistics-on-scrap-tire-collection-and-recycling-in-europe/>

(accessed April 8, 2019).

Fraile-Garcia. E, Ferreiro-Cabello. J, Mendivil-Giro.M, Vicente-Navarro. A.S, Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped withwastetyre rubber, *Constr. Build. Mater.*176 (2018).

Gerges .N.N , C.A. Issa.C.A, Fawaz.S.A, **Rubber concrete:** Mechanical anddynamical properties, *Case Stud. Constr. Mater.* 9 (2018).

Gesoglu, M., Güneyisi, E . Permeability properties of self-compactingrubberized concretes. *Construct. Build. Mater.*25 (8), 3319e3326, (2011).

Global Tire Recycling Market Share, Size, Trends Analysis | Forecast 2024, (n.d.).

Gonen .T, Freezing-thawing and impact resistance of concretes containingwaste crumb rubbers, *Constr. Build.Mater.*177 ,436–442,(2018).

Gonen.T, Freezing-thawing and impact resistance of concretes containingwaste crumb rubbers, *Constr. Build.Mater.*177, 436–442, (2018).

Guneyisi E, Gesoglu M, Ozturan T, Properties of rubberized concretes containing silica fume, *J CemConcr. Res.* 34, 2309–17. (2004) .

Guo, H., Yu, Y., Skitmore, M. Visualization technology-based construction

Gupta .T, Chaudhary .S, Sharma .R.K, Assessment of mechanical and durabilityproperties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.*73 (2014).

Gupta .T, Siddique .S, Sharma .R.K, Chaudhary.S,Behaviour of waste rubberpowder and hybrid rubber concrete in aggressive environment, *Constr. Build.Mater.*217 , 283–291, (2019).

Hibouche A. Sols traité aux liants, performance hydro - mécaniques et Hydro thermiques application aux BTP. Thèse de doctorat, U niversitédehavre France: 231p, 2013.

Hilt, G. H. and Davidson, D. 'Lime fixation in clayey soils', *Highway Research Board Bulletin,* (1960).

Houben H, Guillaud H. *Earth construction—a comprehensive guide.*
London:IntermediateTechnology,1994.

Houben H, Guillaud H. *Traité de construction en terre.* CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, , 355 p, 2006.

IlkerBekirTopcu, TurhanBilir, Experimental investigation of some fresh and hardened

Islam.M.S, K. Iwashita, Earthquake resistance of adobe reinforced by low cost traditional materials, *J. Nat. Disaster Sci.* 32, 21, (2010).

ISO 2781:2008. Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of density

Izemouren O, Guettala A. Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. *Matec web of conférence*, vol 11 02001, 2014.

Izemouren, W. Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée. Thèse de doctorat, Université de Biskra, P 154, 2016.

Kaewunruen .S, D. Li, Chen. Y, Xiang. Z, Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber, *Materials (Basel)* 11, 1169, (2018).

Krishna C. Baranwal, Akron rubber development laboratory, ASTM standards & testing of recycle rubber, in: *Rubber Div. Meet. Am. Chem. Soc., San Francisco, California, 2003.*

Lambe TW. The Structure of Inorganic Soil, *Proceeding. ASCE*, Vol. 79, Separate No.315, 49p, 1953.

Li. Y, Zhang. S, Wang .R, Dang .F, Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete – A comprehensive review, *Construction and Building Materials* 225, 1183–1201, (2019).

Little, D. N, Fundamentals of the stabilization of soil with lime. *Bulletin of National Lime Association*, 1987, 322, 17, (1987).

Little, D. N. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. *National Lime Association*, Arlington, 219, (1995).

Locat, J. Bérubé, M. A. et Choquette. M, Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, 294-304, (1990).

López -Zaldívar .O, Lozano -Díez .R, Herrero del Cura .S, Mayor -Lobo .P, Hernández -Olivares. F, Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life tire rubber mortars, *Constr. Build. Mater.* 150, 558–567, (2017).

Marrot L, Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique. (2010).

MATE (2008a) : « Les acquis du Programme National de Gestion intégrée des Déchets Ménagers et assimilés (PROGDEM) », janvier 2008.

Mering J, Pedro G. Discussion a propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1: Bulletin du groupe français des argiles, v. 21, p. 1-30, 1969.

Mesbah, et al., Development of a direct tensile test for compacted earth blocks

Michel J. Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction. Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics Série Matériau x N°339, pp.22 -35, 1999.

Mitchell JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437pp, 1993.

Muñoz P, Letelier V, Muñoz L, Bustamante M A. Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties, Construction and Building Materials 254, 119314, (2020).

Muñoz -Sánchez B, Arévalo-Caballero .M.J, Pacheco-Menor.M.C, Influence of acetic acid and calcium hydroxide treatments of rubber waste on the properties of rubberized mortars, Mater. Struct. 50, 75, (2017).

Muñoz -Sánchez B, Arévalo-Caballero .M.J, Pacheco-Menor .M.C, Influence of acetic acid and calcium hydroxide treatments of rubber waste on the properties of rubberized mortars, Mater. Struct. 50 , 75, h, (2017).

NEDJAH A. RAOUF Et DJOUDI ABDELKRIM, STABILISATION DES SOLS GONFLANTS PAR AJOUT DES LIANTS HYDRAULIQUES, MEMOIRE de master, Université Mohamed Chérif Mesaadia SOUK-Ahras, P 113, 2015.

