

N° d'ordre : 3587

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, Energétique et Génie Civil

Présentée et soutenue le 31/12/2021 par :

Youssef JAMIL

Etude des propriétés mécaniques et thermiques des blocs de terre comprimée stabilisée par des fibres végétales pour la construction en terre au Maroc.

JURY

Mohammed Ouadi BENSALAH	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Président
Kamal GUERAOU	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Rapporteur/ Examineur
Mohammed TAIBI	PH, Université Hassan II, Faculté des Sciences Ain Chok - Casablanca	Rapporteur/ Examineur
Mohamed DRIOUICH	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	Rapporteur/ Examineur
Mohamed SAMMOUDA	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	Rapporteur/ Examineur
Mohammed CHERRAJ	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens, également, à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur CHERRAJ Mohamed, Professeur à la faculté des Sciences de l'Université Mohammed V à RABAT, pour son entière disponibilité, ses orientations, ses conseils tout au long de cette étude.

Je tiens à remercier vivement les membres du jury qui ont voulu accepter de juger ma thèse :

- Monsieur Mohammed ouadi BENSALAH, Professeur à la faculté des Sciences de l'Université Mohammed V à RABAT
- Monsieur Kamal GUERAOUI, Professeur à la faculté des Sciences de l'Université Mohammed V à RABAT
- Monsieur Mohammed TAIBI, Professeur à la faculté des Sciences Ain Chok de l'Université Hassan II à Casablanca.
- Monsieur Mohamed DRIOUICH, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de l'Université Sultan Moulay Slimane à Béni Mellal.
- Monsieur Mohamed SAMMOUDA, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de l'Université Sultan Moulay Slimane à Béni Mellal.

Je tiens aussi à remercier Monsieur KABORI Salah, Directeur du bureau d'étude SOCHEC.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de Mécanique et Simulation Mécanique et Énergétique (MSME) de la faculté des Sciences de l'Université Mohammed V à RABAT, pour leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Résumé

La construction en terre est une méthode de construction très connue dans tout le monde étant donné qu'elle a été le premier matériau de construction utilisé par l'homme. En effet construire en terre, c'est construire avec un matériau disponible en grande quantité et quasiment partout, écologique, recyclable et qui offre une isolation agréable. Dans ce travail, nous avons choisi le bloc de terre comprimée (BTC) comme exemple du matériau de la terre utilisé dans la construction, l'ont mélangé avec quelques stabilisateurs comme les fibres d'alfa, les fibres d'agave de sisal, la chaux et le ciment dans différents taux séparément.

Nous avons choisi le sol de Bounaga (région de Marrakech) au Maroc pour faire les échantillons de bloc de terre comprimée.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Analyser l'effet de l'influence de la contrainte de compactage et la teneur en fibres d'alfa sur les caractéristiques mécaniques et thermiques de blocs de terres comprimée (BTC). Dans ce cadre, un mélange composé de sol, stabilisé avec trois teneurs en ciment (5%, 6.5% et 8%) et trois teneurs en fibres d'alfa (1%, 2%, et 3%) par rapport au mélange sec global. Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet en appliquant quatre contraintes de compactage (1 MPa, 2 MPa, 3 MPa et 4 MPa).
- Analyser l'effet de la teneur en fibre d'agave de sisal et/ou de la chaux sur les caractéristiques thermiques et mécaniques des blocs de terre comprimée (BTC), Dans ce cadre, on a utilisé trois teneurs en fibres d'agave de sisal (1%, 2%, et 3%), trois teneurs en chaux (6%, 10% et 14%) du poids du mélange sec.

Les résultats de cette étude indiquent que la combinaison de fibre d'agave de sisal et de la chaux peut améliorer les propriétés thermiques et mécaniques des briques de terre comprimée (BTC) et que l'augmentation de la contrainte de compactage conduit à l'amélioration de la résistance à la compression sèche.

Mots clés : bloc de terre comprimée, Terre, fibre, alfa, agave de sisal, mécanique, thermique,

Abstract

Earth building is a construction method very well known around the world as it was the first building material used by man. Indeed, building in earth means building with a material available in large quantities and almost everywhere, ecological, recyclable and which offers pleasant insulation. In this work, we chose the compressed earth block as an example of the earth material used in construction, mixed it with some stabilizers like alfa fibers, sisal agave fibers, lime and cement in different rates separately.

We chose the Bounaga soil (Marrakech region) in Morocco to make the compressed earth block samples.

