

THÈSE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de Recherche en Énergie

*Structure de Recherche : Équipe de Modélisation et Simulation en Mécanique
et Énergétique*

Discipline : Physique

Spécialité : Mécanique, Énergétique et Génie Civil

Présentée et soutenue le 03/07/2021 par :

Samir NASLA

*Modélisation et Caractérisation des Propriétés Mécaniques, Thermiques,
Physico-Chimiques et Minéralogiques des Blocs de Terre Stabilisée par une
Distribution Aléatoire des Fibres et la Chaux.*

JURY

Kamal GUERAOUI	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Président / Rapporteur
Abdellah GUENBOUR	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Rapporteur / Examineur
Mohammed DRIOUICH	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	Rapporteur / Examineur
Mohammed Ouadi BENSALAH	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Examineur
Bennasser BAHRAR	PES, Université Hassan II, École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique - Mohammedia	Examineur
Mohammed TAIBI	PH, Université Hassan II, Faculté des Sciences Aïn Chock – Casablanca	Examineur
Mohammed CHERRAJ	PH, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2020/2021



Remerciement

Avant tout développement, la politesse et la courtoisie voudraient que j'exprime toute ma reconnaissance vis-à-vis de toute personne ayant favorisée l'aboutissement de ce travail, réalisé au sein du laboratoire de Modélisation et Simulation en Mécanique et Énergétique du département de physique à la Faculté des Sciences, université Mohammed V - Rabat, dans le cadre d'une thèse de doctorat, sous la direction de Monsieur ***Mohammed CHARRAJ***, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences de Rabat.

Mes plus sincères remerciements vont à mon directeur de thèse Monsieur ***Mohammed CHARRAJ***, Professeur Habilité à la Faculté des sciences de Rabat, pour m'avoir accueillie et intégrée dans l'équipe de recherche. Il m'était une source d'encouragements comme d'inspirations à travers ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa contribution, sa grande gentillesse et sa patience. Merci beaucoup pour les précieux conseils, les critiques constructives, les fructueuses discussions toutes les étapes de cette étude.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur ***Kamal GUERAOU***, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir bien voulu accepter la présidence du jury. Également, Vous m'avez fait l'honneur d'avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse. Veuillez recevoir l'expression de mes vifs remerciements et de mon profond respect.

Je tiens à remercier, également, le Rapporteur et Examineur de ce travail, Monsieur ***Abdellah GUENBOUR***, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, pour l'intérêt qu'il a témoigné à l'égard de mon travail.

J'aimerais aussi remercier Monsieur ***Mohammed DRIOUICH***, Professeur Habilité à la Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane Béni Mellal, en qualité de Rapporteur et Examineur, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et de consacrer une partie de son temps à son analyse.

Je tiens à remercier Monsieur ***Mohammed Ouadi BENSALAH***, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, en qualité d'examineur, d'avoir accepté de siéger parmi les membres de jury, d'avoir apporté ses observations scientifiques et d'avoir révisé soigneusement mon rapport de thèse.

Je tiens également à adresser mes remerciements à Monsieur ***Bennasser BAHRAR***, Professeur de l'enseignement supérieur à l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique Mohammedia, Université Hassan II Casablanca, pour l'honneur et le privilège qu'il

me fait de juger et examiner ce modeste travail. Veuillez recevoir, Monsieur, l'expression de mes respectueux sentiments.

Je suis très honoré que Monsieur **Mohammed TAIBI**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences Aïn Chock, Université Hassan II Casablanca, ait accepté d'être Examineur de ce travail. Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde considération.

Je remercie énormément tous les membres du jury pour leur disponibilité le jour de ma soutenance, pour le privilège qu'ils m'ont accordé par leur présence et pour l'intérêt qu'ils ont attribué à mon mémoire de thèse. Je tiens à vous remercier encore une fois d'avoir accepté de vous déplacer pour partager avec moi l'un des moments les plus mémorables de toute ma vie. Ces moments qui risquent de créer un événement inoubliable pour le reste de mes jours.

Je tiens à remercier aussi tous mes professeurs et mes collègues avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et de partager les connaissances scientifiques en particulier le doctorant **Youssef JAMIL**, la doctorante **Khadija BOUGTAIB**, le doctorant **Yassine EL MAATOUFI**, Dr. **Fadoua EL YAHYAOU**I et l'étudiante **Hajar El BOUAZZAOU**I. Je suis heureux de leur témoigner ici toute ma reconnaissance et ma sympathie.

Je suis seul à signer cette thèse et pourtant de nombreuses personnes ont contribué par leur aide, leur soutien et leurs conseils à la faire exister. Je tiens à remercier très sincèrement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

Résumé

Dans ce travail, nous avons choisi le bloc de terre comme matériau de base utilisé dans la construction au Maroc surtout dans les zones rurales, que l'on mélange avec quelques stabilisateurs comme les fibres de paille, les fibres d'aiguille de pin et la chaux dans différents taux séparément. Afin de valoriser les matériaux locaux et de contribuer à la réduction des coûts de construction et de l'énergie consommée pour le chauffage ou la climatisation, ces fibres de surface ont été utilisées pour stabiliser les blocs de terre. Dans ce cadre, nous avons choisi la région de Had Laghoualem (KHEMISSSET) comme lieu de provenance des matériaux utilisés dans notre recherche.

Les objectifs de ce travail sont l'étude et la caractérisation chimique et minéralogique du sol et des fibres afin de pouvoir préciser l'effet de la stabilisation chimique par la chaux et les fibres de paille et de pin sur les propriétés mécaniques et thermiques des briques de terre stabilisée.

Les résultats thermiques montrent que la conductivité thermique des échantillons de blocs de terre stabilisée est inversement proportionnelle à la quantité des stabilisateurs de fibres de paille et de pin et que la conductivité thermique diminue et dépend considérablement de la teneur à la chaux. Les essais montrent également que les résistances en compression est augmentée en fonction de l'augmentation de la teneur à la chaux jusqu'à 7% (optimum) et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 10 %. De même, lorsqu'on augmente la teneur en fibres stabilisatrices, la simple résistance à la compression des blocs augmente, ce qui signifie que le matériau devient plus dur et plus compact.

Mots clés : Bloc de Terre Stabilisée, Fibre, Chaux, Aiguille de Pin, Paille, Propriétés Thermique, Propriétés Mécaniques, Conductivité Thermique.

Abstract

In this work, we have chosen the block of earth as a basic material used in construction in Morocco especially in rural areas, which is mixed with some stabilizers such as straw fibers, pine needle fibers and lime in different rates separately. In order to enhance local materials and help reduce construction costs and the energy consumed for heating or air conditioning, these surface fibers were used to stabilize the earth blocks. In this context, we have chosen the region of Had Laghoualem (KHEMISSET) as the place of origin of the materials used in our research.

The objectives of this work are study the chemical characterization and mineralogical of soil and fibers in order to be able to specify the effect of the chemical stabilization by lime, straw and pine fibers on the mechanical and thermal properties of earth bricks.

The thermal results show that the thermal conductivity of the samples of stabilized earth blocks is inversely proportional to the amount of stabilizers of straw and pine fibers and that It's decreases and depends considerably on the lime content. The tests also show that the compressive strength is increased as the lime content increases up to 7% (optimum) and beyond this threshold a decrease of up to 10% is observed. Likewise, as the content of stabilizing fibers increases, the simple compressive strength of the blocks increases, which means that the material becomes harder and more compact.

Key words: Stabilized Earth Block, Fiber, Lime, Pine Needle, Straw, Thermal Properties, Mechanical Properties, Thermal Conductivity.

Table des Matières

Remerciement.....	1
Résumé.....	3
Abstract.....	4
Table des Matières.....	5
Liste des figures.....	8
Liste des Tableaux.....	10
Introduction générale.....	11
Chapitre I : Synthèse Bibliographique.....	14
I. Introduction :.....	15
II. Histoire de la construction en terre crue :.....	17
III. Composition de la terre crue.....	18
A. Techniques de construction en terre crue.....	19
B. Caractéristiques de brique terre crue (Adobe, Pisé, Brique de terre comprimée).....	34
C. Briques en terre cuite.....	34
1. Constituants de bases.....	35
2. Étapes de fabrication.....	35
3. Comparatif des trois briques en terre cuite en fonction de leur Propriétés thermomécaniques.....	40
IV. Conclusion.....	40
Chapitre 2 : Matériaux, appareils et techniques utilisés.....	41
I. Introduction.....	42
II. Caractéristiques des matériaux.....	42
A. Sol.....	42
1. Présentation du site de prélèvement.....	43
2. Caractérisation du sol étudié.....	44
B. Chaux.....	45
1. Présentation.....	45
2. Inventaire et méthodes d'utilisation de la chaux pour la stabilisation.....	46
3. Chaux utilisée.....	47
C. Fibres.....	47
1. Introduction.....	47
2. Fibres de Paille.....	48
III. Appareils et Techniques utilisés.....	53
A. Technique d'analyse Granulométrie.....	53

1.	Généralités	53
2.	Sédimentométrie	54
3.	Granularité optimale	55
4.	Les limites d'Atterberg	55
B.	Techniques de l'analyse chimique et minéralogique.....	57
1.	Diffraction des rayons X (DRX).....	57
2.	Microscopie électronique à balayage et microanalyse.....	62
3.	La spectroscopie infrarouge (IR)	65
4.	Mesure de pH.....	66
C.	Techniques des analyses mécaniques et Thermique.....	67
1.	Propriétés mécaniques	67
2.	Propriétés thermiques.....	68
IV.	Conclusion.....	69
	Chapitre 3 : Caractérisation et Élaboration des Matériaux	70
I.	Caractérisations des matériaux	71
A.	Propriétés du sol	71
1.	Analyse Granulométrique	71
2.	Limites d'Atterberg.....	71
3.	Mesure de pH.....	72
4.	Diffraction des rayons X (DRX).....	73
5.	Microscopie électronique à balayage et microanalyse (MEB)	74
6.	Spectroscopie Infrarouge (IR).....	75
B.	Propriété de la Chaux utilisée	76
C.	Fibres de Paille	78
D.	Fibres d'aiguilles de Pin.....	80
II.	Élaboration des matériaux	82
A.	Mélange	82
B.	Codification des mélanges.....	84
C.	Réalisations des éprouvettes	85
III.	Conclusion :.....	86
	Chapitre 4 : Résultats et Discussion	87
I.	Introduction	88
II.	Effet de la présence de la chaux sur la résistance à la compression simple des BTS	88
III.	Influence du taux de la chaux sur la conductivité thermique des BTS	90
IV.	Influence du taux des fibres sur la conductivité thermique des BTS	91

V. Résultats de l'analyse mécanique de l'effet des fibres sur des BTS	93
VI. Conclusion.....	95
Conclusion générale	97
Bibliographie.....	99

Liste des figures

Figure 1. 1: Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue [22]	18
Figure 1. 2: Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge [33]	19
Figure 1. 3: Brique d'adobe séchant au soleil [35]	22
Figure 1. 4: Brique d'adobe de différentes tailles [36]	23
Figure 1. 5: Brique d'adobe [40].....	24
Figure 1. 6: les meilleures terres à pisé se composent de 0 à 20 % de graviers, de 40 à 50 % de sable, de 20 à 35 % de limon,.....	25
Figure 1. 7: Préparation de la terre [41]	26
Figure 1. 8: Montage des coffrages [41]	26
Figure 1. 9: Tassement de la terre [41].....	27
Figure 1. 10: murs en pisé [41].	27
Figure 1. 11: Le torchis [42].....	28
Figure 1. 12: les étapes de construction d'un mur en torchis [42].....	30
Figure 1. 13 : Briques de terre crue comprimée – BTC [41].....	31
Figure 1. 14: Extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique [42].	36
Figure 1. 15: Préparation de l'argile [42].	36
Figure 1. 16 : Briques pleines.....	37
Figure 1. 17: Briques de parement [42].....	38
Figure 1. 18: Briques perforées en terre cuite	38
Figure 1. 19: Briques creuses	38
Figure 1. 20: tuiles à emboîtement	39
Figure 1. 21: Les étapes de fabrication de brique en terre cuite [47].	39
Figure 2. 1 : Couches du Sol [48].....	43
Figure 2. 2: Localisation de site de prélèvement [49].	44
Figure 2. 3: sol étudié.....	44
Figure 2. 4: chaux étudiée	46
Figure 2. 5: (a) Gerbes de blé fauché à la main ; (b) Bottes rectangulaires de paille de blé ; (c) construction aux fibres de paille [53].	48
Figure 2. 6: Fibres de paille utilisées.....	49
Figure 2. 7 : Structure microscopique et moléculaire de la paille de blé [54].	49
Figure 2. 8: Arbre d'aiguille de Pin.	51
Figure 2. 9: Coupe transversale d'une aiguille de Pin.....	52
Figure 2. 10: Fibre d'aiguilles de pin.....	52
Figure 2. 11: Diagramme de l'influence de l'énergie de compactage sur la masse volumique sèche et la T.E.O.	53
Figure 2. 12: Technique de Tamisage.	54
Figure 2. 13: Équipement pour sédimentométrie.	55
Figure 2. 14: Test de sédimentation.	55
Figure 2. 15: Appareillage de limites d'Atterberg.	56
Figure 2. 16: Présentation des limites d'Atterberg.	56
Figure 2. 17: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X [58].....	58
Figure 2. 18: Condition de Bragg. Schéma de réflexion d'une famille de plans réticulaires (hkl) [59].	59

Figure 2. 19: Diffractogramme type d'une fibre de chanvre entre 10° et 40°.....	61
Figure 2. 20: Photo de diffractomètre.	62
Figure 2. 21: Microscope électronique à balayage.....	63
Figure 2. 22: Schéma de fonctionnement de MEB.	63
Figure 2. 23: Interaction entre le faisceau électronique et l'échantillon [62].	64
Figure 2. 24: Spectromètre Infrarouge.	66
Figure 2. 25: pH-mètre.....	66
Figure 2. 26: Matériau expérimental de l'essai de compression.	67
Figure 2. 27: CT-METRE.	68
Figure 3. 1: Courbes granulométriques de la terre de Had Laghoualem.....	71
Figure 3. 2: Essai d'Atterberg.	72
Figure 3. 3: Spectre de diffraction des rayons X de la Terre de Khemissat.....	73
Figure 3. 4: Micrographies MEB d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.	74
Figure 3. 5: Analyses EDS des zones d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.	75
Figure 3. 6: Spectres infrarouges d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.	76
Figure 3. 7: Photographie MEB de la chaux.	77
Figure 3. 8: Analyse EDS de la chaux.	77
Figure 3. 9: Spectres de diffractions des rayons X de la chaux.....	78
Figure 3. 10: Spectre de diffraction des rayons X sur paille utilisée.....	79
Figure 3. 11: Spectres Infrarouges des échantillons : paille.....	79
Figure 3. 12: Spectre de diffraction des rayons X d'une aiguille de pin de notre échantillon..	80
Figure 3. 13: Spectres infrarouges des échantillons : aiguille de pin.	81
Figure 3. 14: Moules en bois.	82
Figure 3. 15: Mélange avec la chaux.....	83
Figure 3. 16: Mélange avec les fibres paille.....	83
Figure 3. 17: Mélange avec les fibres d'aiguilles de pin.	83
Figure 3. 18: Éprouvettes en terre avec des fibres de paille.....	85
Figure 3. 19: Éprouvettes en terre avec des fibres d'aiguilles de pin.	86
Figure 3. 20: Éprouvettes en terre avec de la chaux.....	86
Figure 4. 1 : Résistance à la compression de BTS en fonction du dosage de la chaux.....	89
Figure 4. 2 : Conductivité thermique de BTS en fonction du % de la chaux.....	90
Figure 4. 3: conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres de paille et en fibres d'aiguille de pin.	92
Figure 4. 4 : Appareil de mesure de la résistance à la compression.....	93
Figure 4. 5 : La variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de stabilisateurs de fibres.	94

Liste des Tableaux

Tableau 1. 1: Caractéristiques des briques terres crues (adobe, pisé et brique de terre comprimée [44].	34
Tableau 1. 2: Propriétés thermomécaniques des trois briques en terre cuite [68]......	40
Tableau 2. 1: Caractéristiques anatomiques des pailles de blé.....	50
Tableau 2. 2: Caractéristiques physiques des fibres de paille utilisées.	50
Tableau 2. 3 : : Caractéristiques physiques des fibres d'aiguilles de pin utilisées.	51
Tableau 3. 1 : La fraction granulaire et les limites Atterberg de la terre de KHEMISSET.	72
Tableau 3. 2: Composition chimique de la chaux.	78
Tableau 3. 3: Codification des mélanges.	84
Tableau 4. 1: Résultats expérimentaux moyens des blocs de la terre associant aux différents dosages à la chaux.	88
Tableau 4. 2: Les valeurs expérimentales de la conductivité thermique des BTS avec différents dosages.	90
Tableau 4. 3: Les valeurs expérimentales de conductivité thermique des blocs de terre stabilisée avec différents stabilisateurs de fibres.....	92
Tableau 4. 4 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression des blocs préparés.	94

Introduction générale

La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction, nous construisons sur terre depuis des millénaires, par exemple les maisons en blocs d'adobe datant de 8000 à 6000 avant JC [1]. Il a également été estimé qu'en 2011, plus de 10 % des biens du patrimoine mondial incorporent des structures en terre [2]. Le sol a été utilisé comme matériau de construction par de nombreuses anciennes civilisations, et on le trouve dans différentes régions du Maroc, comme l'Université d'al-Qarawiyyin qui représente la plus ancienne université en activité au monde reconnue par l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) [3] et le Guinness World Records [4].

L'abondance de la terre, mais aussi sa cohésion et sa plasticité lorsqu'elle est mélangée avec l'eau, ont conduit à l'émergence de plusieurs techniques de construction en terre telles que les blocs d'Adobe, la terre damée, les blocs de terre comprimée (BTC) ou stabilisée (BTS) et les mortiers de terre. La construction en terre est également caractérisée par sa faible énergie intrinsèque.

Cependant, les briques de terre stabilisée (BTS) qui font l'objet de l'article présenté, comme l'une des techniques les plus utilisées, font également l'objet de plusieurs études. Par conséquent, des recherches expérimentales ont été menées pour mieux comprendre le comportement mécanique et thermique de cette technique de construction en terre, afin d'obtenir des BTS plus résistants, confortables et durables.

Plusieurs études ont évalué l'effet de l'ajout de fibres aux briques d'adobe afin d'améliorer ses propriétés [5,6]. Les chercheurs ont étudié les effets de l'ajout de paille de fonio, et ont conclu que la conductivité thermique diminuait avec l'augmentation de la quantité de fibres [5]. D'autres utilisent Hibiscus Cannabinus avec des fibres de différentes longueurs pour chercher à réduire la conductivité thermique et améliorer les propriétés mécaniques [6].

L'utilisation du ciment ou de la chaux dans la stabilisation de la terre en général est un domaine assez connu grâce aux importants travaux de laboratoire et réalisations sur le terrain. Ces travaux ont permis de connaître les mécanismes de réactions entre la terre et ces liants, leurs effets sur les propriétés de la terre. D'après ces études, il a été défini que la chaux convient plus à une terre avec un taux d'argile non négligeable.

Pour le cas des maçonneries de BTS, la littérature est plus abondante et ancienne, mais il y a aussi des publications très récentes concernant le comportement mécanique des blocs et de la maçonnerie [7] et du mortier de terre [8]. Certaines publications préconisent, dans la composition du matériau, une limitation de la teneur en argile à 15 % [9] et pour d'autre à 20 % [10].

D'autres études ont porté sur l'optimisation de la teneur en stabilisant (ciment portland ou chaux) à incorporer dans les blocs [11] et sur la définition de mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance à la compression [12]. Dans certains pays, des efforts ont été faits en vue de l'adoption de normes régissant l'emploi des BTC dans la construction [13]. De plus des variétés de presses manuelles ont été développées et vulgarisées.

Toutes ces études portent sur les BTC et plus marginalement sur les pisés, matériaux qui sont à base de terre contenant approximativement 5% à 15% d'argile en poids sec. Par contre, dans le cas des adobes qui sont souvent composés d'un matériau plus argileux, préparé à l'état plastique, les publications scientifiques se font plus rares. Or de nombreuses terres contiennent plus de 20 % d'argile et pourraient, sans amendement de leur texture, servir directement à la production d'adobes. De plus, le procédé traditionnel et manuel de fabrication de l'adobe de construction a montré son efficacité. En effet, il a été utilisé pour l'érection des premières villes de Mésopotamie, et d'Egypte il y a près de cinq mille ans. Ainsi il est probablement un des plus anciens matériaux de construction. Il a aussi été employé dans la vallée de l'Hadramaout au Yémen pour l'édification d'habitations de huit étages.

Cependant, à notre connaissance, peu d'études se sont véritablement intéressées à leur performance mécanique, on pourra citer cependant les travaux fait en Amérique du Sud, notamment [14], organisme qui a mis au point une procédure d'essai de compression simple d'éléments de maçonnerie. Ce manque de connaissance nous a encouragés à faire des recherches en laboratoire dans ce domaine dont cet article rend compte.

Outre l'introduction générale, cette thèse est structurée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu historique sur la construction en terre crue, la composition et les caractéristiques de la terre crue ainsi que les techniques et les étapes de fabrication des briques en terre.
- Le chapitre 2 fait le point sur les matériaux utilisés dans cette étude, les critères de choix des sols à stabiliser, les différents modes de stabilisation ainsi que l. Ce chapitre présentera aussi es techniques et les méthodes expérimentales développées le long de

la thèse pour étudier les propriétés chimique, minéralogique, physiques et thermiques des matériaux en question.

- Le chapitre 3 est consacré à la caractérisation des différentes composantes à savoir le sol, la chaux, les fibres de paille et de pin ainsi qu'à l'élaboration des échantillons et des éprouvettes des BTS en vue de leurs utilisations dans les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la présence des fibres et particulièrement les fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques des briques de terre, ainsi que sur son comportement mécanique.
- Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre 4.
- Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I. Introduction :

La terre, le sol, sont constitués de minéraux, de matières organiques, d'eau et d'air. Les minéraux, composés essentiellement de silicates – quartz, argiles, feldspaths et micas – et de carbonates, proviennent de l'altération physique et chimique d'une roche mère. La terre à bâtir (la matière première), essentiellement minérale, est prélevée facilement dans le sol, sous la couche de terre riche en matières organiques (humus) et réservée à la production végétale [1].

Après son extraction à l'aide d'outils rudimentaires ou plus élaborés, la terre (constituée d'argile, de limon, de sable et éventuellement de graviers et de cailloux) est transformée en matériau de construction selon des modes vernaculaires ou plus contemporains [2]. On peut les regrouper en 4 grandes familles.

- La terre compactée, non saturée en eau : pour réaliser des murs en pisé et des blocs de terre comprimée (BTC).
- La terre empilée ou moulée à l'état plastique : pour réaliser des murs en bauge (terre empilée), des adobes.
- La terre allégée (à l'état visqueux) grâce à des fibres végétales : pour réaliser du torchis (en remplissage d'une structure porteuse en bois), de la terre-paille, de la terre-chanvre, etc.
- La terre coulée à l'état liquide dans des coffrages, comme un béton cimentaire fluide ou autoplaçant.