Neil N. Eldin, Ahmed B. Senouci, Measurement and Prediction of the Strength of Rubberized Concrete, Cement & Concrete Composites. 16 (1994) 287-298.

NF P 18-418, Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. AFNOR, 12p. December 1989.

NF P 94-054 Sols reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Octobre 1991 NF P 94 -056. Analyse granulométrique des sols tamisage à sec après lavage. AFNOR; p 15, 1996.

NF P 94-077 Sols:reconnaissance et essais - Essais de compression uniaxiale. Décembre 1997

NF P18-404, Béton -essai d'information-convenance et de contrôle -confection et conservation des éprouvettes. AFNOR, 04pDecember 1981.

NF P18-592. Essai au bleu de méthylène. AFNOR ; p 5. 1996.

NF P94-01.Granulometric analysis of soils (by sedimentation method).AFNOR; 17p, May1992.

NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg –Limite de liquidité à la coupelle Limite de plasticitéau rouleau. AFNOR ; 15 pages, 1993.

NF XP P13-901.Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications -Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR ; p. 35.2001.

NGUYEN Thi-Thanh-Hang, Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel, THESE, Université Paris -Est, p 332.

Ordinip,<http://www.ordinip.com/dechets?id=6>, consulté le 1 -11-16.3065.(2009).

Ouedraogo M, Dao K, Millogo Y, Aubert J-E, Messan A, Seynou M, Zerbo L, Gomina M. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio(*Digitariaexilis*) straw, *Journal of Building Engineering* 23, 250–258,(2019).

Poppe, L.J., Paskevich, V.F., Hathaway, J.C., Blackwood, D.S.,A laboratory manual for X-ray powder diffraction. U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-041, 2001.

properties of rubberized self-compacting concrete, *Materials and Design*. 30, 3056–

Prusinski, J. R. and Bhattacharja, S, 'Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils', *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 1652(1), 215-227,(1999).

Quagliarini E, Lenci S. The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks, *Journal of Cultural Heritage* 11, 309–314, (2010).

Raffoul, S, etal.Behaviour of unconfined and FRP-confined rubberisedconcrete in axial compression. *Construct. Build. Mater.*147, 388e397, (2017).

Ramarad. S, Khalid. M, Ratnam. C.T, Chuah.A.L, Rashmi. W, Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future, *Prog.Mater. Sci.* 72 , 100–140, (2015).

Ramdani,S. Etude de l'influence de l'incorporation dans le béton des déchets recyclés issus du broyage des pneus usagés et verre broyé sur leurs caractéristiques et comportement. (Performance behavior of concrete made with waste rubber aggregates from grinding used tires and glass waste.),Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.

Rao, S. M., etShivananda, P. Swelling behaviour of lime stabilized specimens after wetting and drying cycles. *Workshop in clay behaviour: chemico-mechanical coupling from nanostructures to engineering applications*, vol.2, Italy, (2001).

Reinforced with natural fibers, J. Mater.*Civ. Eng.* 16, 95–98, (2004).

Richardson .A, Coventry .K, Edmondson .V, Dias .E, Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size), *J. Cleaner Prod.* 112, 599–606, (2016).

Rivas-Vázquez.L.P, Suárez-Orduña. R, Hernández -Torres .J, Aquino-Bolaños .E, Effect of the surface treatment of recycled rubber on the mechanical strength of composite concrete/rubber, *Mater.Struct.* 48 (9) , 2809–2814, (2015).

Safety management: a review. *Autom.ConStruct.* 73, 135e144, (2017).

Seco .A, Omer J. Marcelino, S. Espuelas, S. Prieto, E. Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials* 167 154–165.(2018).

Serrano S, Barreneche C, Cabeza L F. Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation, *Construction and Building Materials* 108, 105–111, (2016).

Serrano S, Barreneche C, Cabeza L F. Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation, *Construction and Building Materials* 108, 105–111, (2016).

Si. R.Z, Guo .S.C, Q.L. Dai, Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles, *Constr. Build. Mater.*153, 496–505, (2017).

Thomas .B.S, Gupta .R.C, Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *J. Cleaner Prod.* 113, 86–92, (2016).

Thomas, B.S., Chandra Gupta, R. Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *J. Clean. Prod.* 113, 86e92,(2016).

Thomas. B.S, R.C. Gupta, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *J. Clean. Prod.* 102, 78–87,(2015).

U.S. Tire Manufacturers Association | The national trade association for tire manufacturers that make tires in the U.S., (n.d.). <https://www.ustires.org/>(accessed April 8, 2019).

U.S. Tire Manufacturers Association | The national trade association for tire manufacturers that make tires in the U.S., (accessed April 8, 2019).

Walker,P. Bond Characteristics of earth block masonry, *J. Mater. Civ. Eng.* 11, 249–256, (1999).

Wang .R.,Gao .P.W., Tian .M.H., Y.C. Dai, Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber, *Constr. Build. Mater.* 209,655–664, (2019).

XP P 94-060-1 : - Sols : reconnaissance et essais; Essai de dessiccation - Partie 1 : détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 µm d'un matériau - AFNOR (ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION), décembre 1997 .

Zami.M.S, A. Le, Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – state-of-the-art review, *J. Build.Apprais.* 5, 259–271, (2010).

Zerrouki I, l'effet de sable concassé et le déchet de brique rouge sur la résistance d'Adobe, mémoire master, université mouhammed khider, biskra, 2019.