The objectives of this work are:

- Analyze the effect of the influence of compaction stress and alfa fiber content on the mechanical and thermal characteristics of compressed earth blocks (CEB). In this context, a mixture composed of soil, stabilized with three contents of cement (5%, 6.5% and 8%) and three contents of alfa fibers (1%, 2%, and 3%) compared to the dry mixture global. The mixtures are compacted in the static single-acting mode by applying four compaction stresses (1 MPa, 2 MPa, 3 MPa and 4 MPa).
- Analyze the effect of the content of sisal agave fiber and / or lime on the thermal and mechanical characteristics of compressed earth blocks (CEB), In this context, three agave fiber contents were used of sisal (1%, 2%, and 3%), three lime contents (6%, 10% and 14%) of the weight of the dry mixture.

The results of this study indicate that the combination of sisal agave fiber and lime can improve the thermal and mechanical properties of compressed earth bricks (CEB) and that the increase in compaction stress leads to the improvement. resistance to dry compression.

Keywords: compressed earth block, Earth, fiber, alfa, sisal agave, mechanical, thermal, earth construction, thermal conductivity, lime, cement.

Liste des figures

Figure 1. La construction par l'adobe.	19
Figure 2. La construction par le torchis.....	19
Figure 3. La construction par la bauge.....	20
Figure 4. La construction par le pisé.	20
Figure 5. Cycle de production des blocs de terre comprimée (V.HOUBEN et AL, 1994). [5]	21
Figure 6. Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite (Auroville).	22
Figure 7. Maison palmier à Marrakech (MAROC).....	23
Figure 8. Eléments structuraux : (a) et (b) les tétraèdres, (d) et (e) les octaèdres. (Grim, 1959) [15]	25
Figure 9. Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993) [17].....	26
Figure 10. Photographie au MEB.....	27
Figure 11. Photographie au MEB montmorillonite.....	27
Figure 12. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre.	28
Figure 13. Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre.	29
Figure 14. Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg.	33
Figure 15. Evolution des limites d'Atterberg en fonction de chaux et de temps de maturation à température ambiante. (Lasladj, 2009) [24]	33
Figure 16. Influence de la teneur en chaux hydraulique sur les courbes Proctor.....	34
Figure 17. Influence de la minéralogie d'argile sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps de cure. (Bell, 1996) [23].....	35
Figure 18. Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et de temps de cure d'après (Al-Mokhtar et al., 2010a) [29].....	35
Figure 19. Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur les résistances mécaniques. (Guettala et al., 2002) [19]	36
Figure 20. Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux. (Millogo, 2008) [31]	37
Figure 21. Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0 % chaux, (b) 4 % chaux, (c) 6% chaux, (d et e) 10 % chaux et (f) 12 % chaux. (Millogo, 2008) [31].....	37
Figure 22. Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur l'absorption et sur la perte en poids (essai séchage/mouillage). Guettala et al. (2002) [19].....	38
Figure 23. Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment. (Walker, 1997) [37]	42
Figure 24. Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée. (Kerali, 2001) [41].....	43
Figure 25. Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment. (Bahar, 2004) [43]	44
Figure 26. Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne. (Akpokodje, 1985) [42].....	44
Figure 27. Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment. (Venkatrama,2005) [45]	45
Figure 28. Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment. (Meukam, 2004) [46].....	45
Figure 29. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine. (Baley, 2013) [47]	47