La terre présente de nombreux avantages [3, 4] : c'est un matériau naturel, abondamment et localement disponible (le transport est souvent nul), à faible énergie grise (énergie consommée tout au long du cycle de vie d'un matériau) et recyclable à l'infini. Brute et diversifiée, elle offre une variété de granularités, de couleurs naturelles et de textures vivantes, garante d'une esthétique minimaliste.

La terre assure également un confort naturel hygrothermique et acoustique et un climat intérieur sain. Elle offre, en effet, une régulation hygrométrique et ses murs massifs bénéficient d'une bonne inertie thermique et d'une isolation phonique. Elle ne dégage aucun COV (composés

organiques volatils) [5] et absorbe les odeurs. Ces vertus, connues de manière empirique depuis des millénaires, sont aujourd’hui confirmées scientifiquement [6,7].

Contrairement aux matériaux industrialisés et mondialisés, la terre est facile à travailler et sa mise en œuvre est sans risque pour la santé [8]. Elle contribue ainsi à promouvoir les chantiers participatifs et l’auto construction (surtout pour les plus démunis), à valoriser la diversité des cultures constructives et à stimuler le développement local.

La construction en terre contribue également à la valorisation des terres d’excavation des grandes villes considérées comme des déchets. Alors que le chantier du Grand Paris Express va générer 40 millions de tonnes de terre d’ici 2030, le projet « cycle terre » vise à transformer une partie de ces « déchets » en éco matériaux de construction dans une logique d’économie circulaire [9].

Ces avantages écoresponsables font de la terre un matériau de construction d’avenir [10, 11], une alternative aux matériaux de construction énergivores et polluants – comme la brique cuite ou le ciment (près de 7 % des émissions de CO₂ à l’échelle du globe) – et une solution à favoriser dans le bâtiment pour répondre à la crise mondiale du logement (dont souffre un milliard d’humains) et à l’urgence climatique, comme l’espèrent les signataires du « manifeste pour une frugalité heureuse ».

Mais la terre a aussi ses limites. Son principal problème réside dans sa sensibilité à l’eau [12,13]. Pour y remédier, les murs en terre sont traditionnellement protégés, surtout sous un climat pluvieux, par « de bonnes bottes et un bon chapeau » : soit un soubassement (en pierre par exemple) pour empêcher les remontées capillaires, et un débord de toiture pour protéger de l’érosion due à la pluie.

L’ajout de ciment ou de la chaux, à faible dosage, est aussi parfois utilisé pour limiter sa sensibilité à l’eau et augmenter [14], modestement toutefois, ses propriétés mécaniques. Mais le recours à cette « stabilisation » reste critiquable car elle impacte l’intérêt écologique et pénalise le cycle de vie du matériau.

II. Histoire de la construction en terre crue :

La terre crue a été utilisée dans la construction depuis des milliers d'années [15, 16] et environ 30 % de la population mondiale vivent dans des structures en terre, tout particulièrement dans les pays en voie de développement [17]. L'histoire de la construction en terre est mal connue, trop souvent éclipsée par l'attention accordée en Occident à la pierre ou au bois, matériaux considérés plus « nobles ». La terre est cependant associée aux époques décisives de la révolution urbaine dans toutes les zones géographiques, par la plupart des civilisations (civilisation de la vallée de l'Indus [18,19], civilisation mésopotamienne [20], culture Mochica, etc.).

Selon les statistiques établies il y a près de quarante ans, le tiers de la population de la planète occupe des demeures conçues dans une architecture de terre réparties sur les cinq continents en milieu urbain comme en milieu rural [21]. L'Unesco estime que ces chiffres devraient être révisés à la hausse (50 % de la population mondiale en 2020). La liste du patrimoine mondial de l'UNESCO recense 70 sites archéologiques et architecturaux historiques en terre crue qui représentant 10 % de ce patrimoine [17].

À titre d'exemples, citons la grande mosquée de Djenné [22], au Mali : bâtie en 1907, elle reste l'un des plus grands édifices en terre crue au monde et constitue l'un des emblèmes de la culture de ce pays (figure 1.1). En Chine, la Grande Muraille comporte des sections longues de plusieurs kilomètres construites en terre crue [23], lorsque la pierre n'était pas disponible localement. Citons aussi la ville du XVI^e siècle de Shibām, au Yémen [24], première cité verticale et dense du monde avec des maisons-tours d'environ 30 mètres de haut, entièrement bâties en briques de terre moulée (appelée « adobes »). En raison de la guerre civile qui touche actuellement ce pays, la ville figure désormais sur la liste du patrimoine en danger de l'Unesco [17].



Figure 1. 1: Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue [22]

Au Maroc, les quatre villes impériales – Fès, Marrakech, Meknès et Rabat – sont également classées au patrimoine mondial de l’humanité du fait de leurs médinas traditionnelles édifiées en adobes et pisé (c’est-à-dire en terre damée coffrée) [25, 26]. Le pays recèle d’autre part de prodigieuses forteresses en terre ocre, appelées ksour et kasbahs. Le ksar d’Aït-Ben-Haddou constitue un exemple emblématique de l’architecture traditionnelle amazighe du sud marocain [27]. Aussi, plusieurs régions rurales utilisent cette méthode traditionnelle dans la construction des maisons et des locaux pour les bétails.

III. Composition de la terre crue

La terre crue est un matériau minéral granulaire, composé de matière solide, liquide et gazeuse [28]. La fraction solide est constituée de grains : cailloux (taille exprimée en centimètres), graviers (de 20 mm à 5 mm), de sables (5 mm à 0,06 mm), limon (0,06 mm à 2 μm), argile, qui sont des plaquettes plutôt que des grains (taille inférieure à 2 μm) et oxydes métalliques qui ont des propriétés colorantes (taille également inférieure à 2 μm). La fraction liquide est constituée d'eau et de corps organiques et minéraux dissous dans cette eau. La fraction gazeuse est constituée d'azote, d'oxygène, de gaz carbonique, ainsi que de gaz issus de la vie présente dans la terre (hydrogène, méthane, etc.). Les fractions liquides et gazeuses subissant des modifications très rapides, on caractérise traditionnellement un sol par sa fraction solide, ce qui se traduit par l'étude de sa granulométrie [28].

Lors de l'utilisation de la terre crue pour réaliser un ouvrage, la fraction liquide est à prendre en compte avec autant d'attention que la fraction solide. Les limites entre les principaux « états hydriques » (solide, plastique, liquide) sont déterminées par le test dit des limites d'Atterberg : en présence de très peu d'eau, la terre peut être compactée dans des coffrages (technique

du pisé), lorsqu'on en rajoute progressivement, on passe à un matériau plastique et malléable (moulage dans des petits coffrages en bois pour façonner des briques), puis à une terre visqueuse (utilisée comme un mortier de terre ou comme enduit) et enfin à un liquide, mélangé sous forme de barbotine à des fibres comme la paille ou les copeaux de bois [28 , 29].

Essentiellement composée de granulats (cailloux, graviers, sables et silts) et d'un liant (la pâte formée par les argiles et l'eau), la terre crue fait partie de la famille des bétons (le béton de terre) aux côtés du béton de ciment. C'est l'un des plus anciens matériaux composites.

A. Techniques de construction en terre crue

Il existe de nombreuses techniques de construction utilisant de la terre crue [30, 31, 32]. Le principe à la base de chaque technique est le mélange de la terre avec une certaine quantité d'eau et souvent des fibres végétales. Ce mélange est ensuite mis en œuvre de diverses manières, dont les plus répandues sont les suivantes :

Bauge :

La bauge est une technique de construction qui consiste à façonner des boules de terre argileuse que l'on empile directement à la main et que l'on tasse pour former un mur massif monolithique, c'est-à-dire d'une seule pièce (figure 1.2). On emploie ensuite un outil tranchant pour lisser le mur [33].

Aujourd'hui, les bâtiments en bauge peuvent être restaurés mais la technique n'est plus guère employée.



Figure 1. 2: Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge [33]

Fonctionnement et domaine d'application

Cette technique consiste à monter des murs massifs en terre par l'empilement de mottes composées d'un mélange de terre et de fibres végétales (paille, bruyère, ajonc, fougère, etc.). Ce savoir-faire se différencie du pisé dans la mesure où il n'utilise aucun coffrage et les outils se limitent à la fourche et à la bêche [32].

Méthode de construction

- La terre à bâtir est prélevée sous la couche de terre arable et étalée sur le sol, à proximité du chantier.
- La terre est humidifiée et mélangée à de la paille au moyen d'une fourche, puis foulée au pied pour obtenir un mélange plastique.

Des pains de terre sont ensuite prélevés avec la fourche et empilés pour monter la première levée de mur, qui fait 50 à 60 cm d'épaisseur sur 50 à 70 cm de hauteur environ.

- Les parements sont le plus souvent battus afin de chasser l'air et leur donner plus de cohésion, et enfin retaillés avec un outil tranchant.
- Après quelque temps de séchage, l'opération est répétée pour constituer la levée supérieure. Il faut entre 1 et 4 semaines de séchage avant de pouvoir mettre en place la levée suivante pour laquelle un nouveau mélange d'eau, de terre et de fibres est réalisé (paille, bruyère, ajonc, fougère, etc.)
- Les parements reçoivent enfin un enduit de protection en terre.

Elle est très rarement mise en œuvre dans le neuf, en raison de la contrainte des délais de mise en œuvre.

La terre est généralement extraite sur le lieu de la construction (d'où les nombreuses mares autour des maisons en bauge) sous la couche de terre végétale.

Cette terre doit être moyennement argileuse : suffisamment pour qu'elle possède une bonne cohésion, pas trop pour qu'elle ne fissure pas [33].

Tous les avantages

- Une maison en terre s'adapte parfaitement à un environnement naturel, elle ne dénature pas le paysage et surtout, elle est imputrescible.

- La terre est un matériau qui ne bouge pas et qui se recycle indéfiniment.
- Naturelles, les maisons en terre sont respirantes et dès lors, offrent une très bonne inertie thermique à l'habitation. Inutile de trop chauffer en hiver ou de climatiser sa maison en été, tant une maison en terre propose un climat agréable à ses occupants. Cette qualité permet de faire des économies d'énergie.
- En raison de la qualité plastique du matériau, la bauge n'a pas besoin de coffrage (comme le pisé), ni d'armature (comme le torchis).

Tous les inconvénients

- La technique nécessite beaucoup de main d'œuvre.
- L'installation des murs est très longue.
- La terre crue n'a pas toujours une bonne résistance aux intempéries et elle nécessite une isolation extérieure.
- Aujourd'hui, peu de professionnels proposent leurs services dans le cadre de la construction en terre et quand c'est le cas, les coûts sont souvent très élevés.

L'adobe

L'adobe est une brique de terre crue, séchée au soleil (Figure 1.1)., et utilisée comme matériau de construction [34]. Ces briques sont obtenues à partir d'un mélange d'argile, d'eau et éventuellement d'un liant utilisé en petite quantité : de la paille hachée par exemple.

Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde, on le trouve sur tous les continents [35].

La date exacte de la découverte de l'adobe est inconnue, mais les scientifiques disent que des maisons ont été construites à partir de celle-ci il y a six mille ans. À cette époque, c'était presque le seul moyen de sortir des habitants de la steppe et des zones désertiques, où on ne rencontrait presque jamais de bois ou de pierres naturelles plus traditionnels. Comme cela se produit à toutes

les époques et dans tous les États, la construction d'une maison était également coûteuse, car la population pauvre n'avait d'autre choix que de penser à un moyen de construire ce qui se trouvait sous ses pieds et n'était pas particulièrement nécessaire. L'Égypte ancienne est considérée comme le lieu de naissance du premier adobe, et de là, ce matériau s'est répandu dans de nombreuses régions aux conditions climatiques décrites [35, 36].

D'un côté, l'adobe existe depuis des milliers d'années mais non seulement il n'a pas perdu de sa pertinence, mais il l'a même acquise dans les régions où le bois régnait auparavant comme matériau de construction [34]. D'autre part, malgré toutes les améliorations apportées à la composition et aux caractéristiques, un tel bloc n'est pas non plus considéré comme un leader sur le marché des matériaux de construction, mais peut également être consciemment rejeté en tant qu'option en faveur de cette option ou alternative. Tout cela indique que l'adobe présente des avantages et des inconvénients qu'il convient de prendre en compte avant l'achat de matériaux de construction [35].



Figure 1. 3: Brique d'adobe séchant au soleil [35]

Fabrication

Les briques sont coulées dans un cadre ouvert, un rectangle dont les dimensions sont en général de 10x25x36 cm bien que l'on rencontre d'autres tailles. Après que le mélange a été versé dans le moule, celui-ci est retiré. Après quelques heures, les briques sont tournées sur leur tranche

pour finir le séchage [36]. Lors du séchage, les briques devraient être placées à l'ombre pour éviter l'apparition de fissures. Des morceaux de bois peuvent être introduits lors de la construction afin de renforcer les briques ou d'améliorer l'isolation du bâtiment (Figure 1.4).

La plus grande structure construite avec des adobes était la citadelle de Bam en Iran, sérieusement endommagée lors du tremblement de terre du 26 décembre 2003 [37]. D'autres constructions sont imposantes : la Huaca del Sol au Pérou avec 100 millions de briques et Chan [38], également au Pérou ainsi que plusieurs mosquées en Afrique occidentale (par exemple au Mali : à Tombouctou et à Djenné).



Figure 1. 4: Brique d'adobe de différentes tailles [36]

Caractéristiques et propriétés positives

La brique d'adobe moderne peut avoir différentes caractéristiques (Figure 1.5) [39,40], qui dépendent fortement de ses composants et de leurs proportions, mais en moyenne, vous devriez obtenir quelque chose comme ceci :

- Densité comparable à celle des briques classiques - entre 1500 et 1900 kg par mètre cube ;
- La conductivité thermique dépend en premier lieu de la quantité de paille utilisée (plus elle est chaude, plus les murs retiennent la chaleur), mais en général, selon

cet indicateur, le pisé est deux fois plus efficace qu'une brique simple - 0,1 à 0,4 W / (m * grêle) [39].

- En termes de résistance à la compression, les blocs en pisé ressemblent beaucoup à un bloc en béton cellulaire moderne. Dans les deux cas, cet indicateur va de 10 à 50 kg par centimètre carré.
- Selon les caractéristiques principales, Adobe satisfera la plupart des propriétaires potentiels du bâtiment, car il conserve non seulement bien la chaleur, mais possède également d'excellentes propriétés d'isolation acoustique. De plus, les murs en pisé absorbent également l'excès d'humidité, participant à la normalisation de l'atmosphère dans la maison.
- Adobe est complètement inoffensif - c'est un produit aussi naturel que possible.
- En même temps, il est prévisible, il ne brûle pas du tout dans le feu.



Figure 1. 5: Brique d'adobe [40]

Inconvénients

- Les blocs Adobe sèchent assez rapidement là où ils ont été inventés - dans les pays chauds, mais dans nos conditions actuelles, nous devons attendre longtemps jusqu'à ce que la brique soit complètement sèche et solide [34]. Pendant tout ce temps, les matériaux de construction doivent être soigneusement protégés de l'humidité. En effet, ils nécessitent un stockage spécial jusqu'à ce qu'ils soient recouverts d'une finition protectrice. Une telle exigence conduit à ce que les bâtiments en pisé ne peuvent pas toujours être construits, et en hiver, une telle tâche semble irréaliste.

- Adobe classique, étant complètement naturel, ne présente aucun danger non seulement pour les personnes, mais également pour les parasites domestiques - des insectes aux rongeurs. En outre, les taches végétales peuvent également attirer de tels invités indésirables et les vides qui restent peuvent être utilisés comme logement dans les conditions modernes, pour prévenir de tels phénomènes, des additifs chimiques spéciaux ou une finition appropriée sont utilisés, mais des avantages matériels tels que le respect de l'environnement et une réduction des coûts, sont alors perdus.
- Adobe a besoin de temps pour que le retrait soit suffisant et que le mur gagne en résistance.

Pisé

Le pisé consiste à bâtir des murs en terre crue, que l'on dresse et compacte par blocs successifs entre deux panneaux de coffrage appelés « banches ». Cette technique millénaire s'adapte à toutes les formes architecturales (Figure 1.6), tant modernes que traditionnelles [30].

Le pisé utilise des terres disponibles localement. La matière première provient généralement du site de construction. Elle ne requiert pas de transformation, sous peine de modifier ses propriétés basiques. Mais, toutes les terres ne conviennent pas. Pour offrir une bonne résistance mécanique, le pisé requiert des granulats de grosseurs variées et en proportions bien définies. La terre sélectionnée est faiblement argileuse, pour éviter la fissuration, et elle est exempte de fibres (contrairement à l'adobe). On va donc la chercher sous la couche végétale.



Figure 1. 6: les meilleures terres à pisé se composent de 0 à 20 % de graviers, de 40 à 50 % de sable, de 20 à 35 % de limon,

Fabrication

✚ Préparation de la terre pour le pisé :

La terre utilisée est argilo graveleuse (Figure 1.7), elle doit être dépourvue de végétaux (graines, racines). Le mélange du silt, de l'argile, des sables et graviers est fait selon des proportions bien précises, testées et ajustées pour avoir la meilleure qualité de terre à piser. La terre arrive sur le chantier conditionnée dans des grands sacs en jute. Puis, une fois sur place, l'eau est ajoutée au mélange, en faible quantité, pour permettre la mise en œuvre du pisé.

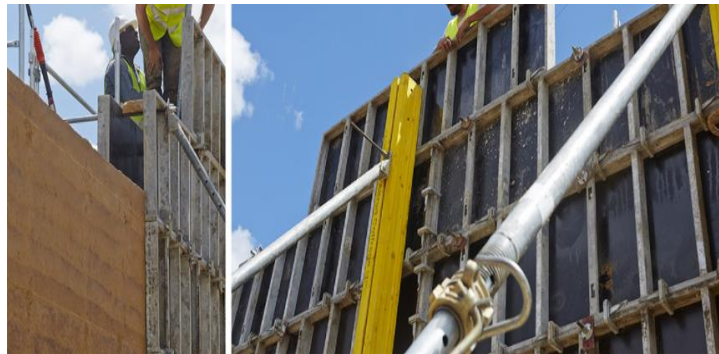


Figure 1. 7: Préparation de la terre [41]

✚ Montage des coffrages à l'aide de banches avec étaieiment :

La technique du pisé nécessite un coffrage d'où le montage de banches (Figure 1.8). Chaque banche fait 50 cm de hauteur. Une face du mur est coffrée sur toute la hauteur souhaitée, puis renforcée à l'aide d'étaieiment. Les vibrations générées par le tassement de la terre sont très importantes, la pose d'étaieiment sur toute la hauteur du coffrage est donc indispensable [30].



Figure 1. 8: Montage des coffrages [41]

✚ Tassement de la terre dans les banches :

Le montage du mur en pisé se fait par tassement de la terre, en couches successives et régulières de 15 à 20 cm maximums, à l'aide du pilon (outil pneumatique) (Figure 1.9).

Une fois le mur monté jusqu'en haut, on peut décoffrer : les premiers murs en pisé sortent de terre.

Le fait de décoffrer le mur dès que la dernière couche de terre est compressée, permet à l'humidité de s'évaporer, donc au mur de sécher. Le décoffrage doit donc être fait très rapidement [41].



Figure 1. 9: Tassement de la terre [41]

Avantages du pisé

Outre ses aspects écologiques et économiques indéniables, le pisé est un matériau qui offre de nombreuses qualités :

Robuste et durable, le pisé à l'avantage de résister aux épreuves du temps à la condition d'être correctement entretenu (Figure 1.10). De plus, c'est un matériau respirant qui régule l'humidité de la maison et qui emmagasine la chaleur environnante grâce à son inertie, ce qui permet de réaliser des économies d'énergies. Par ailleurs, le pisé est un bon isolant phonique. Enfin, la terre crue est extrêmement résistante face aux incendies [39].



Figure 1. 10: murs en pisé [41].

Inconvénients du pisé

Toutefois, le pisé s'avère être un matériau complexe à entretenir et à rénover. En effet il supporte mal l'humidité et nécessite des produits bien spécifiques en cas de travaux. À savoir qu'au fil du temps il est possible de voir apparaître des fissures ainsi que du salpêtre sur un mur en pisé [41]. Enfin, nous regretterons le manque de professionnels qualifiés ayant le savoir-faire nécessaire pour s'occuper de murs en pisé.

Torchis

Le torchis, mélange de terre argilo-limoneuse et de fibres végétales, est utilisé comme matériau de remplissage (Figure 1.11). Il nécessite une structure de bois pour être mis en œuvre. La terre « crue » par opposition à la terre « cuite » est souvent nommée « argile » par ses utilisateurs. Il s'agit d'une roche meuble d'origine détritique (issue de l'altération des roches antérieures) très fréquente dans de nombreuses régions [42]. Transportée par les cours d'eau (limon) ou par les vents (löss) elle contient de l'argile, du sable et surtout des silts (fines particules de 1/4 à 1/16 de mm). Ces dépôts continentaux sont récents (dernière glaciation – 80 000 à – 10 000 ans) et peuvent atteindre de fortes épaisseurs (jusqu'à 20 m). Ce sont les mêmes qui serviront à la fabrication des briques.



Figure 1. 11: Le torchis [42].

Fabrication

La bonne terre pour la construction de murs en torchis est le limon argileux, c'est à dire une terre comportant entre 15 et 20% d'argile. Prenez une bonne poignée de terre et versez-la dans un flacon en verre rempli d'eau. Agitez bien le mélange puis laissez décanter quelques heures. Après décantation, les différents "éléments" de la terre et leurs pourcentages se voient à l'œil nu : le sable se dépose dans le fond, surmonté ensuite par le limon et enfin l'argile (Figure 1.12).

Les quantités suivantes sont préconisées pour une préparation manuelle du torchis : 2 volumes de terre pour 1 volume d'eau et 1 volume de paille.

Ensuite, il faut étaler le limon argileux sur le sol de façon à pouvoir le travailler. Après arrosage, on le foule au pied pendant un bon moment. A cette terre humide malaxée, on incorpore la paille et on malaxe à nouveau avec les pieds jusqu'à obtenir une pâte bien homogène.

Pour restaurer votre maison en torchis, il faut prévoir 1m^3 de torchis pour couvrir 10m^2 de mur à 15 centimètres d'épaisseur.

Le torchis se pose humide sur le lattage de bois, lui-même au préalable abondamment arrosé. Une fois posé, le torchis doit être séché au moins pendant 3 semaines avant l'application de l'enduit qui le protégera du ravinement des eaux pluviales. Il ne faut pas appliquer n'importe quel enduit sur les constructions en torchis. En effet, les murs doivent pouvoir respirer. Le meilleur est donc la chaux aérienne éteinte (CAEB) mélangée à un peu de chaux hydraulique naturelle qui va accélérer la prise de l'enduit. La composition idéale de l'enduit est : 3 volumes de sable pour 1 volume de chaux aérienne, $\frac{1}{6}$ de chaux hydraulique naturelle, 1,5 volume d'eau, 1,5 volume de terre et 1 à 2 volumes de paille.

L'application de l'enduit se fait en monocouche par projection à la truelle.



Figure 1. 12: les étapes de construction d'un mur en torchis [42].

Avantages

- Durabilité

Un bâtiment en torchis bien construit et bien protégé contre la pluie devrait être extrêmement résistant.

- Non toxicité

Le torchis est constitué de matériaux naturels et non toxiques qui conjuguent leurs effets pour stabiliser le niveau d'humidité intérieur, ce qui contribuera à prévenir le développement de moisissures et à maintenir un air sain à l'intérieur.