Figure 30. La plante alfa dans son environnement.....	49
Figure 31. Plante de Sisal.....	51
Figure 32. Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres. (Millogo,2014) [31]	53
Figure 33. Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres. (Millogo,2014) [31].....	54
Figure 34. Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal. (Namango,2006) [10].....	55
Figure 35. L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression. (Khedari,2005) [9].....	56
Figure 36. Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée. (Bouhicha,2005) [59]	57
Figure 37. Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée. (Bouhicha,2005) [59]	57
Figure 38. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée (Bouhicha,2005) [59].	58
Figure 39. Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment. (Eko,2012) [71]	58
Figure 40. Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles. (Mesbah,2004) [7]	59
Figure 41. L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique. (Khedari,2005) [9].....	60
Figure 42. L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc de terre comprimée. (Millogo,2014) [31].....	60
Figure 43. Transfert de chaleur par conduction [72].....	64
Figure 44. Transfert de chaleur par convection [72].	65
Figure 45. Transfert de chaleur rayonnement [72].....	65
Figure 46. Représentation de flux thermique [72].	68
Figure 47. Quelques ordres de grandeur de diffusivité thermique [74].	70
Figure 48. Quelques ordres de grandeur d'effusivité thermique [74]	71
Figure 49. Principe de la plaque chaude gardée [72]	73
Figure 50. Mini-plaque chaude avec fluxmètres [72]	74
Figure 51. Principe de mesure par la méthode d'état stationnaire [72]	74
Figure 52. Principe de méthode laser flash [72].....	76
Figure 53. Principe de mesure à l'aide d'un fil chaud [72].	77
Figure 54. Appareil CT-mètre. [75]	78
Figure 55. Situation de la carrière.	80
Figure 56. Courbe granulométrique du sol étudié.	82
Figure 57. Réalisation de l'essai de limite de liquidité.	83
Figure 58. Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).	84
Figure 59. Essai de mesure de Bleu de méthylène.	85
Figure 60. Essai de mesure de pH.	86
Figure 61. Le diffractogramme de rayons X du sol.	87
Figure 62. Spectre d'Infrarouge (IR) du sol.	88
Figure 63. Images MEB prises sur le sol.	89
Figure 64. Les fibres d'Agave de Sisal après arrachement.	90
Figure 65. Les fibres d'Agave de Sisal découpées en morceaux.	90
Figure 66. Fibres d'alfa.	91
Figure 67. Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC.....	92
Figure 68. Eprouvettes en terre avec des fibres d'agave de sisal.	93

Figure 69. Appareil de mesure de compression simple.	96
Figure 70. Appareil de mesure de flexion 3 points.	97
Figure 71. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 0% des fibres d'alfa.	101
Figure 72. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.	102
Figure 73. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.	102
Figure 74. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.	102
Figure 75. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 0% des fibres d'alfa.	103
Figure 76. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.	104
Figure 77. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.	104
Figure 78. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.	105
Figure 79. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 0% des fibres d'alfa.	106
Figure 80. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.	106
Figure 81. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.	107
Figure 82. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.	107
Figure 83. Diffusivité thermique en fonction de la teneur en fibres.	108
Figure 84. Effusivité thermique en fonction de la teneur en fibres.	109
Figure 85. Conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres.	109
Figure 86. Effet de la teneur en fibres sur La Résistances à la compression.	110
Figure 87. Effet de la teneur en chaux sur La Résistances à la compression.	110
Figure 88. Effet de la teneur en fibres sur La Résistances à la flexion.	111
Figure 89. Effet de la teneur en chaux sur La Résistances à la flexion.	112

Liste des tableaux

Tableau 1. La répartition territoriale de l'alfa [52].	49
Tableau 2. Propriétés mécaniques de la fibre d'alfa selon la littérature. (Hanana et al.2015) [54]	50
Tableau 3. Conductivité thermique de quelques matériaux [73].	69
Tableau 4. Classification des argiles selon Atterberg.	83
Tableau 5. Les masses volumiques du sol.	84
Tableau 6. Analyse chimique des sols.	87
Tableau 7. Analyse minéralogique des sols.	88
Tableau 8. La composition chimique du ciment (%).	89
Tableau 9. La composition chimique de la chaux vive (%).	89
Tableau 10. Caractérisation des fibres d'Agave de Sisal.	90
Tableau 11. La répartition territoire de la plante Alfa.	91
Tableau 12. Propriétés physico-chimiques de la fibre d'Alfa.	91
Tableau 13. La composition des mélanges employés dans cette étude.	92
Tableau 14. La composition des mélanges employés dans cette étude.	94

Notations, Symboles

et Unités

BTC	Bloc de Terre Comprimée
I_p	Indice de plasticité
WL	Limite de Liquidité
WP	Limite de Plasticité
CRATERRE	Centre international de la construction en terre
MEB	Microscopie électronique à balayage
IR	Infrarouge
R_c	La résistance maximale à la compression
R_f	La résistance maximale à la flexion
F	Force de rupture
S	Surface
λ	La conductivité thermique
MEB	Microscope à balayage électronique
DRX	Diffraction aux rayons X
AFNOR	Association française de normalisation
ϕ	Flux de chaleur
R_{th}	Résistance thermique
U	Coefficient de transmission calorifique
ρ_s	Masse volumique apparente
ρ_0	Masse volumique absolue
VBS	Valeur du bleu de méthylène

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux	8
Notations, Symboles et Unités	9
Table des matières	10
Introduction Générale.....	15
Chapitre 1. Synthèse Bibliographique.....	18
I. Introduction	18
II. Techniques de Construction	18
II.1. L'adobe.....	18
II.2. Le torchis.....	19
II.3. La bauge	19
II.4. Le pisé	20
III. Blocs de Terre comprimé (BTC).....	20
III.1. Définition.....	20
III.2. Cycle de production des blocs de terre comprimée	21
III.3. Avantages des blocs de terre comprimée	21
III.4. Exemples de constructions modernes en BTC	22
IV. La terre, un matériau de construction	23
IV.1. Définition.....	23
IV.2. Composition	23
IV.3. Les Argiles	24
V. Les propriétés du matériau terre en construction.....	27
V.1. La texture.....	27
V.2. Plasticité	28
V.3. Matière Organique.....	29
VI. Stabilisation	29
VI.1. Stabilisation mécanique.....	30
VI.2. Stabilisation physique.....	30

VI.3.	Stabilisation chimique	30
VII.	Stabilisation des sols par l'ajout de la chaux	30
VII.1.	Définition.....	30
VII.2.	Caractéristiques de la chaux	31
VII.3.	Cycle de la chaux.....	32
VII.4.	Modification des propriétés des sols traités à la chaux.....	32
VIII.	Stabilisation des sols par l'ajout de Ciment	38
VIII.1.	Généralité	38
VIII.2.	Mécanisme de stabilisation.....	39
VIII.3.	Efficacité et dosage.....	41
VIII.4.	Effets sur les propriétés du matériau stabilisé	42
IX.	Les Fibres	46
IX.1.	Généralité	46
IX.2.	Les Fibres d'Alfa.....	48
IX.3.	Les Fibres d'Agave de sisal.....	50
X.	L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des blocs de terre comprimée	51
X.1.	L'Effet des fibres sur les propriétés mécaniques.....	52
X.2.	Effet des fibres sur les propriétés thermiques.....	59
XI.	Conclusion.....	61
Chapitre 2. Transfert thermique et méthodes de mesure de la conductivité thermique		63
I.	Introduction	63
II.	Transfert thermique	63
III.	Modes de transfert de chaleur.....	63
III.1.	Conduction	64
III.2.	Convection.....	64
III.3.	Rayonnement.....	65
IV.	Définitions	65
IV.1.	Champ de température.....	65
IV.2.	Gradient de température	66
IV.3.	La chaleur	66
IV.4.	Flux de chaleur	66
IV.5.	La température.....	67
IV.6.	La conservation de la chaleur	67
IV.7.	La Résistance Thermique (R).....	67
IV.8.	Le Coefficient de Transmission Calorifique (U).....	67
IV.9.	La Conductivité Thermique.....	68
IV.10.	La Chaleur Spécifique	69

IV.11.	L'inertie Thermique.....	69
IV.12.	L'effusivité thermique.....	70
IV.13.	La chaleur latente de changement d'état.....	71
V.	Méthodes de mesures de la conductivité thermique.....	71
V.1.	Les méthodes en régime stationnaire.....	72
VI.	Conclusion.....	78
Chapitre 3. Caractérisation des Matériaux utilisés.....		80
I.	Introduction.....	80
II.	Matériaux utilisés.....	80
II.1.	Sol.....	80
II.2.	Ciment.....	89
II.3.	Chaux.....	89
II.4.	Fibres.....	90
III.	Confection des blocs.....	91
III.1.	Blocs de terre comprimée et stabilisées en fibre de sisal d'agave et/ou de chaux.....	92
III.2.	Blocs de terre comprimée et stabilisées en fibre d'alfa et/ou de ciment.....	94
IV.	Propriétés mécaniques.....	95
IV.1.	Introduction.....	95
V.	Conclusion.....	99
Chapitre 4. Résultats et Discussion.....		101
I.	Introduction.....	101
II.	Résultats et discussion.....	101
II.1.	Effet de la teneur en fibres d'Alfa sur la masse volumique apparente du BTC.....	101
II.2.	Effet de la teneur en fibres d'Alfa sur les propriétés du BTC.....	103
II.3.	Effet de la teneur en fibres d'Agave de Sisal sur les propriétés du BTC.....	108
III.	Conclusion.....	112
Conclusion et Perspectives.....		115
Références Bibliographiques.....		117

Introduction Générale

Introduction Générale

La terre est utilisée comme matériau de construction depuis des milliers d'années par des civilisations à travers le monde. Ceci est dû principalement à l'abondance du matériau terre, à sa facilité de mise en œuvre et au coût réduit de sa production. Plusieurs techniques de construction ont été développées selon l'environnement et le climat locaux et aussi selon les traditions et les coutumes.