- Esthétique

Le torchis est un matériau incroyablement souple qui permet à chacun d'exprimer sa propre créativité. Construire en torchis encourage les gens à faire preuve de fantaisie et à créer des espaces qui reflètent leur personnalité, c'est-à-dire des espaces qu'ils trouvent beaux selon des critères éminemment personnels. Ce type de synergie entre l'habitation et son occupant est important parce qu'il peut inciter le propriétaire-bâtitseur à rester dans sa maison suffisamment longtemps pour tirer bénéfice de la conception entièrement écologique de son habitation. Arbres, jardins, relations humaines enrichissantes : tout cela prend du temps pour arriver à maturité. La construction en torchis ne peut que favoriser le développement d'un tel environnement harmonieux.

Inconvénients

- Faible impact de la construction sur l'environnement

Dans de nombreux lieux, les ingrédients de base pour réaliser du torchis sont aisément disponibles et ne nécessitent pas un traitement lourd qui pollue et requiert beaucoup d'énergie. Le torchis a donc le plus souvent un faible impact sur l'environnement en termes de ressources utilisées et de pollution générée.

- Économies d'énergie

Le torchis est un médiocre isolant thermique. De ce fait, sous certains climats, un surcroît d'énergie sera nécessaire, par rapport à beaucoup d'autres matériaux, pour maintenir une température intérieure stable. Cela signifie que le torchis n'est pas toujours une option éco-énergétique. Cependant, en particulier dans les pays chauds ou jouissant d'hivers relativement doux et ensoleillés, le torchis constituera un choix judicieux en termes d'économies d'énergie.

Briques de terre crue comprimée – BTC

Les briques de terre crue comprimée (BTC) (Figure 1. 13), sont de la terre criblée très légèrement humide, généralement stabilisée au ciment ou à la chaux, fortement comprimée à l'aide d'une presse. Une fois pressées, elles sont stockées à l'état humide sous bâche pendant une semaine pour cure, puis mises à sécher durant une à trois semaines.

La brique de terre crue comprimée est dérivée de l'adobe (argile et eau moulés puis séchés), un des premiers matériaux de construction utilisé par l'Homme.

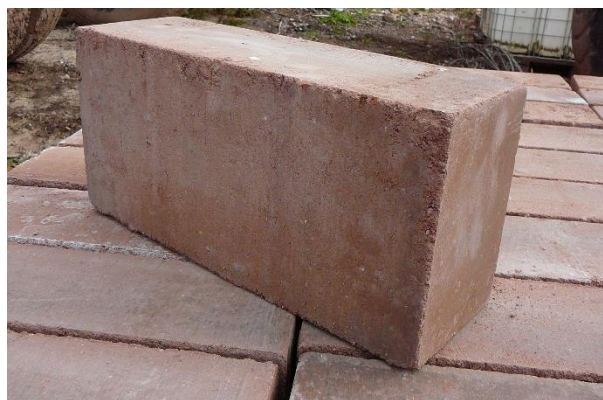


Figure 1. 13 : Briques de terre crue comprimée – BTC [41].

Processus de fabrication

- Les briques de terre crue sont fabriquées tout simplement par compression, dans une presse mécanique, d'argile mélangée généralement à du ciment ou de la chaux, pour améliorer sa stabilité.
- La compression lente va peu à peu chasser l'air présent dans le mélange, permettant ainsi son imperméabilité. La chaux ou le ciment (la chaux en particulier) serviront de liant, améliorant ainsi la stabilité de la brique, et permettront d'éviter les remontées d'humidité.
- Les briques ainsi fabriquées sont mises à sécher en phase humide pendant plusieurs semaines (3 semaines en moyenne) avant d'être mises en œuvre.
- Naturelles, respectueuses de l'environnement et saines, les briques de terre compressée présentent ainsi des avantages écologiques indéniables pour qui est soucieux d'un chantier « vert ». En particulier, notons la faible quantité d'énergie grise nécessaire à la fabrication de la brique de terre crue.

Avantages de la brique BTC

- Le bilan énergétique de cette brique est particulièrement favorable car elle est fabriquée sur le lieu même de la construction.
- Elle est écologique car lors de sa production, elle recycle de la terre locale et est crue. Elle durcit avec du liant.
- La terre est la partie supérieure de la croûte terrestre résultant de la décomposition des roches. Près de 75 % de la croûte terrestre est appropriée à la construction. Nous disposons ainsi d'une matière première abondante et locale.
- Elle procure une grande inertie thermique.
- Elle permet une bonne régulation hygrométrique.
- Par sa densité, c'est un bon isolant phonique

Inconvénients de la brique BTC

- Fabrication des briques longue et fatigante [43].
- Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite.
- Se détériore sous l'effet du gel.

B. Caractéristiques de brique terre crue (Adobe, Pisé, Brique de terre comprimée)

Les caractéristiques des briques de terre crue sont représentées dans le tableau (Tableau 1.1) [44].

Caractéristiques	Types de briques de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Massa volumique (Kg/m ³)	1200 - 1700	1700 - 2200	1700 - 2200
Résistance à la compression (MPa)	2 - 5	<2,4	<2,4
Résistance à la traction (MPa)	-	0,5 - 1	-
Conductivité thermique λ (W/m°C)	0,46 – 0,81	0,81 – 0,93	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique (J/Kg°C)	900	850	-
Capacité thermique (KJ/m°C)	1350	510	-
Absorption d'eau (%)	5	10 - 20	10 - 20
Isolation acoustique (dB)	-	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1 - 2	0,2 - 1

Tableau 1. 1: Caractéristiques des briques terres crues (adobe, pisé et brique de terre comprimée [44].

C. Briques en terre cuite

La terre cuite est l'un des plus anciens matériaux artificiels de construction [45].

Après avoir connu un grand essor durant la civilisation romaine, la terre cuite subit une longue éclipse à partir de l'effondrement du système économique et politique romain, pour ne réapparaître qu'à l'époque romane. Après la révolution industrielle, la terre cuite, à travers ses multiples dérivés (briques, tuiles, boisseaux, etc.) devient le principal matériau utilisé pour la construction des bâtiments [45, 46].

La terre cuite est un matériau céramique obtenu par la cuisson de l'argile. Elle est utilisée pour réaliser des poteries, des sculptures et pour la fabrication de matériaux de construction, briques, tuiles ou carreaux

La résistance de la terre cuite est fonction de sa composition et de sa température de cuisson. On peut donc rencontrer, notamment dans les pays chauds et humides d'Asie, des pavés en terre cuite au sol sur lesquels se sont progressivement imprimées des empreintes [46].

1. Constituants de bases

Les proportions des principaux composants :

Silice SiO_2 : 35 à 80%

Alumine Al_2O_3 : 8 à 25%

Oxyde de titane TiO_2 : 0.3 à 2%

Oxyde de fer Fe_2O_3 : 2 à 10%

Chaux CaO : 0 à 18%

Magnésie MgO : 0 à 5%

Soude Na_2O : 0.1 à 1%

Potasse K_2O : 0.5 à 4.5%

Anhydride carbonique CO_2 : 0 à 15%

La perte au feu est comprise entre 3 et 18%

2. Étapes de fabrication

La fabrication suit les étapes suivantes : extraction et préparation des matières premières, façonnage, séchage et cuisson. La fabrication dans une usine implique l'extraction des matières premières, le dosage, le broyage, le mélange, la compression, le découpage, le séchage et a cuisson [46].

Extraction et gisement

L'exploitation se fait le plus souvent à ciel ouvert, les forts tonnages de terre employés nécessitent l'installation de l'usine dans la mesure du possible à proximité de la carrière (Figure 1. 14).

L'extraction suit généralement le processus suivant :

Enlèvement de la découverte au bulldozer, à la pelle chargeuse mécanique et même à la décapeuse,

Extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique (argile sèche) ou l'excavateur à godets, au marteau piqueur ou encore les explosifs quand l'argile est trop dure,

Transport de l'argile à l'usine suivant la distance et la topographie des lieux : wagonnets, téléphérique, camions, bandes transporteuses.



Figure 1. 14: Extraction de l'argile à l'aide d'une pelle mécanique [42].

Préparation de l'argile

Le but visé est d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. Cela nécessite diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon la terre dont on dispose et le degré de plasticité de la pâte désirée (molle, demi-ferme, ferme).

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part (Figure 1. 15). Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini



Figure 1. 15: Préparation de l'argile [42].

Façonnage des produits

Le but visé est d'obtenir une pâte plastique et homogène ou une poudre adéquate suivant le produit à façonner. Cela nécessite diverses opérations qui diffèrent quelque peu selon la terre dont on dispose et le degré de plasticité de la pâte désirée (molle, demi-ferme, ferme).

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini

Une fois la pâte convenablement préparée, il faut lui donner les formes désirées, c'est à dire celles des produits finis utilisés dans la construction. Cette opération s'appelle façonnage et est réalisée par deux grands types de machines :

- Les presses mécaniques ou hydrauliques,
- Les filières (deux rouleaux lamineurs débitant une nappe de pâte qu'on découpe à la longueur désirée).

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme :

➤ Briques pleines :

Sont soit directement moulées à la presse ou à la filière. Celles passées à la filière sont moins poreuses, plus résistantes et plus régulières (Figure 1. 16).



Figure 1. 16 : Briques pleines

➤ Briques de parement :

Sont façonnées par double pressage. En effet, après avoir obtenu des briques pleines à la presse ou à la filière, on les laisse sécher légèrement puis on les repasse à la presse (Figure 1. 17). Ainsi leur compacité est plus grande, leurs arêtes vives et sont plus calibrées [32],

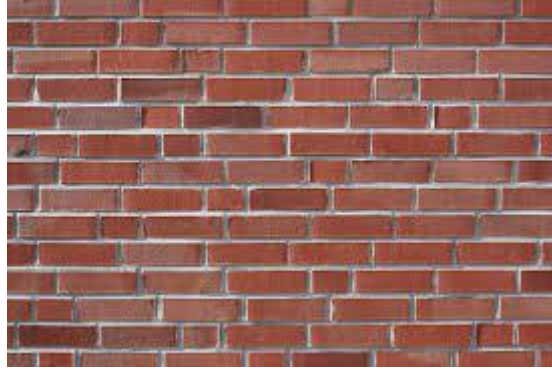


Figure 1. 17: Briques de parement [42].

➤ Briques perforées :

Pour alléger le produit fini et faciliter le séchage (Figure 1. 18), on incorpore à la filière des noyaux qui réalisent diverses perforations dans le pain de la pâte d'argile pour obtenir ainsi des produits perforés de dimensions variables,

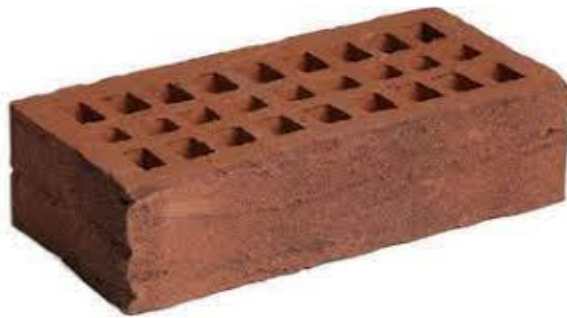


Figure 1. 18: Briques perforées en terre cuite

➤ Briques creuses :

On comprime la pâte dans une chambre avant de la passer dans une filière ; les machines employées (étireuses ou mouleuses) utilisent divers procédés pour comprimer l'argile : palettes, piston, cylindre cannelés, hélices (Figure 1. 19).



Figure 1. 19: Briques creuses

➤ Tuiles :

Leur façonnage se fait : en pâte molle pour tuiles plates et canal, en pâte ferme pour tuiles à emboîtement (Figure 1. 20).



Figure 1. 20: tuiles à emboîtement

Séchage

Le séchage élimine la presque totalité de l'eau qui a permis le façonnage. Le programme de séchage doit être adapté aux matières premières, à la forme du produit et aux types de séchoir.

Cuisson

La cuisson se fait en trois phases : le préchauffage, la cuisson et le refroidissement. Un cycle de cuisson dure de 12 à 48h jusqu'à ce que le matériau atteigne ses propriétés de résistance mécanique, porosité, résistance au gel, absorption d'eau, ...

Emballage :

Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé (Figure 1. 21).

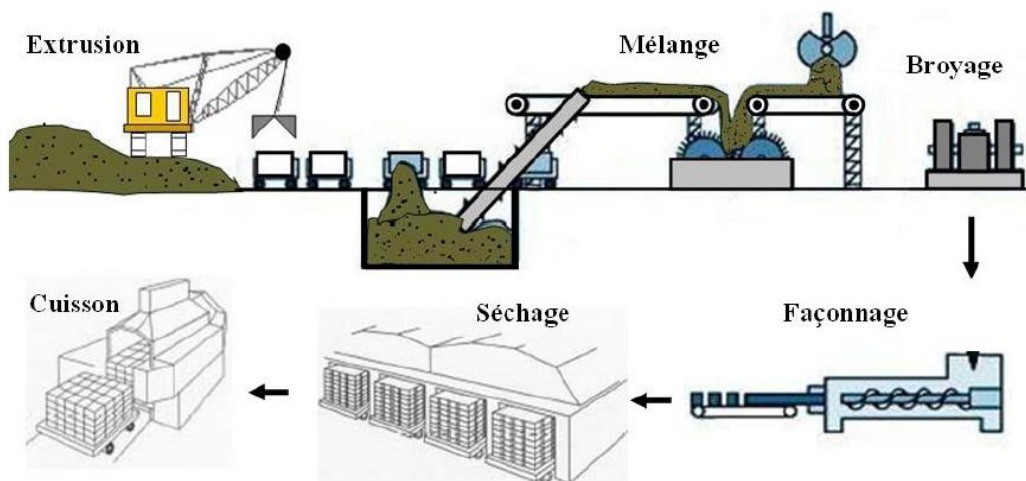


Figure 1. 21: Les étapes de fabrication de brique en terre cuite [47].

3. Comparatif des trois briques en terre cuite en fonction de leur Propriétés thermomécaniques

Caractéristiques	Type de brique		
	Creuse	Pleine	Perforé
Massa volumique (Kg/m ³)	1750 à 2050	1650 à 2000	1650 à 2000
Résistance à la compression (MPa)	4 à 8	125 à 40	12,5 à 40
Conductivité thermique λ (W/m°C)	0,45 à 0,51	1,1 à 1,16	0,28 à 0,38

Tableau 1. 2: Propriétés thermomécaniques des trois briques en terre cuite [68].

IV. Conclusion

Face aux enjeux du développement durable, le secteur du bâtiment et plus précisément celui des matériaux de construction propose de plus en plus de solutions à base de matériaux locaux. Parmi ces matériaux, la bauge est une construction en terre crue ancestrale, assez présente en Normandie, qui présente de nombreux avantages environnementaux.

L'étude bibliographique a montré que les formulations types de la bauge sont constituées d'environ 30 % de graviers, 35 % de sable et 35 % de limon et d'argile et d'une teneur en paille généralement comprise entre 1 et 3,5 % en masse. En termes de comportement mécanique, la résistance à la compression varie de 0,28 à 1,40 MPa, et la résistance à la flexion de 0,1 à 0,96 MPa. Ce comportement est influencé par la teneur en eau du mélange, les paramètres de la fibre (dont la teneur et le type) et également les paramètres de la terre (telle que la granulométrie et la teneur en argile).

Quant au comportement thermique, la conductivité thermique de la bauge varie en fonction de la teneur en fibre, de la densité et de la teneur en eau du mélange. Elle présente des valeurs entre 0,47 et 1 W.m⁻¹. K⁻¹.

La bauge est également caractérisée par un comportement hygroscopique spécifique. C'est un matériau micro et macroporeux dont la perméabilité moyenne à 23°C est comprise entre 1,5.10⁻¹¹ et 1,7.10⁻¹¹ kg.m⁻¹. S⁻¹. Pa⁻¹ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen est compris entre 11,8 et 13,3.

Chapitre 2 : Matériaux, appareils et techniques utilisés

I. Introduction

Ce chapitre traite des analyses des matériaux utilisés dans la fabrication de la Brique à savoir l'analyse chimique et l'analyse thermique de l'argile et des ajouts organiques. Ainsi, il décrit l'ensemble des méthodes et techniques utilisées dans le cadre de cette recherche ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre.

Ensuite, cette partie serait structurée de façon chronologique. Après les prélèvements des échantillons en carrière, on a tour à tour procédé à l'identification, à la caractérisation physique, ainsi qu'à la caractérisation chimique et minéralogique, ensuite à la préparation des différents traitements, à leur application sur les échantillons puis aux caractéristiques thermiques et mécaniques des échantillons traités y compris des échantillons témoins.

Enfin, et avant d'entamer les analyses, il est indispensable de définir l'origine des matériaux utilisés. C'est dans cette optique que nous allons donner un aperçu sur le gisement d'ELKHMISSET, sa position géographique, l'historique des travaux de recherche se rapportant à ce site. De même les caractéristiques qualitatives et technologiques de l'argile de ce site seront fournies. Nous donnerons par la suite l'origine des deux ajouts utilisés.

II. Caractéristiques des matériaux

A. Sol

Le sol est la partie superficielle de la croûte terrestre, il est constitué de trois fractions (solide, liquide, gazeuse) [38], la fraction solide qui nous intéresse constituées plusieurs couches appelées (Figure 2.1) :

La litière : principalement composée de débris de matières végétales (feuilles, branches cassées, bois mort et excréments d'animaux).

L'humus : provenant de la décomposition des êtres vivants végétaux et animaux (déjections, cadavres, feuilles mortes, bois morts ...)

La couche minérale : est la couche la plus profonde du sol, il contient des particules minérales issues de l'altération de la roche mère (débris de roches).

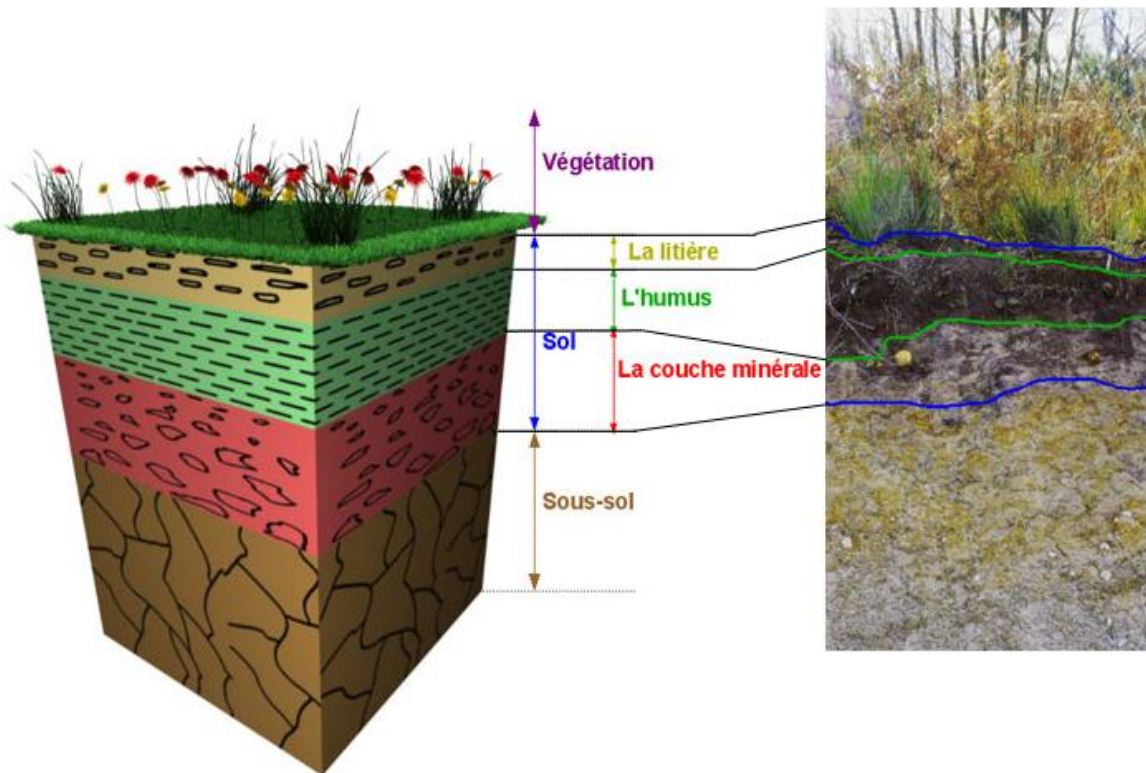


Figure 2. 1 : Couches du Sol [48].

Généralement, les sols sont différents selon les régions (roche différente, climat différent, durée différente d'altération de la roche-mère...), et pour cela on va mettre dans ce chapitre comme objectif de décrire les différentes caractéristiques de notre sol (Had Laghoualem,-province de KHEMISSET) et la constitution des matériaux utilisés et leur caractéristiques chimique et minéralogique ainsi que les appareils et les techniques expérimentales utilisés.

1. Présentation du site de prélèvement

La terre étudiée a été prélevée de la zone Had Laghoualem dans la province de KHEMISSET sur une profondeur de 80cm [49]. Cette province est située dans la région de Rabat-Salé-Kenitra et est limitée au nord par la province de Kénitra, au sud par les provinces de Khouribga et Khénifra, à l'est par la province de Meknès-El Menzeh et à l'ouest par les provinces de Rabat et de Salé (Figure 2.2).



Figure 2. 2: Localisation de site de prélèvement [49].

2. Caractérisation du sol étudié

La première étape consiste à identifier le sol étudié, c'est-à-dire de déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques et chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées à l'aide des essais simples et rapides, appelés « essais d'identification ».

Les essais d'identification conduisent à une description précise et chiffrée, et non seulement descriptive du sol (Figure 2.3).

L'identification du site est essentielle pour décider son utilisation et sa stabilisation, et pour cela le critère de référence pour la sélection des sols était les recommandations du CRATERRE (Centre International de la Construction en Terre).



Figure 2. 3: sol étudié.

B. Chaux

1. Présentation

L'homme qui vient de découvrir le feu, s'aperçoit que les pierres utilisées pour les foyers se désagrègent à la chaleur, puis se lient sous l'action de l'eau et finissent par durcir progressivement au contact de l'air. Ainsi naît la chaux, naturellement, sous l'action de trois éléments : le feu, l'air et l'eau. Les premières traces de la fabrication de la chaux remontent à la préhistoire. Elle était utilisée comme liant dans les constructions [50, 51]. Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les Égyptiens l'utilisaient pour plâtrer les pyramides. Le début de l'utilisation de la chaux dans les mortiers est vague. On sait par contre que l'Empire romain utilisait couramment la chaux dans les mortiers. Vitruvius, un architecte romain, donnait les grandes lignes pour la préparation des mortiers de chaux [51].

La chaux résulte de la cuisson d'une roche calcaire à une température comprise entre 800 et 1000 °C. Le constituant majoritaire à ce stade est l'oxyde de calcium CaO, ou chaux vive, qui va s'hydrater pour donner de la chaux dite éteinte Ca(OH)₂. Suivant la composition de la chaux de base, on obtiendra une chaux aérienne ou une chaux hydraulique. Une chaux est définie par plusieurs paramètres : sa teneur en chaux libre exprimée sous forme de CaO, sa teneur en MgO, sa granulométrie et enfin sa réactivité déterminée par l'essai de « réactivité à Couche octaédrique Couche tétraédrique Couche tétraédrique 10 Å 17 l'eau » définie par la norme NF P 98-102. Elle exprime la rapidité d'action d'une chaux lors de son emploi et dépend essentiellement de la surface de contact entre la chaux et le corps avec lequel elle réagit. Elle dépend donc de la surface spécifique et de la finesse de la chaux (Figure 2.4).



Figure 2. 4: chaux étudiée

2. Inventaire et méthodes d'utilisation de la chaux pour la stabilisation

a) Utilisation de la chaux à l'étouffée (chaux vive)

L'utilisation de la chaux vive à l'étouffée, c'est utiliser directement la chaux vive pour la fabrication de mortier, on mêle la terre légèrement humidifier à cette chaux vive qui en absorbe l'humidité et se délite peu à peu en poudre. Cela permet d'obtenir ainsi sur place au chantier, de la chaux éteinte en poudre et un mortier prêt à l'emploi. Si la chaux est hydraulique l'utiliser dans les 24 heures pour profiter de ses propriétés avant qu'elle ne fasse prise [52].

b) Utilisation de la chaux éteinte à l'état poudreux

La chaux en poudre, si elle est bien éteinte ne dégage pas de chaleur en contact avec l'eau, on la mesure comme le ciment, selon le pourcentage voulu et on le mélange à la terre. On malaxe les deux matériaux de façon homogène, ensuite nous ajoutons l'eau selon la teneur en eau optimale du matériau, et nous procédons à un deuxième malaxage. Le mélange ainsi obtenu est prêt pour la confection des briques.

c) Utilisation de la chaux éteinte à l'état pâteux

Après l'extinction on laisse refroidir. Pour préparer un enduit on mélangera directement cette pâte à la terre. Pour le mortier des joints on ajoute la terre et on laisse reposer 24 heures. Pour les mortiers de finition on tamise la pâte au tamis de 10 (2 mm) et on la laisse reposer 2 semaines au moins. Pour les corps d'enduit fibrés, on tamise la pâte, on ajoute la terre et les fibres avant

de laisser reposer 02 semaines. On s'assure ainsi une bonne imprégnation des fibres. On vérifie en même temps la bonne tenue des fibres en milieu basique.

3. Chaux utilisée

En effet, La chaux est un liant qui a pour propriété d'assembler par collage des matériaux inertes. Elle a une influence sur les résistances des mortiers, notamment la résistance à l'écrasement. Elle a été utilisée depuis 6000 ans de façon très constante dans la construction. Jusqu'à la révolution industrielle, elle a été le principal liant de la construction, qu'elle ait été incorporée à des briques de terre, à des enduits de parement, ou bien utilisée à l'état pur pour lier des peintures ou badigeons. Elle a également servi à réaliser les stucs et les fresques. Dans cette étude on a utilisé la chaux broyée de la ville d'EL KHEMISSET.

C. Fibres

1. Introduction

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite ainsi que sa disponibilité locale.

Dans notre étude on a travaillé par des fibres naturelles avec des dimensions macroscopiques (paille, pin ...)

2. *Fibres de Paille*

a) *Description*

La paille est un ensemble de tiges de graminées et de feuilles, principalement issues des céréales et en particulier des céréales de blé, qui est obtenue par battage (lors de la moisson), puis par séparation des grains (par la moissonneuse-batteuse) ; la paille (pauvre en nutriments) se retrouve alors dans l'andain (bande de fourrage laissée sur le sol) (Figure 2.5).



Figure 2. 5: (a) Gerbes de blé fauché à la main ; (b) Bottes rectangulaires de paille de blé ; (c) construction aux fibres de paille [53].

b) *Caractéristiques des fibres de paille*

La paille de blé est constituée par la tige et l'épi (ou rachis) à son sommet ; elle a pour rôle de porter les organes reproducteurs et les feuilles, ainsi que le système de transport de l'eau et des nutriments (Figure 2.6). La tige est un cylindre creux, constitué de couches concentriques et divisée en nœuds et entre-nœuds sur lesquels se développent les feuilles. Dans le cas du blé, il y a 5 à 6 nœuds sur la plante à maturité. Les entre-nœuds, qui représentent environ 50 % de la masse de la paille, lui donnent sa résistance mécanique alors que les nœuds et les feuilles ont une moins bonne tenue mécanique, car ils contiennent plus de minéraux et moins de cellulose. Afin d'augmenter leur résistance à la verse, les blés cultivés de nos jours ont des pailles relativement courtes (70 à 90 cm) pour un diamètre compris entre 3,0 et 3,5 mm.



Figure 2. 6: Fibres de paille utilisées.

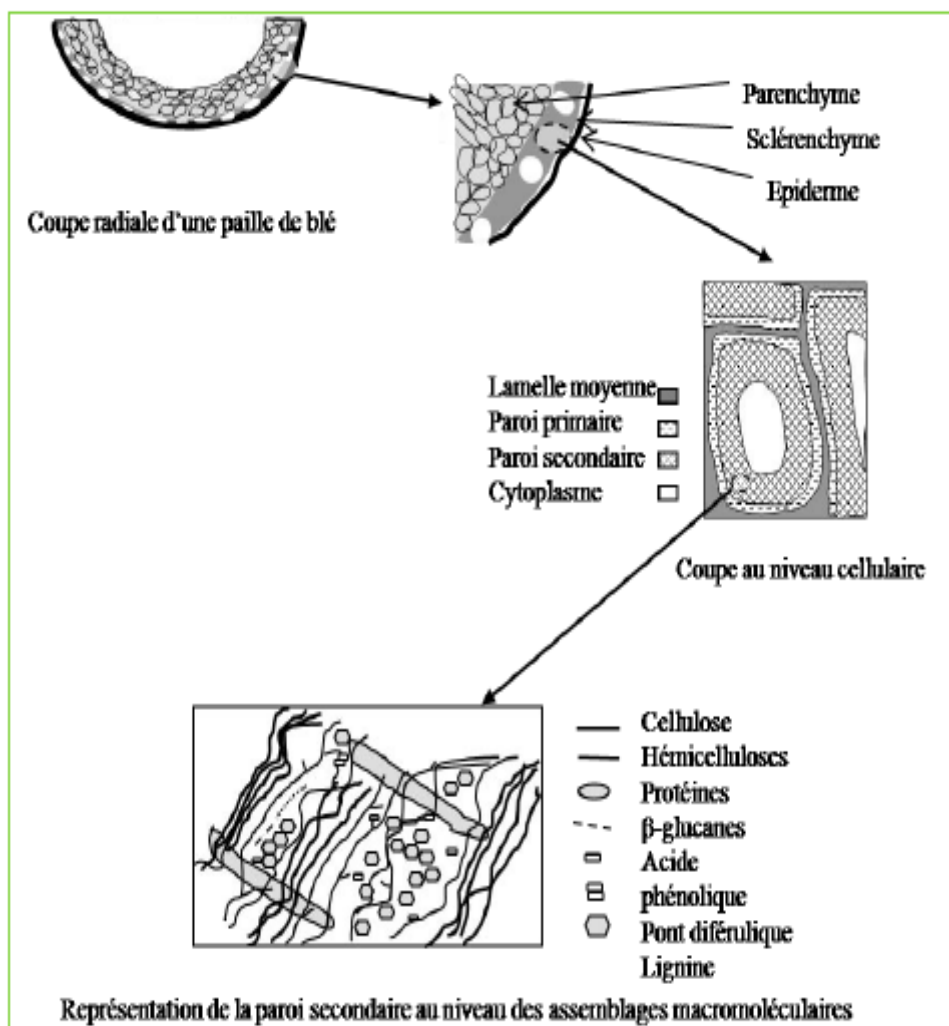


Figure 2. 7 : Structure microscopique et moléculaire de la paille de blé [54].

Les coupes longitudinales et radiales (Figure 2.7) apportent des informations sur la structure microscopique de la paille de blé. Cette céréale est constituée de couches à la structure tubulaire qui s'organisent de manière concentrique autour du lumen. En allant de la périphérie vers le centre, se trouvent l'épiderme, le sclérenchyme, le parenchyme et la moelle (cette dernière n'est pas toujours présente et parfois confondue avec le parenchyme) (Tableau 2.1). Chacune de ces couches se compose de cellules de natures diverses qui peuvent être décrites rapidement. **L'épiderme** est riche en cellulose et forme la couche externe dure et rigide qui entoure la tige. Il est aidé dans cette fonction par **le sclérenchyme** qui est un tissu très lignifié et donc très rigide. **Le parenchyme** quant à lui, est un matériau cellulaire composé principalement de cellulose et qui contient de larges faisceaux vasculaires chargés du transport de l'eau et des nutriments le long de la tige. Chacun de ses tissus sont présents dans des proportions variables (Tableau 2.2)

Proportion des différentes couches anatomiques des pailles de blé		
	% en volume	% en masse
Epiderme (%)	5 - 7	15
Sclérenchyme (%)	25 - 27	55
Parenchyme (%)	65 - 69	30

Tableau 2. 1: Caractéristiques anatomiques des pailles de blé.

Caractéristiques	Unité	Fibre de paille
Masse volumétrique apparente	Kg/m ³	210
Diamètre	mm	Entre 1 et 4
Longueur	mm	Entre 20 et 60

Tableau 2. 2: Caractéristiques physiques des fibres de paille utilisées.

c) *Fibres d'aiguilles de pin*

Les pins sont des résineux. Ils se sont des arbres de la famille des pinacées et du genre *Pinus* (Figure 2.8). Cette famille comprend plus de 110 espèces. On les distingue des autres membres de la famille par leurs feuilles, qui sont des aiguilles ou pseudophylles dont la longueur varie entre 4 et 20 cm, sont disposées en faisceaux. Chaque faisceau comprend un nombre d'aiguilles particulier d'après lequel on divise les espèces en deux groupes : les espèces dont les aiguilles sont groupées par deux ou rarement, par trois et les espèces dont les aiguilles sont groupées par cinq (Tableau 2. 1).



Figure 2. 8: *Arbre d'aiguille de Pin.*

Caractéristiques	Unité	Fibre d'aiguilles de pin
Masse volumétrique apparente	Kg/m ³	550
Diamètre	mm	Entre 1 et 2
Longueur	mm	Entre 500 et 1200

Tableau 2. 3 : : *Caractéristiques physiques des fibres d'aiguilles de pin utilisées.*

Les aiguilles sont souvent plus petites que celles des feuillus caducs moins découpés, et surtout plus épaisses, plus dures, souvent vernissées, et contenant peu d'eau. Ainsi protégées, elles résistent mieux aux températures négatives et elles perdent moins d'eau par transpiration, et peuvent donc se maintenir avec un flux de sève réduit (Figure 2.9). Ils restent présents et vert en Hiver. Ses aiguilles vivent 3 à 4 ans, mais ne tombent jamais toutes en même temps.

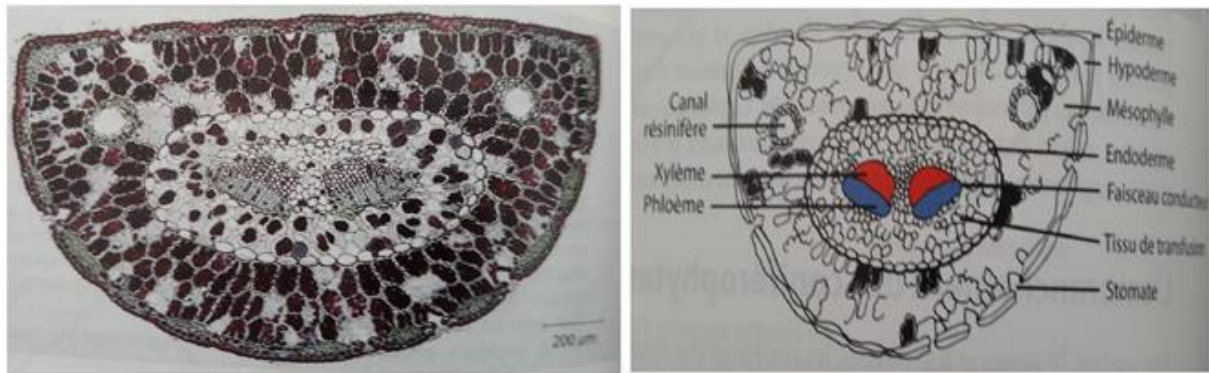


Figure 2. 9: Coupe transversale d'une aiguille de Pin.

Le genre *Pinus* comprend naturellement au Maroc les espèces suivantes : pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), pin maritime (*Pinus pinaster* Sol.) et pin noir (*Pinus nigra* Arn.). Ce dernier pin est limité à une centaine d'hectares dans le Rif centro-occidental alors que les deux autres espèces sont relativement bien présentes dans le paysage forestier marocain (Figure 2.10).



Figure 2. 10: Fibre d'aiguilles de pin.

III. Appareils et Techniques utilisés

A. Technique d'analyse Granulométrie

1. Généralités

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques taille et masse. L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 200 mm. On appelle :

- Refus : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- Tamisat (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Il y a plusieurs techniques d'analyse granulométrique qui sont basées sur des principes variés : séparation mécanique (tamisage) ou par l'intermédiaire d'un fluide, gaz ou liquide, variation de résistance électrique, imagerie, diffraction ou absorption de rayonnements. Ces techniques sont :

- Le tamisage
- La sédimentation
- Le compteur Coulter
- L'analyse par imagerie
- La granulométrie laser.

Dans ce travail, on va utiliser pour la détermination de la granulométrie de nos échantillons, la technique de Tamisage (Figure 2. 12), qui est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique, et aussi l'une des méthodes les plus largement utilisées pour son faible coût. Le principe de base du tamisage consiste à diviser un matériau pulvérulent en le faisant passer à travers plusieurs tamis dont les caractéristiques dimensionnelles sont connues.



Figure 2. 12: Technique de Tamisage.

2. *Sédimentométrie*

Après l'essai de tamisage, on recueille les particules qui ont traversé le tamis d'ouverture 80 μm . Ensuite, on mesure leurs grosseurs par sédimentométrie (Figure 2.13). La procédure utilise le matériel suivant [5,10–13]:

- Deux éprouvettes graduées de 1000 ml, de diamètre = 5,5 cm
- Un thermomètre et une montre
- Un densimètre gradué de 0,995 à 0,1030 g/cm^3 [14].

La fraction de terre de diamètre inférieure à 0,08 mm qui doit être analysée est préparée sur la base des fines qui ont été étuvées après tamisage : 20g prélevées et mélangées avec 20 cm^3 de défloculant.

La solution est remuée avec un agitateur pendant 3 min et laissée au repos pendant 18 heures. Les mesures commencent après ce délai. On agite à nouveau la solution de la 1^{re} éprouvette pendant 3 min puis on y plonge le densimètre doucement, après 45 secondes. On prend avec le chronomètre les mesures à 1min et 2min, sans sortir le densimètre. Les autres mesures sont prises à 5min, 10min, 30min, 1h, 2h, 5h, et 24h.

On plonge le densimètre environ 15 secondes avant de faire la lecture et on le retire aussitôt pour le plonger dans l'éprouvette témoin (figure 2.14). Il est très important de vérifier à chaque mesure l'égalité de température des 2 éprouvettes car une différence peut influencer la qualité de l'analyse. On ne poursuit pas l'analyse au-delà de 0,001mm car pour cette taille de

grains, des phénomènes de turbulence et de défloculation perturbent la sédimentométrie. La procédure de cet essai consiste à mesurer la vitesse de sédimentation des grains. Cette vitesse dépend de leurs tailles et est déduite par la mesure de la densité de l'échantillon en suspension dans une solution aqueuse à des instants bien déterminés.

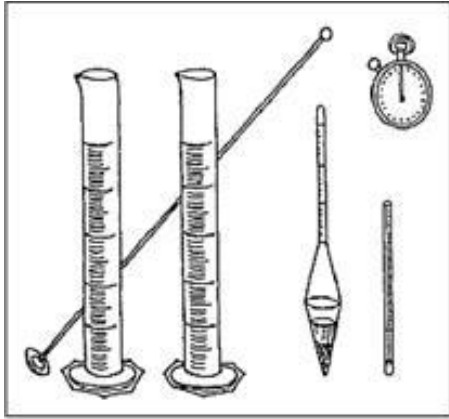


Figure 2. 13: Équipement pour sédimentométrie.



Figure 2. 14: Test de sédimentation.

3. *Granularité optimale*

Les conditions auxquelles devra répondre une granularité optimale pour une terre utilisée pour les constructions sont :

- Sa courbe granulométrique doit être inscrite dans les fuseaux limites préconisés par CRATerre ;
- Elle doit se rapprocher le plus possible de la courbe idéale ;
- Elle doit être approximativement parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale, surtout dans les régions des limons.

4. *Les limites d'Atterberg*

Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) permettent d'établir un lien entre le teneur en eau du sol et son comportement (Figure 2.15). Ces limites sont déterminées sur la fraction passant au travers du tamis 0,400 mm. La consistance d'un sol peut évoluer dans de larges limites lorsque sa teneur en eau varie. La terre peut être définie suivant quatre états : dur, friable, plastique et liquide (Figure 2.16).

Les deux limites les plus utilisées sont :

- La limite de liquidité : c'est la teneur en eau du sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique. Elle est notée W_L .
- La limite de plasticité : c'est la teneur en eau du sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide (le sol durcit et se fissure). Elle est notée W_p .

La connaissance de la limite de liquidité et de la limite de plasticité permet de définir l'étendue du domaine plastique du sol : c'est l'indice de plasticité noté $I_p = W_L - W_p$. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon.



Figure 2. 15: Appareillage de limites d'Atterberg.

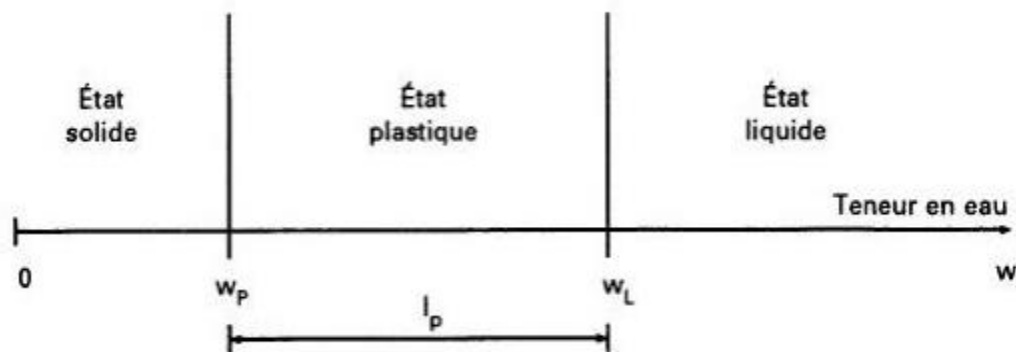


Figure 2. 16: Présentation des limites d'Atterberg.

B. Techniques de l'analyse chimique et minéralogique

Pour étudier les échantillons (la terre, les fibres de paille, les fibres d'aiguilles de pin et la chaux), différentes techniques d'analyse chimique et minéralogique ont été systématiquement employées : La diffraction des rayons X (DRX), L'infrarouge rouge (IR) et microscopie électronique à balayage (MEB) combinée à la microanalyse de l'énergie dispersive des rayons X (EDX).

1. Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode d'identification des phases minérales cristallines présentes dans des échantillons. Elle peut permettre la mise en évidence de phases amorphes et la semi-quantification des minéraux identifiés [58].

Un cristal est constitué de matière diffusante répartie périodiquement dans l'espace. Il est caractérisé par son réseau ainsi que par sa structure cristalline. Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatique entre en contact avec le cristal, il y a interaction élastique entre le rayonnement incident et le nuage électronique de chacun des atomes.

Leur structure interne et donc l'énergie interne des atomes ne sont pas modifiées. Dans ce cas, le transfert d'énergie est nul ou très faible. C'est-à-dire que la longueur d'onde associée aux rayons diffusés est conservée par rapport à l'onde incidente.

L'appareil de diffraction des rayons X est constitué d'une source de rayons X, d'un support pour l'échantillon qui se présente sous forme de poudre, et d'un détecteur de rayons X diffracte. La Figure 2.17 est un schéma simplifié d'un diffractomètre de rayons X sur poudre.

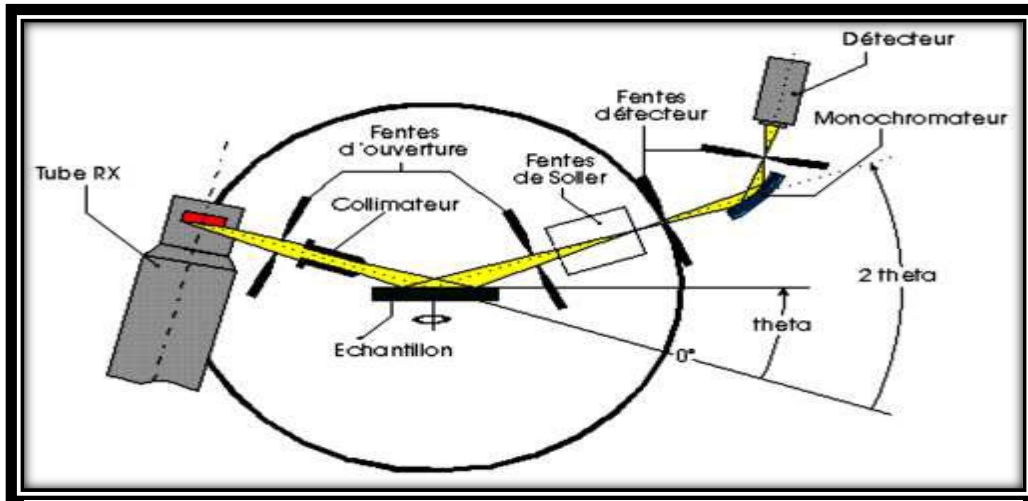


Figure 2. 17: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X [58].

La longueur d'onde des rayons X étant du même ordre de grandeur que la distance qui sépare les plans atomiques des réseaux cristallins, la structure du cristal diffractera un faisceau de rayons X de telle sorte que le rayonnement conserve sa cohérence, on parle de diffusion cohérente ou élastique. Les atomes (ou molécules) d'un cristal appartiennent à des familles de plans réticulaires parallèles notées (hkl). Chaque ensemble de plans parallèles se caractérise par une distance inter-réticulaire d_{hkl} entre chacun d'entre eux. L'onde plane incidente de vecteur d'onde k_0 fait avec les plans un angle θ , appelé angle de Bragg (Figure 2.18).

Les ondes diffractées vont interférer constructivement dans certaines directions si elles sont en phase, c'est-à-dire si les différences de marche optique d entre les rayons diffusés par deux nœuds successifs sont toutes égales à un nombre entier de longueur d'onde. C'est la condition d'accord de phase, dite condition de Bragg :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad (2.1)$$

n : ordre de diffraction (nombre entier).

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé.

h, k et l : indices des plans du réseau cristallin (nombres entiers positifs ou nuls).

d_{hkl} : distance entre deux plans d'indices h, k et l .

θ_{hkl} : angle entre le rayon incident et la surface de l'échantillon correspondant à une interférence constructive créée par les plans (hkl).