C'est à juste titre que les matériaux de construction en terre tels que les briques en argile cuite, les tuiles et les briques en terre comprimée (BTC) ont été retenus comme matériaux à grande inertie thermique [1]. Quant aux propriétés mécaniques, certains travaux dans la littérature montrent que les résistances mécaniques (flexion et compression) s'améliorent en fonction du taux et de la nature de stabilisants [2, 3, 4].

S'il est confirmé actuellement que la stabilisation des BTC par des liants améliore leurs résistances mécaniques et leur insensibilité à l'eau [5], la stabilisation des BTC par des fibres n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. On note que l'addition des fibres naturelles était d'usage dans la fabrication des adobes et d'autres produits de terre depuis des milliers d'années afin de réduire la fissuration due au retrait et améliorer la résistance à la traction [6,7]. Les dernières études, apparues sur les BTC, ont montré que l'incorporation des fibres naturelles réduit la taille des fissures de retrait, améliore sa durabilité et sa résistance à la traction [8], et que l'ajout des fibres naturelles diminue même la conductivité thermique des matériaux composites [9]. Dans son étude, Namango a montré, que dans certaines limites, il y a une augmentation considérable de la résistance à la compression et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation de fibres de sisal, de poudre de manioc et de teneurs en ciment, et qu'en dehors de ces valeurs limites, la présence des fibres de sisal a un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimée [10]. Mais Rigassi et sans donner de justifications, déclare que les fibres végétales sont incompatibles avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique [11].

Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'effet des fibres d'alfa et l'agave de sisal en tant que des fibres naturelles d'origine végétale sur les paramètres mécaniques et thermiques des blocs de terre comprimée (BTC).

La thèse est structurée en quatre chapitres :

Le chapitre 1 est consacré à la revue bibliographique, expose en premier lieu les techniques d'utilisation de la terre en construction, rappel sur les types d'argile mode de stabilisation et propriétés du matériau terre à stabiliser.

Le deuxième chapitre présente les propriétés thermiques et les méthodes de mesure de la conductivité.

Le troisième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le ciment, la chaux et les fibres). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des blocs, les traitements des fibres végétales, et finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.

Les résultats obtenus tout au long des différentes phases de l'étude sont exposés et analysés dans le chapitre 4.

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

Chapitre 1 :

Synthèse Bibliographique

Chapitre 1. Synthèse Bibliographique

I. Introduction

La terre est utilisée comme matériau de construction depuis des milliers d'années par des civilisations à travers le monde. Ceci est dû principalement à l'abondance du matériau terre, à sa facilité de mise en œuvre et au coût réduit de sa production. Plusieurs techniques de construction ont été développées selon l'environnement et le climat locaux et aussi selon les traditions et les coutumes.

C'est à juste titre que les matériaux de construction en terre tels que les briques en argile cuite, les tuiles et les briques en terre comprimée (BTC) ont été retenus comme matériaux à grande inertie thermique [1]. Quant aux propriétés mécaniques, certains travaux dans la littérature montrent que les résistances mécaniques (flexion et compression) s'améliorent en fonction du taux et de la nature de stabilisants [2,3,4].

II. Techniques de Construction

La construction en terre crue est une technique de construction très ancienne et connue dans tout le monde étant donné qu'elle a été le premier matériau de construction utilisé par l'homme. Il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. D'après Houben et Guillaud (1994) [5] dénombre douze techniques, chaque technique utilise une terre bien précise.

En effet, chacune d'elle a une formulation différente. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : l'adobe, le torchis, la bauge, le pisé et les briques de terre comprimée (BTC).

II.1. L'adobe

L'adobe est une brique de terre crue. Elle est obtenue par moulage d'un mélange de terre, d'eau et éventuellement de la paille, après démoulage les briques sont séchées au soleil. Après une cure de 15 jours, les briques d'adobe sont mises en service en utilisant un mortier qui assure la liaison entre elles pour constituer un système constructif.



Figure 1. La construction par l'adobe.

II.2. Le torchis

Le torchis est une technique de remplissage en terre crues, il s'agit d'une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille.



Figure 2. La construction par le torchis.

II.3. La bauge

La bauge est un système constructif monolithique en terre crue empilée. La terre à l'état plastique, généralement mélangée à des fibres végétales ou animales, particulièrement la paille. Cette technique consiste à empiler la terre sous forme de boule, et à la tasser jusqu'à obtenir une couche. L'assise est constituée par plusieurs couches.