Dans le cas d'une maille cubique, les distances inter-réticulaires d_{hkl} sont obtenues grâce à la relation :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2.2)$$

a : paramètre de la maille cubique

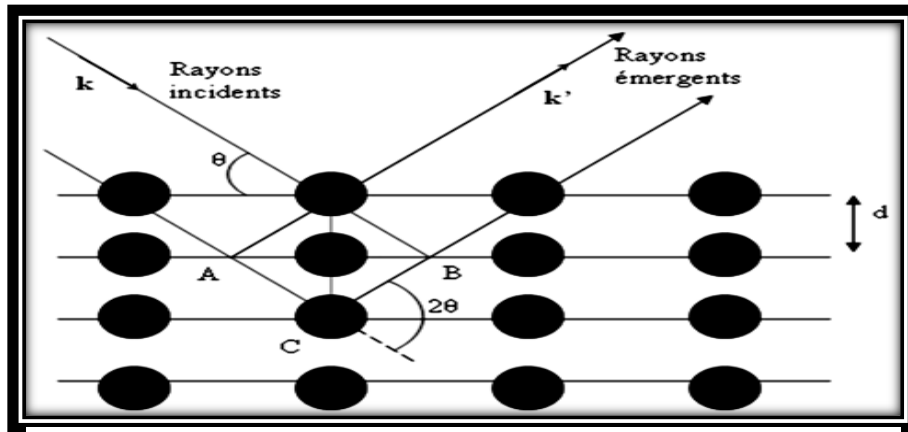


Figure 2. 18: Condition de Bragg. Schéma de réflexion d'une famille de plans réticulaires (hkl) [59].

La diffraction sur poudre suppose que l'on a diffraction sur un grand nombre de cristallites dont les orientations sont aléatoires. En supposant que l'atténuation du faisceau de rayons X due à l'absorption est faible et que les effets d'extinctions sont négligeables, l'intensité des pics de diffraction est exprimée par la relation suivante :

$$I_{hkl} = I_0 r e^2 \lambda^3 P_{hkl} L_{hkl} \frac{Hc}{8\pi R \sin\theta} D \left(\frac{1}{v}\right) M_{hkl} V F_{hkl}^2 \quad (2.3)$$

I_0 : Intensité du faisceau incident.

$r e^2 = (e^2/mc^2) = 7,9.10^{-26} \text{ cm}^2$: carré du rayon classique d'un électron.

λ : longueur d'onde utilisée.

$P_{hkl} = (1+\cos^2 2\theta)/2$: facteur de polarisation pour un rayon incident non polarisé.

$L_{hkl} = 1/\sin 2\theta$: facteur de Lorentz.

H_c : longueur de corde.

R : distance de l'échantillon au détecteur.

D : facteur de Debye–Waller, prenant en compte l’agitation thermique.

v : volume de la maille élémentaire.

M_{hkl} : facteur de multiplicité.

V : volume de l’échantillon.

F_{hkl} : facteur de structure.

L’intensité diffractée est enregistrée en fonction de l’angle 2θ du faisceau incident et donne lieu à un diagramme de diffraction dont les pics correspondent aux différentes familles de plans [hkl] (Figure 2.19). Cette intensité contient les informations essentielles sur l’arrangement structural, notamment sur la position des atomes dans la maille et les facteurs de déplacements atomiques (isotropes ou anisotropes). En effet, l’intensité intégrée d’une raie de diffraction est proportionnelle au carré du module du facteur de structure F_{hkl} défini comme :

$$F_{hkl} = \sum_j f_j \left(\frac{\sin \theta_{hkl}}{\lambda} \right) e^{2i\pi(hx_j + ky_j + lz_j)} e^{-B(T) \frac{\sin^2 \theta_{hkl}}{2\lambda}} \quad (2.4)$$

λ : longueur d’onde utilisée

$f\left(\frac{\sin \theta_{hkl}}{\lambda}\right)$: facteur de diffusion atomique de l’atome j

x_j, y_j et z_j : coordonnées de l’atome j

T : température

B(T) : exprime le carré de la déviation des atomes autour de leur position d’équilibre ou, agitation thermique.

La cristallinité des fibres naturelles a été évaluée à partir de l’indice de cristallinité (I_c), qui est calculé selon la méthode empirique de Segal. Cet indice est déterminé d’après l’équation 2.5, en utilisant les intensités des raies 002 (I_{002}) à un angle 2θ compris entre 21° et 23° et l’intensité minimale I_{am} , pour l’angle 2θ compris entre 18° et 20° (Figure 2.20). Segal a développé leur méthode empirique afin d’estimer le degré de cristallinité de la cellulose native.

$$I_c(\%) = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} * 100 \quad (2.5)$$

I_{002} : l'intensité maximale de diffraction du pic treillis (002) à un angle 2θ compris entre 21° et 23° , ce qui représente à la fois les matériaux cristallins et amorphes.

I_{am} : l'intensité de la diffraction du matériau amorphe, qui est prise à un angle de 2θ entre 18° et 20° où l'intensité est au minimum.

D'autre part, L'utilisation de la DRX offre une facilité pour évaluer les indices cristallins (**Cr**) des composites en utilisant l'équation 2.6 :

$$Cr\% = (AC/AT).100 \quad (2.6)$$

avec :

AC : est l'aire en dessous du pic de diffraction du plan (002), pic à $2\theta = 22,5^\circ$, et à partir du plan (101), pic à ($13-18^\circ$).

AT : est l'aire au-dessous de toute la région dans les spectres DRX.

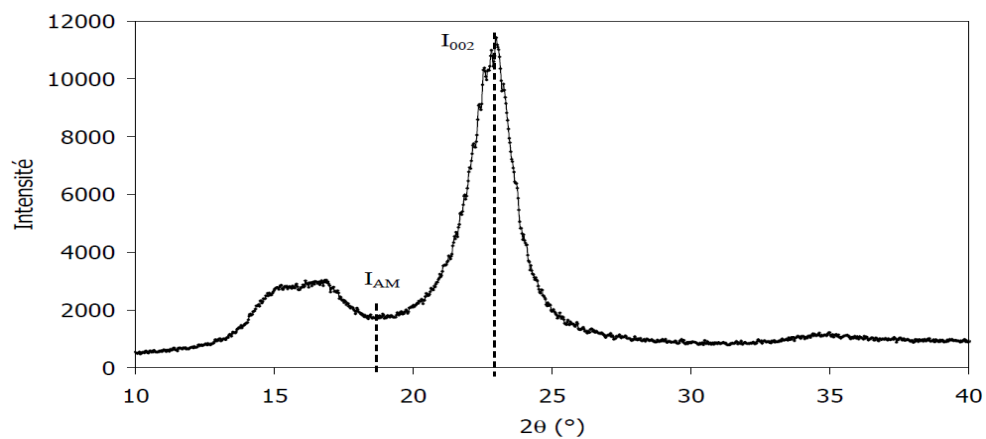


Figure 2. 19: Diffractogramme type d'une fibre de chanvre entre 10° et 40° .



Figure 2. 20: Photo de diffractomètre.

2. *Microscopie électronique à balayage et microanalyse*

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM en anglais : Scanning Electron Microscopy) est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions électrons-matière. Cette technique d'analyse est capable de produire des images à haute résolution de la surface d'un échantillon.

a) *Principe*

Le Microscopie Électronique à Balayage (MEB) fonctionne sur le principe suivant : Un faisceau d'électrons monocinétiques balaye la surface de l'échantillon à analyser et l'interaction entre la sonde électronique et l'échantillon génère des particules et des rayonnements qui permettent d'obtenir différentes informations sur l'échantillon telles que la topographie et la composition chimique. Il est constitué d'une enceinte sous vide secondaire où un faisceau électronique est mis en forme par des lentilles électromagnétiques pour exciter l'objet à étudier (Figures 2.21). Le faisceau d'électrons est focalisé sur la surface de l'échantillon sous forme d'une tache (spot), déplacée ligne par ligne de façon à balayer une surface rectangulaire. La source d'électrons est un filament de tungstène parcouru par un courant de chauffage. Le wehnelt, plaque percée d'un orifice et portée à une tension positive de quelques centaines de Volts, est placé à proximité de la pointe du filament. L'accélération des électrons est réalisée par une deuxième plaque percée également d'un orifice, et portée à un potentiel ajustable. Le flux d'électrons est ensuite limité par les diaphragmes et focalisé sur l'échantillon à l'aide de différentes bobines électromagnétiques (Figures 2.22). Des bobines défectrices en x et en y

permettent de déplacer le pinceau électronique à la surface de l'échantillon. Des composés binaires sont utilisés comme étalons pour effectuer des corrections sur les valeurs quantitatives obtenues par EDS.

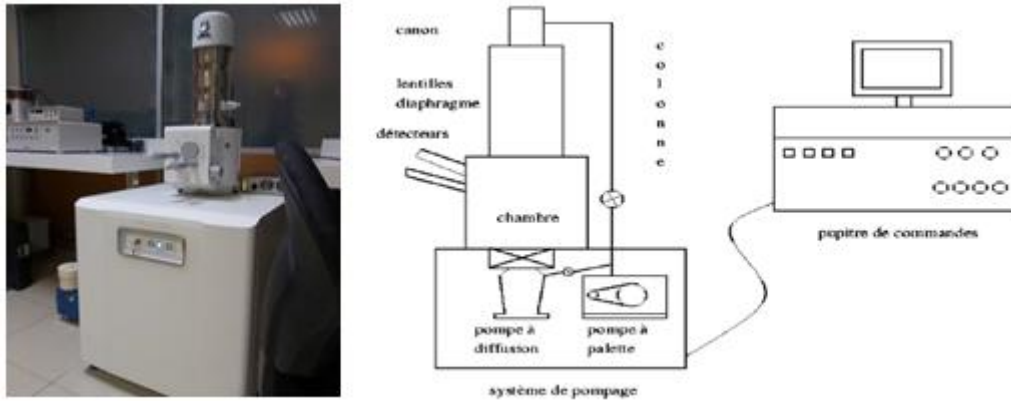


Figure 2.21: Microscope électronique à balayage.

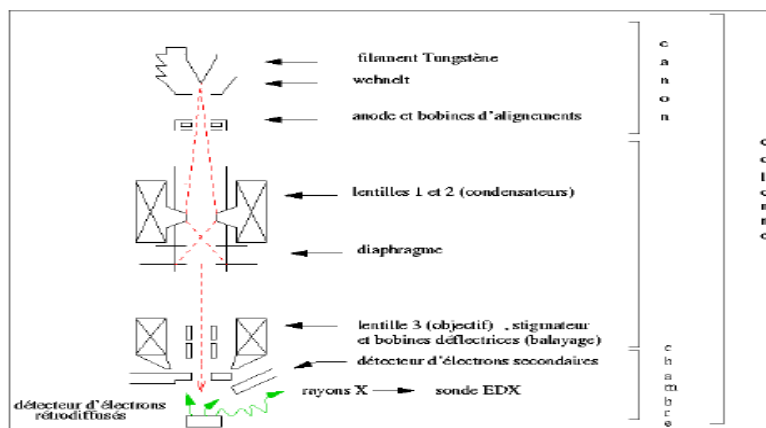


Figure 2.22: Schéma de fonctionnement de MEB.

b) Interactions du faisceau électronique avec l'échantillon

En microscopie électronique, et sous l'impact du faisceau d'électrons primaires accélérés venant frapper la surface de l'échantillon, les photons réémis sont remplacés par tout un spectre de particules ou rayonnement : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons Auger ou rayons X (Figure 2. 23). Ces différentes particules ou rayonnements sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage de l'objet apporte différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon.

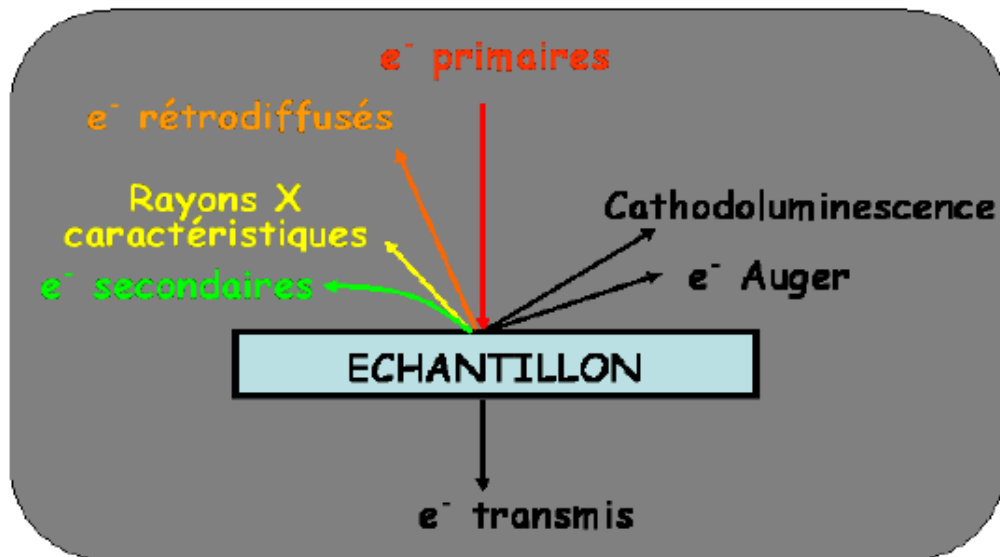


Figure 2. 23: Interaction entre le faisceau électronique et l'échantillon [62].

- Lors d'un choc entre un électron primaire du faisceau et un atome de l'échantillon, l'électron primaire peut céder une partie de son énergie à un électron peu lié de la bande de conduction de l'atome (choc inélastique), provoquant une ionisation par éjection de ce dernier. L'électron éjecté est appelé « électron secondaire » (Secondary Electron) et donne une information topographique de l'échantillon.
- Les « électrons rétrodiffusés » (Back Scattered Electron) sont des électrons issus du faisceau primaire qui sont entrés en collision avec les atomes de l'échantillon et qui ont réagi de façon quasi élastique avec eux. Ils donnent ainsi une information qualitative sur la nature chimique des éléments présents dans un échantillon : plus le numéro atomique de l'électron d'un atome est élevé, plus il apparaîtra clair et brillant sur l'image finale.
- Le faisceau d'électrons est suffisamment énergétique pour ioniser les couches profondes des atomes et produire ainsi l'émission de rayons X. La résolution spatiale d'analyse dépend de l'énergie de la raie X détectée, de la nature du matériau, de la fluorescence secondaire. Elle est en général supérieure au micromètre.
- Ce sont des électrons dont la faible énergie est caractéristique de l'élément émetteur (utilisés pour l'analyse élémentaire) et du type de liaison chimique.
- Lorsque des matériaux isolants ou semi-conducteurs sont bombardés par le faisceau d'électrons, des photons de grande longueur d'onde (ultraviolet, visible) sont émis. Le spectre obtenu dépend du matériau étudié et de sa pureté.

- La pénétration du faisceau d'électrons dans un cristal en fonction de son incidence par rapport à une famille de plans inter-réticulaires. Le contraste des images en électrons rétrodiffusés donnera des renseignements sur la structure cristalline du produit.

Le microscope électronique à balayage (MEB) a par ailleurs été couplé à un spectromètre à analyse dispersive (EDS : Energy Dispersive Spectrometry). Ce dernier est un monocristal de silicium polarisé, dopé au lithium et qui reçoit la totalité du rayonnement X.

3. *La spectroscopie infrarouge (IR)*

Les mesures de spectroscopie infrarouge (I.R.) sont réalisées sur un spectromètre à transformée de Fourier (Figure 2.24).

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est une technique sensible qui a été développée afin d'identifier des éléments organiques et de certains des éléments inorganiques à partir de leurs propriétés vibrationnelles, parce qu'elle donne de l'information sur les structures moléculaires et la nature chimique du matériau analysé. Cette technique est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. En effet, le rayonnement I.R. excite des modes de vibration (déformation, élongation) spécifiques de liaisons chimiques. La comparaison entre rayonnement incident et transmis à travers l'échantillon suffit alors à déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon. La loi de Beer-Lambert permet de déterminer l'énergie absorbée.

$$I = I_0 \text{Exp}(-\varepsilon \cdot l \cdot C)$$

I : Intensité de la radiation transmise, I_0 : Intensité de la radiation incidente,

ε : Coefficient d'extinction, C : Concentration de l'élément absorbant,

l : Épaisseur de la substance absorbante.

Pour appliquer cette technique dans le cas d'échantillons solides, il est nécessaire, au préalable, de mélanger une petite quantité de l'échantillon finement broyé à un composé transparent dans le domaine spectral étudié (5000-450 cm^{-1}). A cette fin, nous employons le bromure de potassium (KBr). Les échantillons à analyser sont préparés sous forme de pastilles en mélangeant 5 % en Masse de fibres (ou du sol) préalablement broyées à 95% en masse de KBr.



Figure 2. 24: Spectromètre Infrarouge.

4. *Mesure de pH*

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre (Figure 2. 25) sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évolués ou carbonates. L'analyse de notre sol a montré que son pH est 7.92 D'après Vilenkina [60] pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6.



Figure 2. 25: pH-mètre

C. Techniques des analyses mécaniques et Thermique

1. Propriétés mécaniques

On s'intéresse dans cette étude à déterminer la caractéristique mécanique suivante : la résistance en compression des blocs d'adobe renforcé par la chaux à l'état sec. Pour cet essai, quatre blocs ont été testés.

Essai de compression simple :

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance nominale en compression simple des adobes en terre (Figure 2. 26).

L'essai de compression est réalisé sur plusieurs blocs d'adobe selon les normes NF EN 14617-15.

Les tests de la résistance à la compression mono-axiale ont été réalisés sur des éprouvettes de dimension (4x4x16) cm grâce à une presse équipée d'un vérin hydraulique.

La résistance maximale à la compression est déterminée par l'équation suivante :

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

avec R_c : la résistance à la compression (en MPa), F la force de rupture (en N) et S la surface d'application de l'effort (en mm²).

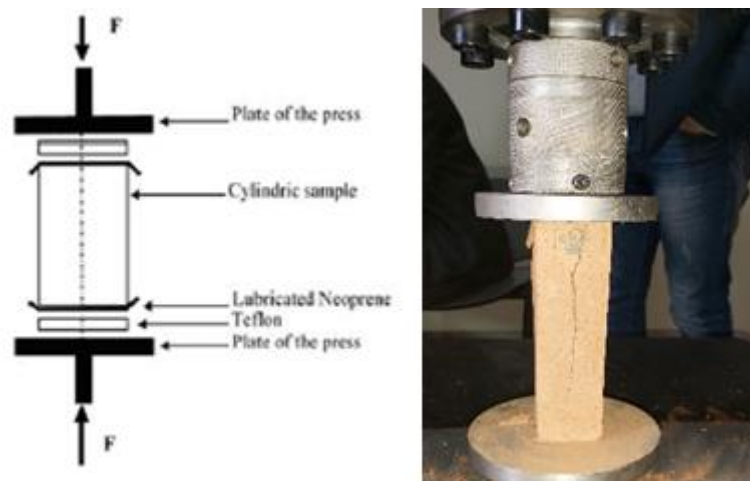


Figure 2. 26: Matériau expérimental de l'essai de compression.

2. *Propriétés thermiques*

On s'intéresse dans cette étude à déterminer la conductivité K (W / mK). CT-mètre a été utilisée pour établir ce paramètre. Concrètement, les échantillons ont été analysés à l'aide d'une double aiguille SH-1 capteur.

a) *Conductivité thermique*

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction, elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de un degré par mètre.

b) *Appareil utilise : CT-MTERE*

Le CT-METRE, appareil de contrôle non destructif Thermique (Figure 2.27), a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements.



Figure 2. 27: CT-METRE.

c) *Principe d'essais*

La mesure est réalisée par l'intermédiaire d'un CT mètre et d'une sonde placée entre deux plaques du matériau à caractériser. Un créneau de puissance est envoyé à la sonde via le CT mètre et se propage dans le matériau. Pendant le chauffage, le CT mètre enregistre toutes les 2 s la température au niveau de la surface de contact, on détermine la valeur de la conductivité thermique.

Une fois le KD2 Pro est allumé, le capteur est correctement inséré dans l'échantillon et doit être mesuré à travers 2 trous percés dans le matériau avec une mince pointe. Après environ 5 minutes, lorsque la barre de progression a complètement assombri, les résultats sont affichés sur l'écran.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre il a été l'objet de préciser les matériaux et les techniques expérimentales qui seront utilisés le long de notre étude. En fait, il faut pouvoir, à priori, connaître les types d'argile, la texture, les conditions optimales d'emploi du matériau à utiliser, et à posteriori, vérifier que le matériau et les structures fabriquées correspondent bien aux normes de qualité et de résistance requises par le bâtiment. La grande diversité des modes de mise en œuvre de la terre rend nécessaire l'étude des paramètres de base qui influencent les caractéristiques mécaniques et rhéologiques de la terre. La brique en terre crue et la terre compressée, tel que les BTS, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction jusqu'à nos jours. Actuellement, la terre crue intéresse à nouveau les constructeurs, car elle répond à la recherche de solutions respectueuses du développement durable.

Dans le présent travail, l'accent sera mis sur la construction en bloc de terre stabilisé car il constitue une véritable alternative aux matériaux onéreux, raison pour laquelle il faut maîtriser l'effet conjugué de la minéralogie et de la granulométrie de la terre sur sa stabilisation, à la chaux dans le cas étudié, ainsi que ses priorités mécaniques par stabilisation à l'aide des fibres. Ainsi que la définition des techniques et méthodes expérimentales pour déterminer ces caractéristiques et propriétés chimiques, minéralogiques, mécaniques et thermiques.

Chapitre 3 : Caractérisation et Élaboration des Matériaux

I. Caractérisations des matériaux

En fait, les matériaux utilisés dans cette étude sont : le sol, des matières végétales (fibres d'Aiguilles de pin et fibres de Paille) et un liant (La chaux). Toutes ces matières premières proviennent de la zone Had Laghoualem, dans la province de KHEMISSET.

A. Propriétés du sol

1. Analyse Granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique représentés dans la Figure 3.1 montre la position de la courbe granulométrique du sol étudié dans la courbe idéale et les fuseaux limites supérieur et inférieur, on peut observer que la situation de la courbe granulométrique de notre sol se situe entre la courbe idéale et le fuseau limite supérieur, et qu'elle est plus proche de la courbe idéale. Selon les recommandations de CRATerre (Centre International de la Construction en Terre). On peut conclure que le sol de Had Laghoualem peut bien être utilisée dans la construction.

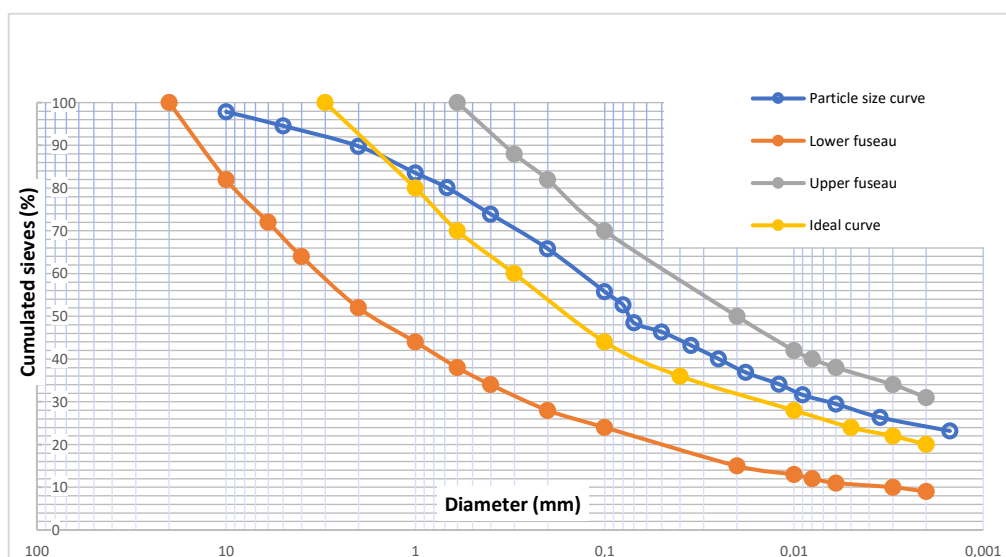


Figure 3. 1: Courbes granulométriques de la terre de Had Laghoualem.

2. Limites d'Atterberg

Les limites d'atterberg sont été mesurées avec un appareillage normalisé sur la fraction de sol qui passe au tamis de 0,40 mm, conformément à la norme NF P 94-051. Les résultats des essais sont présentés sur le Tableau 3. 1.

Argile	23.18%
Limon	25.28%
Sable	35.08%
Gravier	16.46%
Limite de liquide (LL)	35
Limite plastique (PL)	18
Indice de plasticité (IP)	17

Tableau 3. 1 : La fraction granulaire et les limites Atterberg de la terre de KHEMISSET.



Figure 3. 2: Essai d'Atterberg.

Les résultats présentés dans le Tableau 3.1 résumant la fraction granulaire et les limites d'Atterberg. Selon la classification du "triangle des textures" de l'INRA [61], on peut dire que le sol est défini comme un limon sableux -argileux. Et d'après le diagramme de Casa grande (Figure 3.2) l'argile grise est classée parmi les sols argileux peu plastiques.

3. *Mesure de pH*

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évolués ou carbonates. L'analyse de notre sol a montré que son pH est 7.91 D'après Vilenkina [60] pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6.

4. Diffraction des rayons X (DRX)

Dans notre cas d'étude les échantillons sont utilisés en poudre, la quantité adéquate est prélevée et broyée. Afin d'obtenir une distribution aléatoire des grains dans le but d'éviter qu'ils y aient des orientations préférentielles qui se manifesteraient par le renforcement de certaines familles de raies de diffraction. Cela permet également d'éviter les problèmes de micro-absorption en travaillant avec une poudre homogène ayant des grains de petite taille. De plus, la statistique de comptage étant liée à la quantité de la matière diffractant, il est nécessaire d'utiliser le plus grand volume possible de poudre, soit environ 100 mg dans notre cas. On étale cette poudre sur une plaque cylindrique d'altuglas munie au préalable d'un ruban adhésif double face pour limiter les pertes de poudre. La disposition de la poudre est plane et l'analyse s'effectue aux conditions normales de pression et température dans un intervalle angulaire compris entre 10 et 120° par pas de 0,01°.

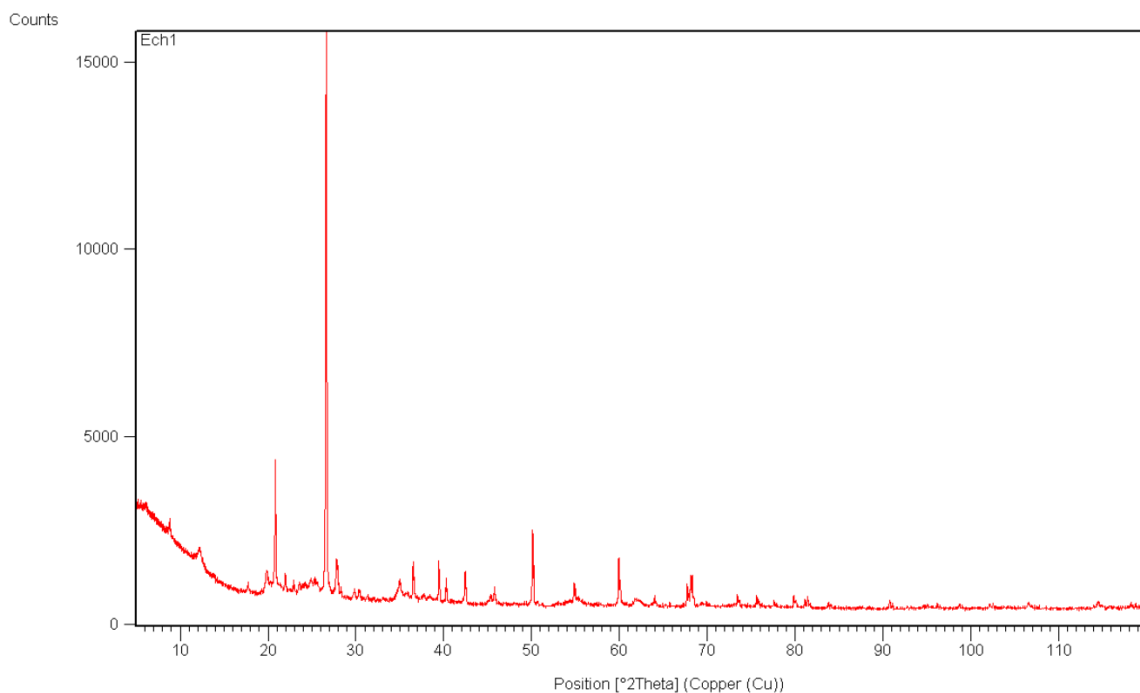


Figure 3. 3: Spectre de diffraction des rayons X de la Terre de Khemissat.

D'après le diffractogramme présenté sur la Figure 3.3, il est clair que la terre contient principalement du Quartz SiO_2 , de la kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ et de la Muscovite $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$. On remarque une très forte proportion de quartz dans le matériau. L'absence de smectites et la faible proportion d'illites montrent que l'argile ne gonfle pas. La composition minéralogique du matériau pourrait avoir un effet sur les propriétés physiques, thermiques et

mécaniques des briques, notamment leur densité, leur porosité, leur conductivité thermique et leur résistance à la compression.

5. *Microscopie électronique à balayage et microanalyse (MEB)*

La qualité des images obtenues en microscopie électronique à balayage dépend énormément de la qualité de l'échantillon analysé (Figure 3.4). Idéalement, celui-ci doit être absolument propre, plat et doit conduire l'électricité afin de pouvoir évacuer les électrons. Il doit également être de dimensions relativement modestes, de l'ordre de 1 à 2 centimètres. Toutes ces conditions imposent donc un travail préalable de découpe et de polissage. Afin d'obtenir une surface d'analyse la plus plane possible, les échantillons à analyser sont fixés sur un support métallique puis polis sur un disque de 500mm, 1000mm puis 3000 mm et enfin sur un disque de feutre enduit de pâte diamantée de granulométrie de 1 μ m au maximum.

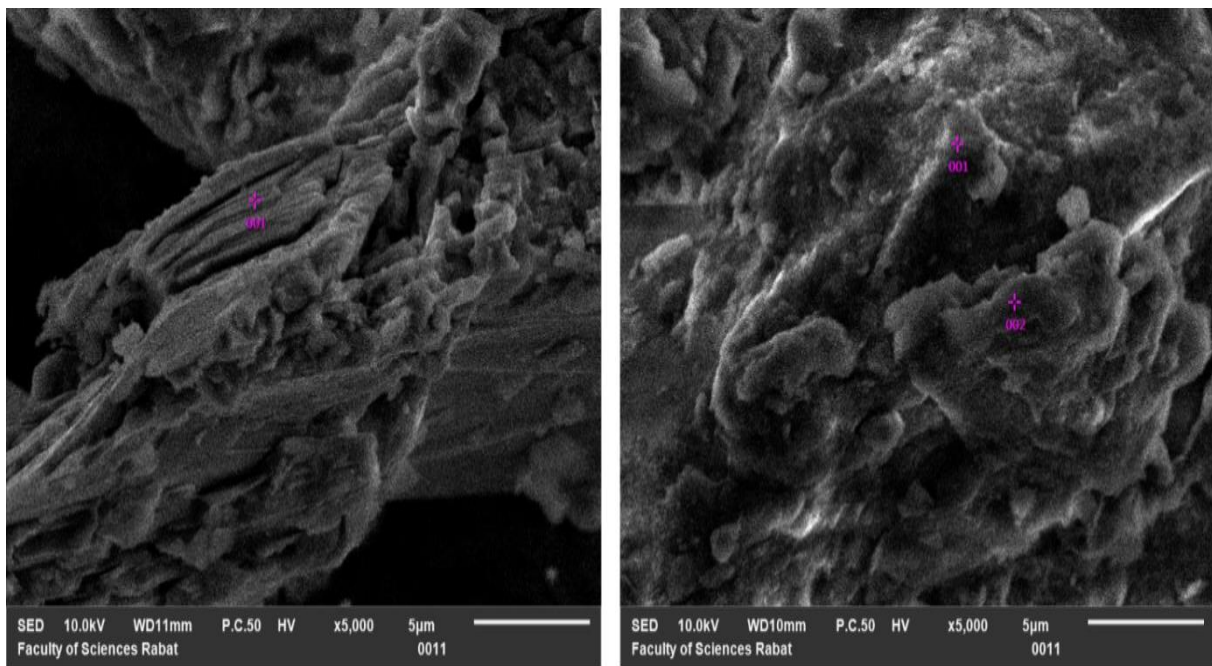


Figure 3. 4: Micrographies MEB d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.

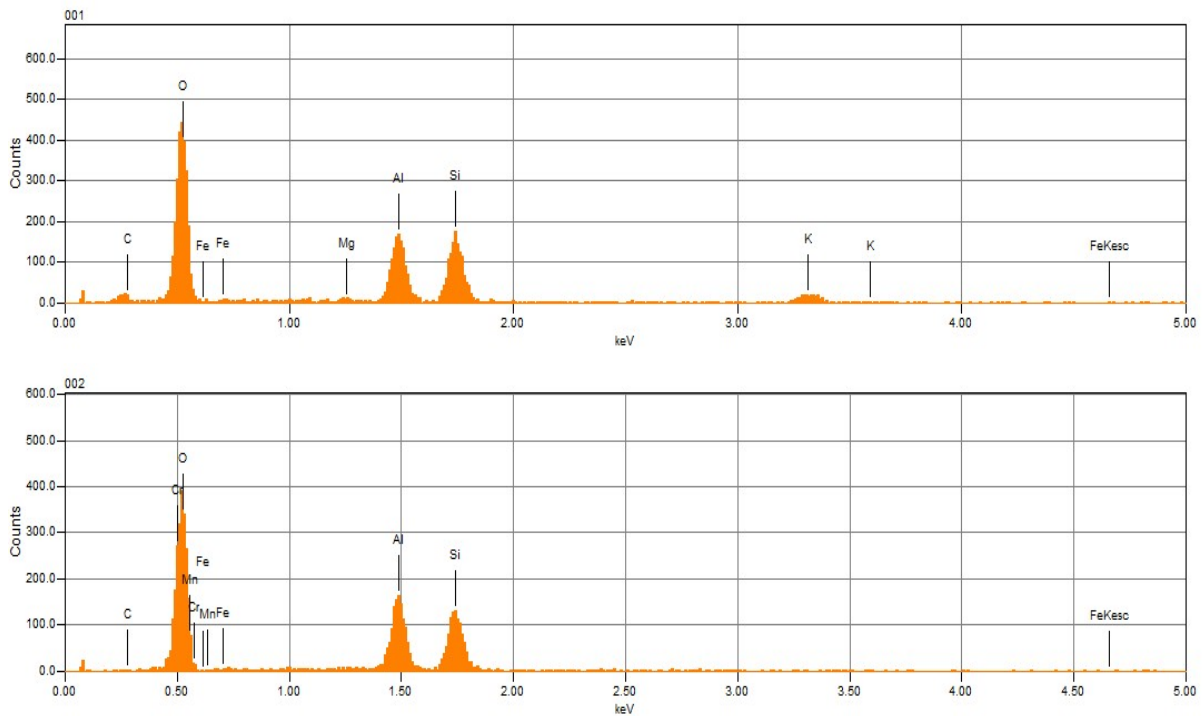


Figure 3. 5: Analyses EDS des zones d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.

Les examens au MEB effectués sur des échantillons de terre, la Figure 3.5 ont montré une structure hétérogène composée de particules isolées de kaolinite, de gros grains de quartz et de minuscules particules aciculaires de silice libre. La formule structurale de la kaolinite, déduite des analyses EDS, est la suivante : (Si), (Al), (Mg), (O) . Les zones riches en calcium, se manifestant par des zones claires.

6. Spectroscopie Infrarouge (IR)

Pour réaliser l'analyse par la technique de la spectroscopie IR dans le cas d'échantillons solides, on a, au préalable, mélangé une petite quantité de l'échantillon finement broyé à un composé transparent dans le domaine spectral étudié ($5000-450\text{ cm}^{-1}$). À cette fin, nous avons employé le bromure de potassium (KBr). Les échantillons à analyser sont préparés sous forme de pastilles en mélangeant 5 % en Masse de fibres (ou du sol) préalablement broyées à 95% en masse de KBr.

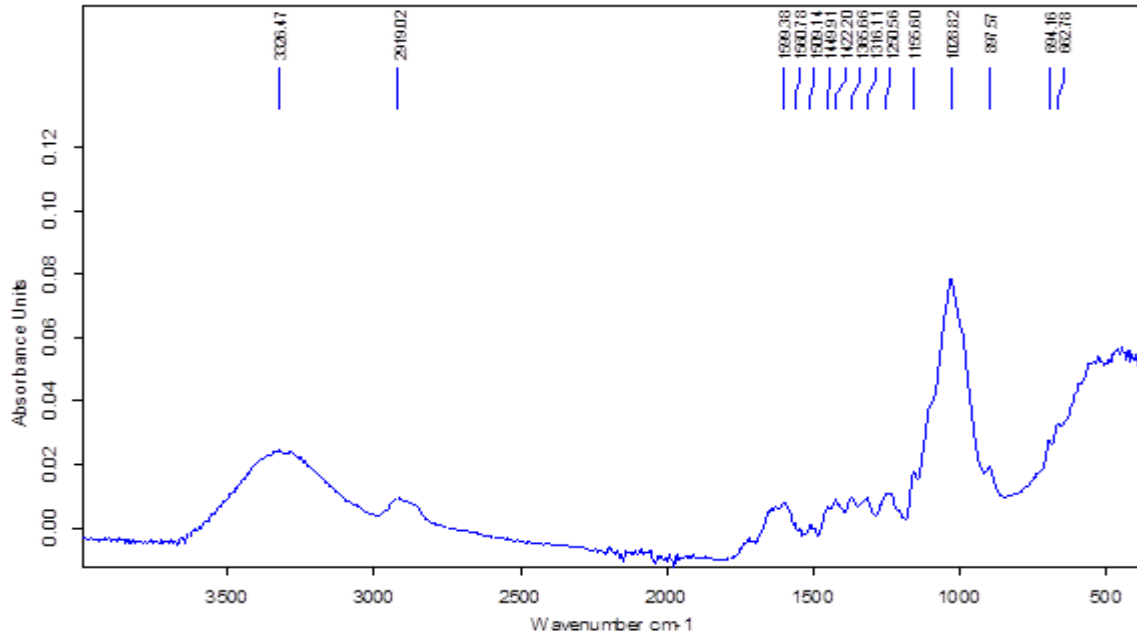


Figure 3. 6: Spectres infrarouges d'échantillons de terre argileuse de Khemisset.

Les spectres IRTF du sol sont représentés sur la Figure 3.6 et les bandes principales caractérisant la présence de quartz, de kaolinite et d'eau hygroscopique. Les clivages observés à 1250,56, 1316,11, 1365,66, 1422,20 et 149,91 cm^{-1} suggèrent que les groupes carbonates sont légèrement déformés et sont à l'état amorphe.

Les bandes de carbonates sont les suivantes : (1509,14;1560,78,1599,38 cm^{-1}), Quartz (1028,82, 1155,60 cm^{-1}). La présence de CH et de calcite est révélée par l'intensification de la bande à 897,57, 2919,02 cm^{-1} .

Il est à noter que le marquage intensification de la large bande à 3326,47 cm^{-1} , qui est communément attribué à l'eau d'hydratation, peut être considéré comme une indication de la présence de CSH, Kaolinite (694,16 cm^{-1} ,662.78).

B. Propriété de la Chaux utilisée

Pour des raisons économiques et pour la valorisation des matières premières dans la même région on a utilisé la chaux broyée de la ville Khemisset (MAROC) dont elle a les caractéristiques suivantes :

- Écologique et naturel
- Une esthétique que l'on ne peut obtenir avec un autre liant (badigeon, patine, tadelakt)

- Un excellent comportement au feu
- Une absorption de CO₂ lors de sa carbonatation
- Un pouvoir assainissant et désinfectant

➤ L'influence de la DRX et MEB sur la chaux

La photographie MEB de la chaux étudiée (Figure 3.7) montre des surfaces relativement hétérogènes. Selon le spectrogramme EDS de la Figure 3.8, les aires de couleur gris clair qui existent partout sur les agglomérats sont des clusters d'hydroxyde de calcium avec des traces de carbone. Le matériau gris foncé indique la présence de Ca, Al, Si, C et O.

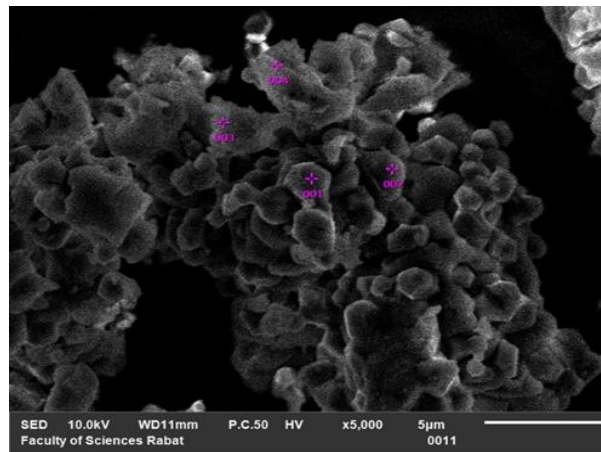


Figure 3. 7: Photographie MEB de la chaux.

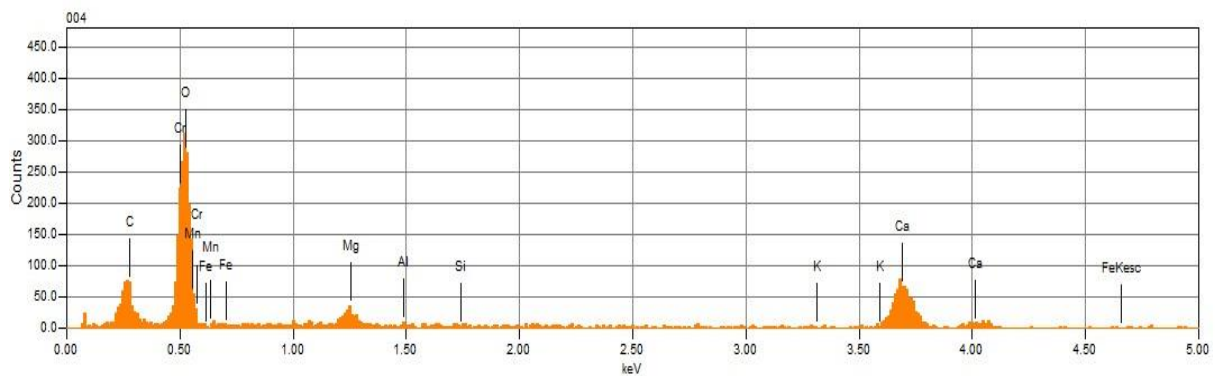


Figure 3. 8: Analyse EDS de la chaux.

Les résultats de l'analyse chimique de la chaux sont présentés dans le Tableau 3.2

La chaux contient une importante quantité de CaO. Il possède aussi d'une teneur non négligeable de MgO. D'autres oxydes (Al_2O_3 SiO_2) ont été détectés dans l'analyse chimique.

Le diagramme de diffraction des rayons X de la chaux, présenté sur la Figure 3.9 montre que la chaux contient principalement du Calcite $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de Periclase, MgO.

OXYDES	CO_2	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO
%	25.57	26.90	0.86	0.71	45.97

Tableau 3. 2: Composition chimique de la chaux.

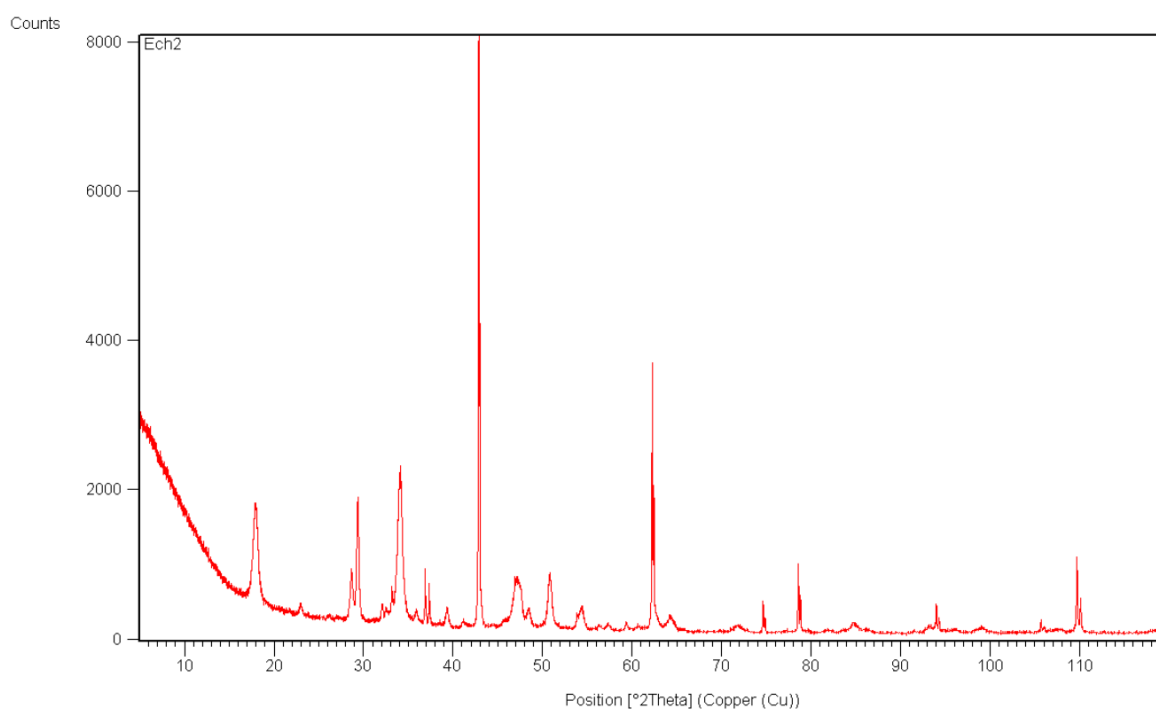


Figure 3. 9: Spectres de diffractions des rayons X de la chaux.

C. Fibres de Paille

La paille de blé utilisé dans notre recherche de la même région est constituée par la tige et l'épi (ou rachis) à son sommet; elle a pour rôle de porter les organes reproducteurs et les feuilles, ainsi que le système de transport de l'eau et des nutriments. La tige est un cylindre creux, constitué de couches concentriques et divisée en nœuds et entre-nœuds sur lesquels se développent les feuilles (Figure 3.10).

➤ L'analyse DRX et MEB des fibres de Paille

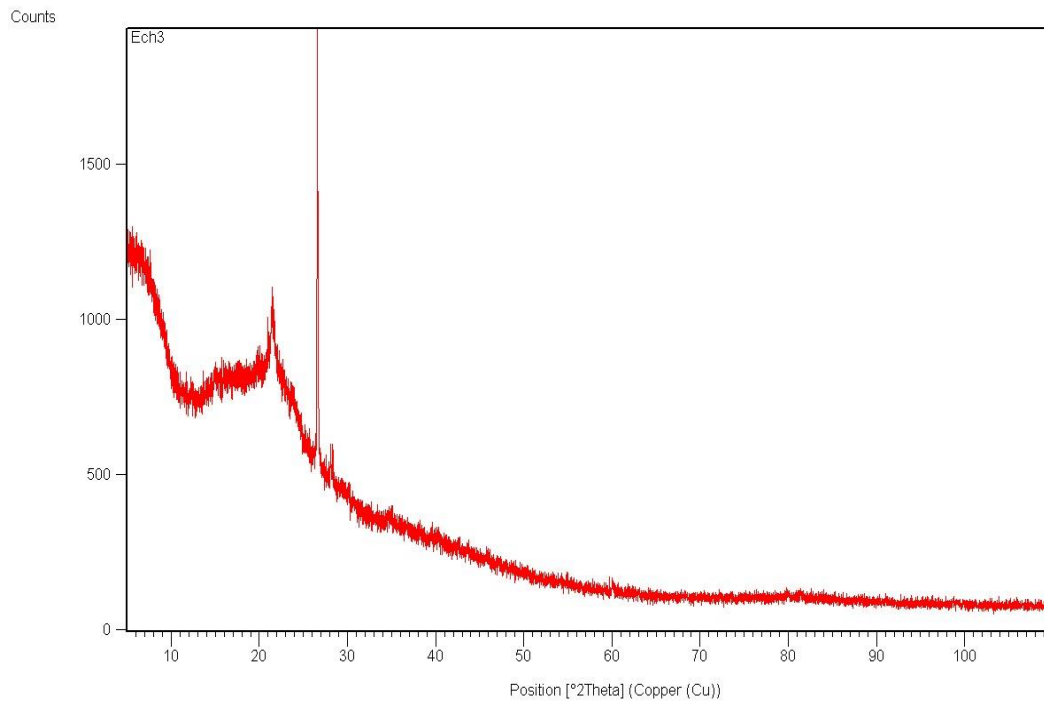


Figure 3. 10: Spectre de diffraction des rayons X sur paille utilisée.

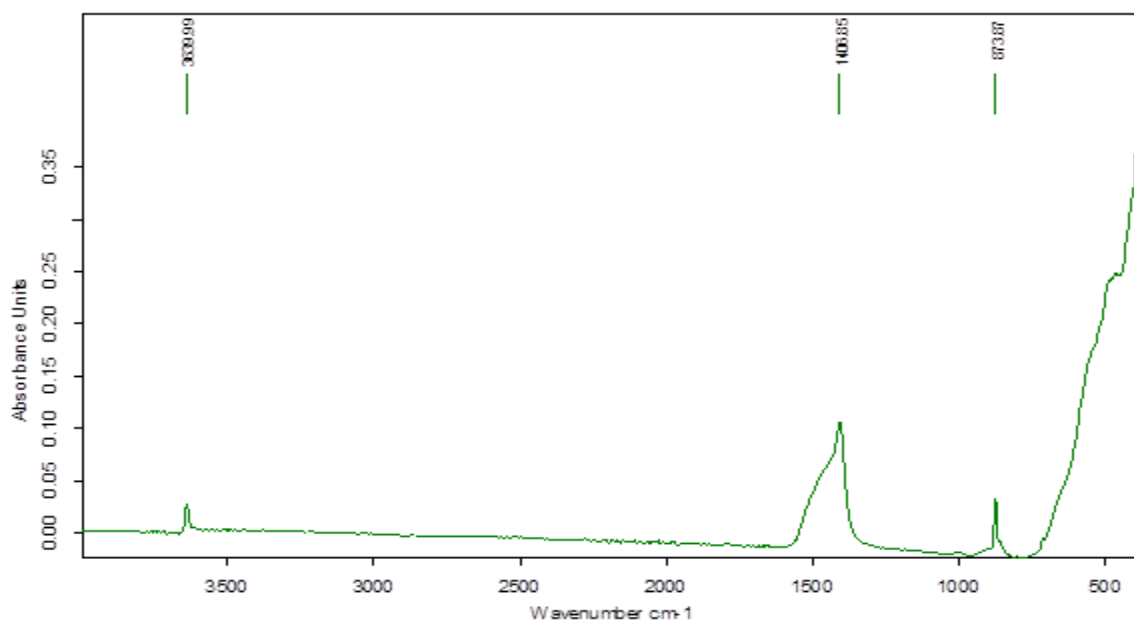


Figure 3. 11: Spectres Infrarouges des échantillons : paille.

La composition en hémicelluloses, lignine, cellulose, protéines et cendres de la paille de blé est très variable d'une part à cause de la variabilité de la matière végétale fonction de la nature du sol, du climat et de l'état de maturité de la plante au moment de la récolte, et d'autre part, à cause des différentes méthodes d'analyse employées.

Les pailles sont constituées de parois végétales qui représentent de 60 à 80 % de la matière sèche. Ces parois sont composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine (respectivement 45-55 %, 20-25 %, 8-12 % de la MS) (Figure 3.11).

Par ailleurs, les pailles contiennent une petite quantité de glucide solubles (de 1 à 3 %) et des quantités faibles, mais variable, de matière azotées (entre 2 à 5%).

Les minéraux sont présents en plus faible quantité ($\approx 5\%$) et les protéines sont un composé minoritaire.

D. Fibres d'aiguilles de Pin

En générale, le Maroc contient plusieurs genres de Pinus à savoir : pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.), pin maritime (Pinus pinaster Sol.) et pin noir (Pinus nigra Arn.). Ce dernier pin est limité à une centaine d'hectares dans le Rif centro-occidental alors que les deux autres espèces sont relativement bien présentes dans le paysage forestier marocain notamment la région d'El Khemmisset d'où la provenance des fibres objet de notre recherche.

➤ L'analyse DRX et MEB des aiguilles de pin

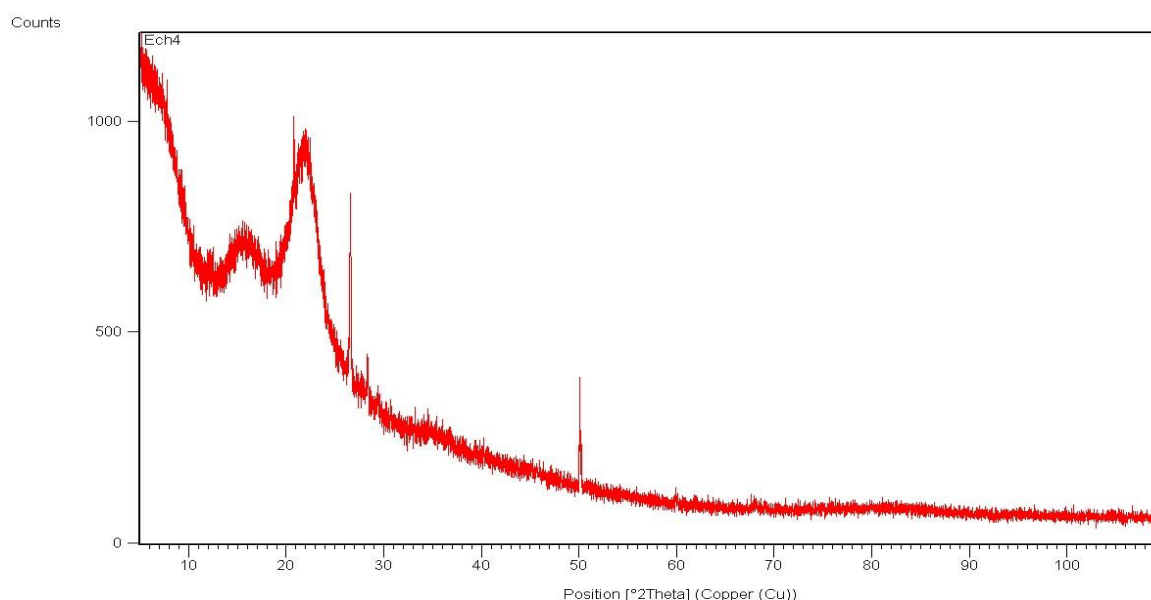


Figure 3. 12: Spectre de diffraction des rayons X d'une aiguille de pin de notre échantillon.

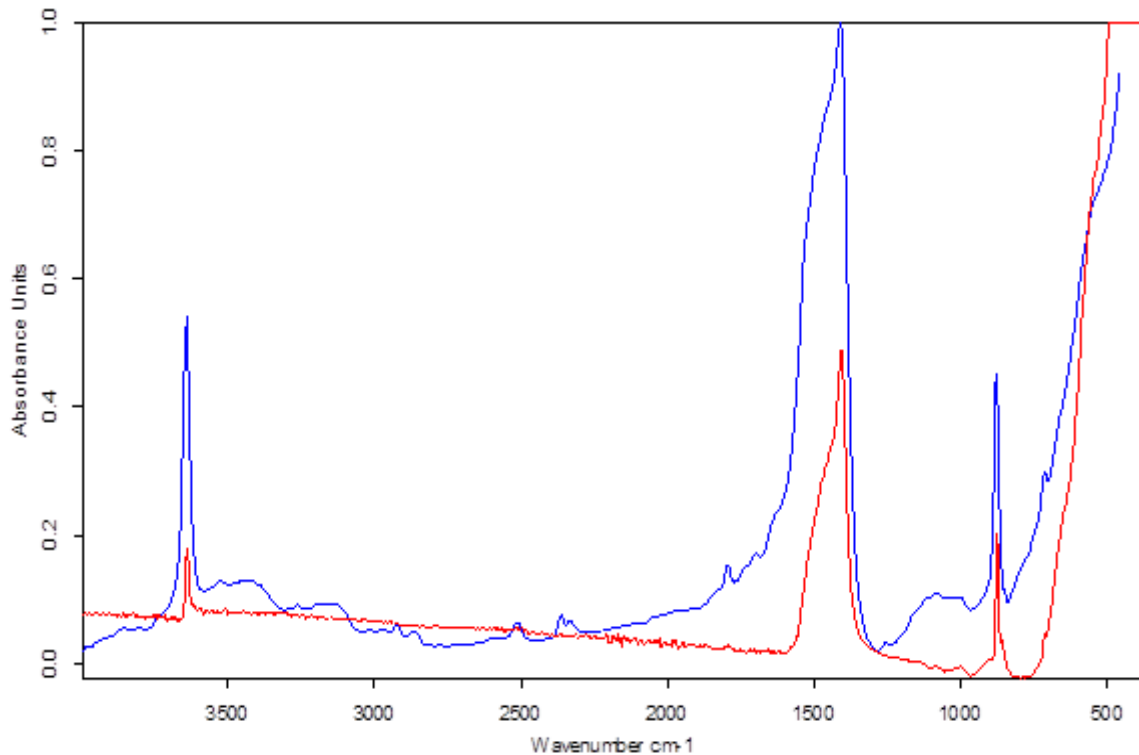


Figure 3. 13: Spectres infrarouges des échantillons : aiguille de pin.

L'analyse par spectrométrie infrarouge concerne l'identification des phases minérales cristallisées et amorphes. Elle est utilisée pour identifier des minéraux secondaires tels que la calcite et le quartz.

Les spectres IRTF du sol des adobes sont représentés sur la figure 3.13. Les bandes principales Figure 3.13, qui caractérisent la présence de quartz, de kaolinite et d'eau hygroscopique. Les clivages observés à 1250,56, 1316,11, 1365,66, 1422,20 et 149,91 cm^{-1} suggèrent que les groupes carbonates sont légèrement déformés et sont à l'état amorphe.

Les bandes de carbonates sont les suivantes : (1509,14;1560,78,1599,38 cm^{-1}), Quartz (1028,82, 1155,60 cm^{-1}). La présence de CH et de calcite est révélée par le intensification de la bande à 897,57, 2919,02 cm^{-1} .

Il est à noter que le marquage intensification de la large bande à 3326,47 cm^{-1} , qui est communément attribué à l'eau d'hydratation, peut être considéré comme une indication de la présence de CSH, Kaolinite (694,16 cm^{-1} , 662,78).

Les spectres IRTF de la stratification présentés dans la figure 3.13. Les bandes principales Figure 3.13, qui caractérisent la présence de CH et de calcite, sont révélées par le intensification de la bande à 873.876, 1406,86 cm^{-1} . Il est intéressant de noter que le markedintensification de

la large bande à 3309,99 cm^{-1} , qui est rarement attribuée à l'eau d'hydratation, peut être considéré comme une indication de la présence de CSH.

II. Élaboration des matériaux

Dans le cadre de cette étude nous commençons tout d'abord par la terre, qui est le constituant de base majoritaire des BTS. Notons que tous les briques formulés sont constitués de la même terre afin de limiter le nombre d'essais et de comparer uniquement l'influence des matériaux d'ajouts indépendamment du type de terre utilisé. L'échantillon du sol a été tamisée en ne gardant que le passant de 5 mm.

Les briquettes sont réalisées en utilisant la technique classique (malaxage, moulage à la main et démoulage à l'aire de séchage).

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu des moules en bois de de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Figure 3.14).



Figure 3. 14: Moules en bois.

A. Mélange

Dans le but d'améliorer la résistance et les caractéristiques du sol étudié dans les blocs de terre, nous avons opté pour deux types de traitement, le traitement à la chaux avec quatre teneurs différentes : 0, 4, 7 et 10% (Figure 3.15) et le traitement aux fibres (fibres paille ou fibres d'aiguilles de pin) avec cinq quantités différentes selon les pourcentages suivants : 0, 1, 2, 3 et

4 % (Figure 3.16, Figure 3.17) . cette procédure d'amélioration fait appel à la technique de mélange afin d'homogénéiser et de bien répartir le traitement dans l'ensemble du matériau.



Figure 3. 15: Mélange avec la chaux.



Figure 3. 16: Mélange avec les fibres paille.



Figure 3. 17: Mélange avec les fibres d'aiguilles de pin.

B. Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'une première lettre en majuscule et d'un groupe de lettres minuscule, à titre d'exemple, Réf désigne Bloc de terre sans aucun ajout. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le Tableau 3.3.

Code	Désignation
Réf	Bloc de terre sans aucun ajout
Str1	Bloc de terre renforcé par 1% de fibres de paille
Str2	Bloc de terre renforcé par 2% de fibres de paille
Str3	Bloc de terre renforcé par 3% de fibres de paille
Str4	Bloc de terre renforcé par 4% de fibres de paille
Pn1	Bloc de terre renforcé par 1% de fibres d'aiguilles de pin
Pn2	Bloc de terre renforcé par 1% de fibres d'aiguilles de pin
Pn3	Bloc de terre renforcé par 1% de fibres d'aiguilles de pin
Pn4	Bloc de terre renforcé par 1% de fibres d'aiguilles de pin
Ch1	Bloc de terre renforcé par 4% de la chaux sans fibres
Ch2	Bloc de terre renforcé par 7% de la chaux sans fibres
Ch3	Bloc de terre renforcé par 10% de la chaux sans fibres

Tableau 3. 3: Codification des mélanges.

C. Réalisations des éprouvettes

Les préparations des mélanges sont effectuées selon Les étapes suivantes :

- 1- On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : terre, fibres, chaux et eau.
- 2- Préparation des moules : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les moules sont prêts pour utilisation.
- 3- Le malaxage :

L'opération est exécutée manuellement comme suit :

- On pose la terre avec une quantité d'eau et on malaxe pendant 30 à 40 secondes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et bien mouillé.
 - On ajoute le liant (chaux) ou les fibres, puis on malaxe pendant 120 à 180 secondes.
- 4- Les coulages des éprouvettes : cette opération est exécutée en couches successives compactés avec les mains.
 - 5- Une opération de finitions est exécutée sur le parement supérieur des éprouvettes pour obtenir des surfaces lisses.
 - 6- Après Séchées pendant 24h et démoulage les BTS sont conservés à l'air libre au sien du laboratoire pendant 3 semaines (Figure 3.18, 3.19, 3.20).

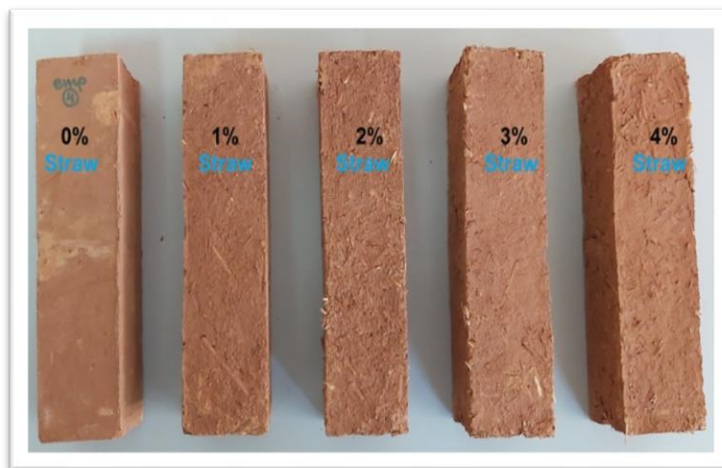


Figure 3. 18: Éprouvettes en terre avec des fibres de paille.



Figure 3. 19: Éprouvettes en terre avec des fibres d'aiguilles de pin.



Figure 3. 20: Éprouvettes en terre avec de la chaux.

III. Conclusion :

Ce chapitre a permis de déterminer les caractéristiques de différentes matières premières qui entrent dans la composition des BTS et la méthode d'élaboration des éprouvettes utilisées dans cette étude, il s'agit de la terre et des stabilisants (la chaux et les fibres) d'une part et de présenter les différents moyens et techniques de caractérisations (chimiques et minéralogiques : IR, DRX et MEB) et de l'identification de sol (analyse granulométrique) appliquées au sol, aux fibres végétales et à la chaux d'autre part.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

I. Introduction

La caractérisation des matériaux, objet de notre étude, ainsi que la description succincte de la méthode d'élaboration des éprouvettes seront la base de la conduite et de la réalisation des essais mécaniques et thermiques. En effet, ce chapitre s'intéresse à présenter et interpréter l'ensemble des résultats des essais sur les blocs de terre stabilisée (BTS).

La première partie du chapitre est consacrée aux résultats d'essai expérimental, qui a comme but, l'étude de l'effet de la présence de la chaux sur la résistance à la compression simple des blocs de terre stabilisée. Tandis que la deuxième partie présente les résultats du comportement thermique des BTS avec des pourcentages différents de la chaux notamment la conductivité thermique.

Les différents résultats de l'analyse thermique pour les échantillons des BTS avec deux types différents de fibres (fibres de paille et des fibres d'aiguilles de pin) comme stabilisateurs et également l'effet de ces derniers sur la résistance à la compression des blocs seront présentés dans la partie trois.

La quatrième partie serait consacré au comportement mécanique des BTS en fonction de la teneur des fibres stabilisants, pour en déduire la quantité optimale et la nature de l'ajout le plus efficace.

II. Effet de la présence de la chaux sur la résistance à la compression simple des BTS

Le sol étudié est associé à des dosages 0 %, 4 %, 7 % et 10 % de la chaux. Les résultats expérimentaux moyens de la variation de la résistance à la compression "Rc" en fonction du pourcentage de chaux dans la composition de blocs de terre stabilisée (BTS) sont regroupés dans le tableau 4.1.

Désignation	Force (KN)	S (mm²)	Rc (Mpa)
ch0	1.71	2012.49	0.84969
ch1	2.175	2012.49	1.08075
ch2	2.22	2012.49	1.10311
ch3	1.15	2012.49	0.57143

Tableau 4. 1: Résultats expérimentaux moyens des blocs de la terre associant aux différents dosages à la chaux.

La Figure 4.1 montre la variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la chaux dans la composition des BTS.

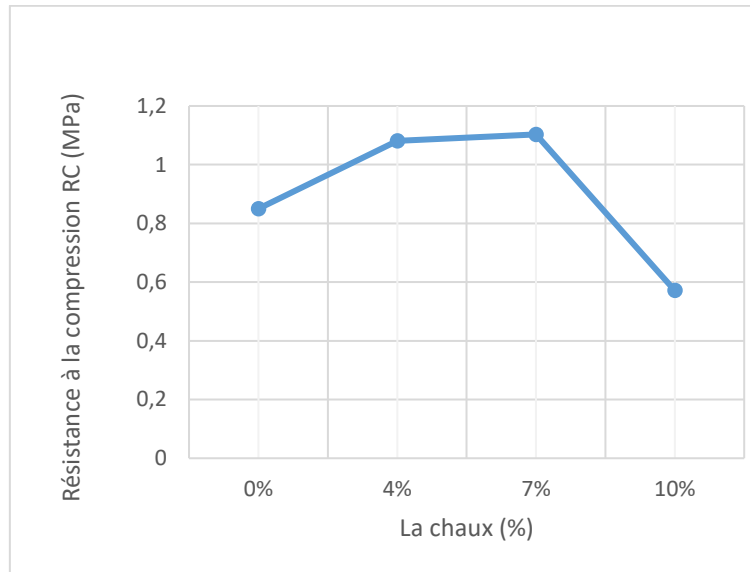


Figure 4. 1 : Résistance à la compression de BTS en fonction du dosage de la chaux.

Ces résultats indiquent que la résistance à la compression est augmentée en fonction de l'augmentation de la teneur à la chaux jusqu'à 7% (optimum) et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 10 %. Ces valeurs sont plus grandes que la valeur des briques non stabilisées qui est de 0,74 MPa. Si l'on retient cette dernière valeur comme valeur de référence, on peut affirmer que la résistance à la compression des BTS augmente en fonction du dosage.

La croissance de la résistance à la compression (Rc) est d'autant importante en allant du teneur à la chaux de 4 à 7% correspondants de 1.08075 à 1.10311 MPa, ces valeurs sont en effet plus grandes que la valeur des blocs de terre non stabilisées qui est de 0.84969 MPa. Alors on peut affirmer que la résistance à la compression des briques augmente en fonction du dosage. La décroissance est d'autant importante en allant du teneur de 7 à 10% [63] [64].

III. Influence du taux de la chaux sur la conductivité thermique des BTS

La variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de chaux dans la composition des BTS est présentée dans le tableau 4.2, sous forme de mesures constantes.

Désignation	La conductivité thermique λ (W/m.°K)
Ch0	0.769
ch1	0.609
ch2	0.563
ch3	0.568

Tableau 4. 2: Les valeurs expérimentales de la conductivité thermique des BTS avec différents dosages.

L'analyse des résultats graphique (Figure 4.2) montre que la conductivité thermique diminue et dépend considérablement de la teneur de la chaux. En fait, le résultat du bloc sans ajout a la plus haute valeur de conductivité thermique, par rapport aux autres échantillons. A partir d'une valeur de 0,769 W/m.K la conductivité thermique diminue de 0,609 à 0,563 W/m.K avec l'ajout de 4 à 7 % de la chaux. On observe alors que la conductivité thermique augmente pour la teneur en chaux de 10 % de 0,568 W/m K.

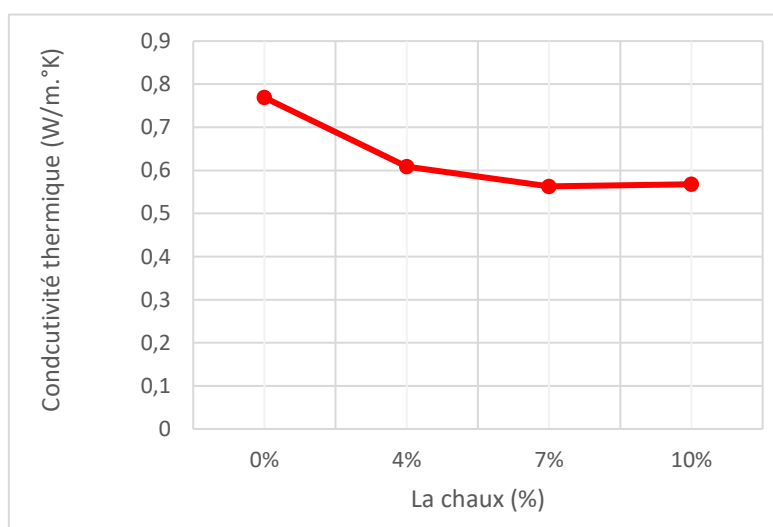


Figure 4. 2 : Conductivité thermique de BTS en fonction du % de la chaux.

Du point de vue comportement thermique, le meilleur dosage est de 7 %, ce qui correspond à la diminution de conductivité thermique de 0,563 W/m.K. Cependant, cette teneur renforce la résistance mécanique, ce qui peut être acceptable dans le cas des BTS [65].

IV. Influence du taux des fibres sur la conductivité thermique des BTS

Nous avons effectué des mesures de conductivité thermique pour plusieurs échantillons de blocs de terre stabilisée avec deux types différents de fibres comme stabilisateurs. Un échantillon sans stabilisateur, d'autres échantillons stabilisés par fibres d'aiguille de pin et par les fibres de paille avec un contenu différent, les dimensions de tous les échantillons sont de 4 x 4 x 16 cm³.

La figure 4.3 montre les évolutions de la conductivité thermique en fonction du contenu en fibres de paille et de pin. Il existe une relation inverse très claire entre la conductivité thermique des échantillons de blocs de terre stabilisée et la teneur en fibres, que ce soit les fibres de paille ou d'aiguille de pin, où la conductivité thermique diminue lorsque la teneur en fibres augmente. De plus, nous pouvons observer que même avec de petites quantités de fibres, il en résulte une diminution appréciable de la conductivité thermique des blocs de terre stabilisée. Nous avons découvert que la plus grande valeur de la conductivité thermique des échantillons de blocs de terre stabilisée est celle de l'échantillon qui ne contient aucune teneur en fibres (0 % de fibres) avec une valeur de 0,769(W/m.K), et la valeur de conductivité thermique la plus faible est celle des échantillons dont la plus grande valeur de teneur en fibres (4 % de teneur en fibres) où les valeurs de conductivité thermique sont 0,5880 (W/m.K) pour la teneur en fibres de paille et 0.682(W/m.K) pour la fibre d'aiguille de pin Tableau 4.3. La diminution marquée de la conductivité thermique des échantillons de blocs de terre stabilisée avec fibre de paille plus que les échantillons de blocs d'adobe avec fibre d'aiguille de pin.

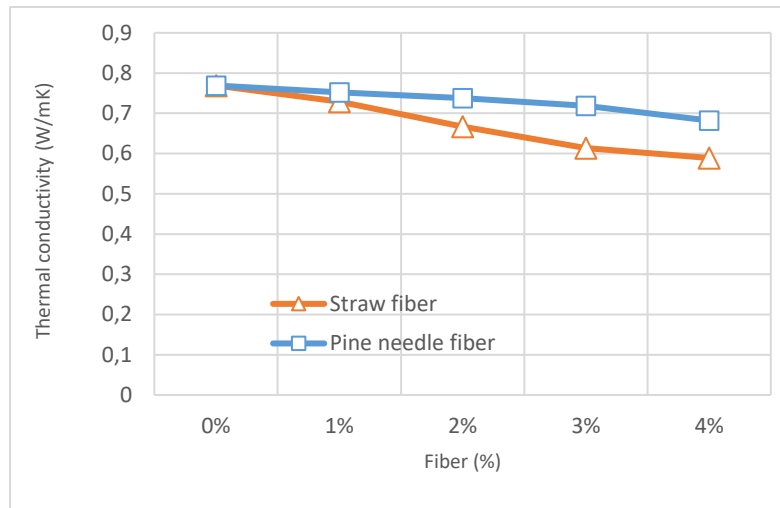


Figure 4. 3: conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres de paille et en fibres d'aiguille de pin.

En effet, la raison de la diminution de la conductivité thermique des échantillons avec l'augmentation de la teneur en fibres est que les fibres augmentent le nombre et la taille des vides entre les particules des échantillons. La présence de vides augmente la quantité d'air à l'intérieur et diminue les voies de conduction thermique. Par conséquent, plus la proportion d'air à l'intérieur des blocs de terre stabilisée est élevée, plus le caractère d'isolation thermique du matériau est élevé, puisque l'air est un bon isolant où la valeur de la conductivité thermique de l'air est de 0,0262W/m.K. La conductivité thermique dépend de la densité des échantillons, la présence de vides réduit la densité des échantillons, ce qui réduit leur conductivité thermique [66], [67]. Voir le Tableau 4.3.

Teneurs en fibres (%)	Densité de Pn (Kg/m ³)	Conductivité thermique de Pn (W/m.K)	Densité de Str (Kg/m ³)	Conductivité thermique de Str (W/m. K)
0	17723	0,769	17723	0,769
1	1730	0,752	1608	0,729
2	1661	0,738	15560	0,667
3	1640	0,719	15334	0,614
4	1594	0,682	1448	0,589

Tableau 4. 3: Les valeurs expérimentales de conductivité thermique des blocs de terre stabilisée avec différents stabilisateurs de fibres.

V. Résultats de l'analyse mécanique de l'effet des fibres sur des BTS

Le matériau de la terre ne supporte pas les contraintes de traction. On s'intéressera donc ici à la mécanique de la terre en compression. Le principe consiste à mesurer la résistance à la compression d'un bloc de terre stabilisée avec quatre teneurs différentes (0, 1, 2 et 3%) d'aiguilles de pin et de fibres de paille.

Mesure de la résistance à la compression

Le test est fait sur des blocs de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, au nombre de 8 et d'une section de 16 cm^2 selon la norme marocaine NM 10.1.051-1996. Ce test nécessite l'utilisation d'une presse (Figure 4.4), la compression est simple et appliquée à l'axe des blocs.



Figure 4. 4 : Appareil de mesure de la résistance à la compression.

Ensuite, la variation de résistance à la compression est mesurée en fonction de la proportion de stabilisants fibreux ajoutés, sous forme de fibres de paille ou d'aiguilles de pin (Tableau 4.4).

Pourcentages des fibres (%)	Résistance à la compression d'aiguilles de pin	Résistance à la compression des fibres de paille
0	1.06875	1.06875
1	1.38375	1.23813
2	1.19625	1.10000
3	0.86750	0.85688

Tableau 4. 4 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression des blocs préparés.

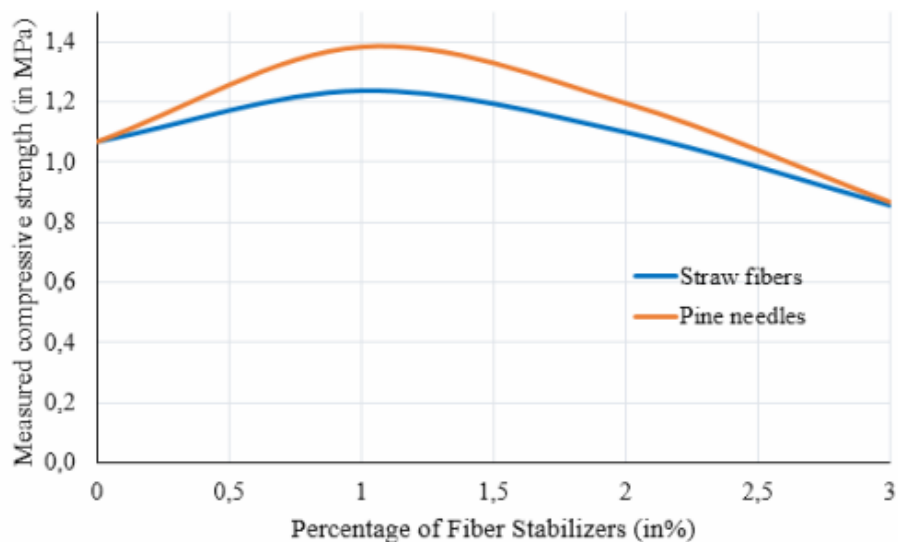


Figure 4. 5 : La variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de stabilisateurs de fibres.

La courbe représentée sur la figure 4.5 indique qu'au départ, lorsqu'on augmente la teneur de fibres de stabilisation, la simple résistance à la compression des blocs augmente, ce qui signifie que le matériau devient plus dur et plus compact. Puis la courbe arrive à un maximum obtenu pour une valeur précise de la teneur en fibres. Tel que : $R_{c_{max}}(Pn) = 1,4$ MPa pour 1% de aiguilles de pin, $R_{c_{max}}(Str) = 1,2$ MPa pour 1% des fibres de paille. Si le dosage des fibres continue d'augmenter, le sol redevient cassant.

VI. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre, la possibilité d'améliorer les propriétés thermo-physique et mécaniques des BTS produit à base d'un sol situé à la ville de KHMISSET puis stabilisée par des fibres naturelles de la même région. L'étude expérimentale réalisée s'articule sur deux approches :

- ✚ La première consiste à l'emploi de la chaux comme stabilisant dans le sol.
- ✚ La seconde consiste à l'emploi des fibres naturelles comme renforts dans le sol.

Les fibres de paille de blé et les fibres d'aiguille de pin ont été ajoutées en différents dosages par rapport à la masse totale du BTC, tandis que les fibres a été employé en quatre pourcentages ; 0, 4, 7 et 10%.

Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de dégager les conclusions principales suivantes :

- ✚ Les propriétés thermo-physiques donnent des indications pour le choix du matériau en vue de minimiser les apports thermiques dans les bâtiments. Nous constatons une diminution des valeurs de la conductivité thermique avec l'ajout de la chaux.
- ✚ Selon l'augmentation de la quantité des fibres dans les échantillons, il existe une relation inversement proportionnelle entre la conductivité thermique et les stabilisateurs de fibres (la fibre de paille et la fibre de pin), nous avons observé cette diminution de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation des taux de fibres. La raison en est qu'il y a une augmentation de la taille des vides entre les particules des échantillons lorsque les taux de fibres augmentent, l'augmentation du volume des vides dépend de la quantité de fibres.
- ✚ Que les fibres de paille sont des additifs relativement plus efficaces pour améliorer le comportement thermique des blocs d'adobe, ce qui a entraîné une diminution de la conductivité thermique plus que les fibres d'aiguilles de pin. L'addition de fibres de paille et de fibres d'aiguille de pin a permis d'améliorer le comportement thermique des BTS, ce qui en fait des matériaux appropriés pour une efficacité énergétique dans le bâtiment.

- ✚ Lorsqu'on augmente la teneur de fibres de stabilisation, la simple résistance à la compression des blocs augmente, ce qui signifie que le matériau devient plus dur et plus compact.

Conclusion générale

Cette recherche nous fournit des informations importantes sur les propriétés de la terre et des fibres, qui sont utilisées dans les matériaux de construction, nous les avons obtenues de nos études expérimentales ; cela sera extrêmement bénéfique pour les ingénieurs et les concepteurs de bâtiments écologiques. Dans notre étude expérimentale, on a commencé par l'identification et la caractérisation du sol et des stabilisateurs de fibres et la chaux (analyse granulométrique, chimique et minéralogique) avant de les utiliser. Afin d'établir et de formuler des recommandations concernant leur traitement éventuel.

Nous avons étudié les propriétés minéralogiques et chimiques du sol provenant de Had Laghoualem KHEMISSET, deux fibres différentes (la fibre de paille et la fibre de pin), et la chaux, pour procéder ensuite à la réparation des échantillons de blocs de terre par ce sol tout en ajoutant des quantités prédéfinies des stabilisateurs étudiés. Ensuite, on a étudié l'influence de l'effet de la stabilisation sur la résistance en compression et sur la conductivité thermique. À la suite des essais réalisés, on peut avancer les conclusions suivantes :

- La terre choisie de Had Laghoualem KHEMISSET est convenable en construction.
- L'analyse minéralogique de la terre de cette région montre qu'elle se compose principalement de calcite, de quartz et de la kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ et de la Moscovite $H_2KAl_3(SiO_4)_3$ suivants des portions différentes.
- L'analyse chimique des fibres de paille et des fibres d'aiguilles de pin montre l'absence de phases cristallisées ; par conséquent, elles sont convenables à notre recherche.
- Selon l'augmentation de la quantité des fibres dans les échantillons, il existe une relation inversement proportionnelle entre la conductivité thermique et les stabilisateurs de fibres (la fibre de paille et la fibre de pin), nous avons observé cette diminution de la conductivité thermique en fonction de l'augmentation des taux de fibres. Et ce grâce à l'augmentation de la taille des vides entre les particules des échantillons lorsque les taux de fibres augmentent, cette augmentation du volume des vides dépend de la quantité de fibres.
- Que les fibres de paille soient des additifs relativement plus efficaces pour améliorer le comportement thermique des blocs de terre. L'addition de fibres de paille et de fibres d'aiguille de pin a permis d'améliorer le comportement thermique des BTS, ce qui en fait des matériaux appropriés pour une efficacité énergétique dans le bâtiment.

- Les propriétés thermo-physiques donnent des indications pour le choix du matériau en vue de minimiser les apports thermiques dans les bâtiments. Nous constatons une diminution des valeurs de la conductivité thermique avec l'ajout de la chaux.
- Enfin, on a déduit que lorsqu'on augmente la teneur de fibres de stabilisation, la simple résistance à la compression des blocs augmente, ce qui signifie que le matériau devient plus dur et plus compact.

Bibliographie

- [1] <https://theconversation.com/le-plus-vieux-materiau-de-construction-au-monde-est-aussi-le-plus-ecoresponsable-133587>
- [2] PEATTIE, Lisa R. Aesthetic politics: shantytown or new vernacular?. *Traditional Dwellings and Settlements Review*, 1992, p. 23-32.
- [3] MEAD, Roger et WILLEY, RoW. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental agriculture*, 1980, vol. 16, no 3, p. 217-228.
- [4] TONG, C. O. et WONG, S. C. The advantages of a high density, mixed land use, linear urban development. *Transportation*, 1997, vol. 24, no 3, p. 295-307.
- [5] WOLKOFF, Peder. Volatile organic compounds. *Indoor Air, Suppl*, 1995, vol. 3, p. 1-73.
- [6] LABAT, Matthieu, MAGNIONT, Camille, OUDHOF, Nicolaas, *et al.* From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 2016, vol. 97, p. 69-81.
- [7] HALL, Matthew R., LINDSAY, Rick, et KRAYENHOFF, Meror (ed.). *Modern earth buildings: Materials, engineering, constructions and applications*. Elsevier, 2012.
- [8] DEAN, R. B. et SUESS, M. J. The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land. *Waste management & research*, 1985, vol. 3, no 3, p. 251-278.
- [9] WOODCOCK, James, EDWARDS, Phil, TONNE, Cathryn, *et al.* Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport. *The Lancet*, 2009, vol. 374, no 9705, p. 1930-1943.
- [10] PACHECO-TORGAL, F. et JALALI, Said. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and building materials*, 2012, vol. 29, p. 512-519.
- [11] KARIYAWASAM, KKGKD et JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 105, p. 519-527.

- [12] ROJSTACZER, Stuart. Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1988, vol. 93, no B11, p. 13619-13634.
- [13] WAGENER, Thorsten et PIANOSI, Francesca. What has Global Sensitivity Analysis ever done for us? A systematic review to support scientific advancement and to inform policy-making in earth system modelling. *Earth-science reviews*, 2019, vol. 194, p. 1-18.
- [14] ROJSTACZER, Stuart et AGNEW, Duncan Carr. The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, vol. 94, no B9, p. 12403-12411.
- [15] GALLIPOLI, Domenico, BRUNO, Agostino Walter, PERLOT, Céline, *et al.* A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 2017, vol. 12, no 3, p. 463-478.
- [16] <https://flores-amo.fr/terre-crue-materiau-ecologie/>
- [17] https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_crue
- [18] WHEELER, Mortimer. *The Indus Civilization*. CUP Archive, 1968.
- [19] STAUBWASSER, Michael, SIROCKO, Frank, GROOTES, Pieter M., *et al.* Climate change at the 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, no 8.
- [20] POTTS, Daniel T., *et al.* *Mesopotamian civilization: the material foundations*. Cornell University Press, 1997.
- [21] ALEXANDER, Christopher. *A pattern language: towns, buildings, construction*. Oxford university press, 1977.
- [22] BOURGEOIS, Jean-Louis. The history of the great mosques of Djenné. *African Arts*, 1987, p. 54-92.
- [23] LATTIMORE, Owen. Origins of the Great Wall of China: a frontier concept in theory and practice. *Geographical review*, 1937, vol. 27, no 4, p. 529-549.

- [24] DRESCH, Paul, PAUL, Dresch, *et al.* *A history of modern Yemen*. Cambridge University Press, 2000.
- [25] DE SANTIS, Elena et INNOCENZI, Tiziano. Fès and its Medina: a key-case study of architectural contamination.
- [26] EL HALIM, Mouhssin, DAOUDI, Lahcen, EL OUAHABI, Meriam, *et al.* Saadien Mosaic (Zellige) from historical monuments of Marrakech, Morocco: Degradation state and production technology. 2017.
- [27] BOUSSALH, Mohamed et MORISET, S. Ksar d'Aït-Ben-Haddou. *Patrimoine Mondial. Plan de Gestión*, 2007, vol. 2012.
- [28] KHILAR, Kartic C., FOGLER, H. Scott, et GRAY, Donald H. Model for piping-plugging in earthen structures. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, vol. 111, no 7, p. 833-846.
- [29] DANIEL, David E. Earthen liners for land disposal facilities. In : *Geotechnical practice for waste disposal'87*. ASCE, 1987. p. 21-39.
- [30] BLONDET, Marcial et AGUILAR, Rafael. Seismic protection of earthen buildings. In : *International Symposium on Earthen Structures, Indian Institute of Science, Bangalore*. 2007. p. 22-24.
- [31] FABBRI, A. et MOREL, Jean Claude. Earthen materials and constructions. In : *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Woodhead Publishing, 2016. p. 273-299.
- [32] EYBENS, Craterre. Construire en terre.
- [33] <https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue-de/>
- [34] DEVERELL, William F. *Whitewashed adobe*. University of California Press, 2004.
- [35] TOLLES, E. Leroy, KIMBRO, Edna E., WEBSTER, Frederick A., *et al.* *Seismic stabilization of historic adobe structures: Final report of the Getty seismic adobe project*. 2000.
- [36] ADOBE CREATIVE TEAM et ADOBE SYSTEMS. *Adobe Acrobat 5.0: Classroom in a Book*. Adobe Press, 2001.

- [37] TATAR, M., HATZFELD, Denis, MORADI, A. S., *et al.* The 2003 December 26 Bam earthquake (Iran), Mw 6.6, aftershocksequence. *Geophysical Journal International*, 2005, vol. 163, no 1, p. 90-105.
- [38] HASTINGS, C. Mansfield et MOSELEY, M. Edward. The adobes of Huacadel Sol and Huaca de la Luna. *American Antiquity*, 1975, p. 196-203.
- [39] SILVEIRA, Dora, VARUM, Humberto, COSTA, Aníbal, *et al.* Mechanicalproperties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 28, no 1, p. 36-44.
- [40] https://fr.freepik.com/photos-premium/production-artisanale-mini-usine-sechage-briques-argile-brute_7666731.htm
- [41] <https://www.architectureterrebois.fr/comment-monter-un-mur-en-pise/>
- [42]<https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/construction-maison-maison-ecologique-759/page/3/>
- [43] TAYYIBI, A., CHERRAJ, M., BOUABID, H., *et al.* Security Requirements for earthconstruction: Comparative study of international codes.
- [44] FRIESEM, David, BOARETTO, Elisabetta, ELIYAHU-BEHAR, Adi, *et al.* Degradation of mud brick houses in an aridenvironment: ageoarchaeological model. *Journal of Archaeological Science*, 2011, vol. 38, no 5, p. 1135-1147.
- [45] WARREN, John. Conservation of brick. 1999.
- [46] ASHURST, John et ASHURST, Nicola. Practical building conservation. Vol. 2 brick, terracotta and earth. 1989.
- [47] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2106>.
- [48] <http://lithosphere-et-ress-energetiques.weebly.com/les-horizons-du-sol.html>
- [49] <https://mapcarta.com/fr/25437946>
- [50] OATES, Joseph AH. Lime and limestone:chemistry and technology, production and uses. John Wiley& Sons, 2008.
- [51] <http://www.ecolhomedeco.com>
- [52] www.atelier-du-paysage.com, auteur : Luc Nèples

- [53] <http://patrimoineethistoiredechazellessurlyon.fr/wp/wp-content/uploads/2017/09/LE-FAUCHAGE.pdf>
- [54] ALEMDAR, Ayse et SAIN, Mohini. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues–Wheat straw and soy hulls. *Bioresource technology*, 2008, vol. 99, no 6, p. 1664-1671.
- [55] Iptr l'ESTAQUE Marseille « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic
Buzau mai 2010
- [56] LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011.
- [57] RICHARD P., « Adobe », mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
- [58] James R. Connolly, for EPS400-002, *Introduction to X-Ray Powder Diffraction*, Spring 2005
- [59] Thesis , Fatima Zohra Zeggai, Synthèse et Caractérisation des Nanocomposites par Polymérisation de l'Aminobenzylamine et l'Aniline dopées par la Maghnite échangée, Feb 2016.
- [60] VILENKINA, G. Ia. Excretion of 5-amino-4-imidazolecarboxamide in human urine. *Voprosy meditsinskoï khimii*, 1956, vol. 2, no 6, p. 450-451.
- [61] DOAT, Patrice, et al. *Construire en terre*. 1979.
- [62] Annexe 4 Méthodes d'analyses utilisées pour l'étude de l'oxydation à haute température des bronzes tel-00011255, version 1 - 22 Dec 2005.
- [63] A. Ammari, K. Bouassria, A. Tayyibi, H. Bouabid, M. Cherraj, S. Charif D'ouazzane, M. Ibnoussina, Promoting the technique of grounding block compressed in the construction sector by improving its mechanical behavior, *J. Mater. Environ. Sci.*, vol.7, n.10, 2016, pp. 3532-3537.
- [64] Al-Mukhtar, M., and Kevin Beck. *Characteristics of Lime and Rock Powder Mortar for the Restoration of Monuments*. 2005.

[65] Boffoue, Moro Olivier, et al. Influence of cement content on the thermomechanical properties of compressed and stabilized clay block". Africa Science: International Journal of Science and Technology, vol.11 n.2, 2015, pp.35-43.

[66] A. S. Povarennykh, The use of infrared spectra for the determination of minerals, Am. Mineral. 63(9-10) (1978), 956-959.

[67] F. Gouny, F. Fouchal, P. Maillard and S. Rossignol, A geopolymer mortar for wood and earth structures, Constr. Build. Mater. 36 (2012), 188-195.

[68] RHONE A. ; « Le pisé » www.ageden.org, Edition Décembre 2010.