Figure 3. La construction par la bauge.

II.4. Le pisé

Le pisé est un procédé de construction de mur en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide d'un pilon. Le mur décoffré immédiatement après que la terre a été damée.

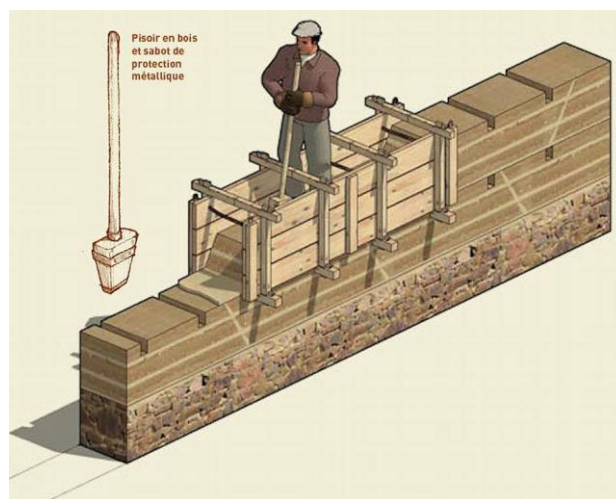


Figure 4. La construction par le pisé.

III. Blocs de Terre comprimé (BTC)

III.1. Définition

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de pilons de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Elle a été développée aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie.

Le BTC est très régulier en forme et en dimension, ils sont pleins ou perforés ce qui permet de réaliser des travaux de maçonnerie très variés. Les blocs de terre comprimée, sont fabriqués à partir de terre humide et compactée dans une presse.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre comprimée stabilisée ». Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terreau- air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières.

III.2. Cycle de production des blocs de terre comprimée

Le cycle de la production de BTC est montré à la Figure 5.

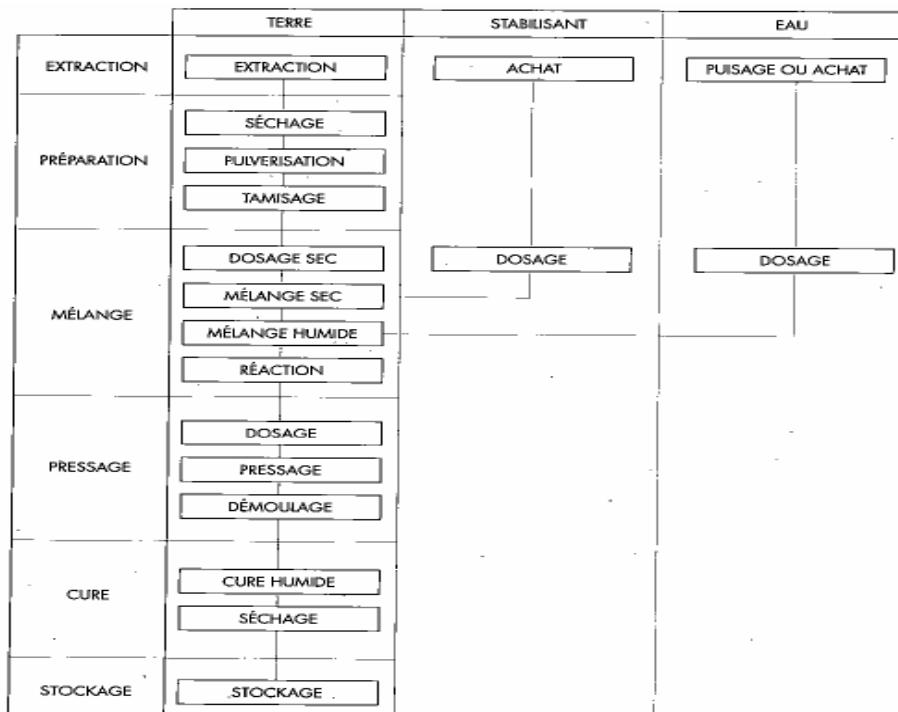


Figure 5. Cycle de production des blocs de terre comprimée (V.HOUBEN et AL, 1994). [5]

III.3. Avantages des blocs de terre comprimée

Economiques :

- Réduction de la fuite des devises par une diminution des matériaux importés (ciment, acier et bois),
- Une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale.

Ecologiques :

- Réduction d'émission de CO₂, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment,
- Réduction importante d'énergie consommée pour le transport du matériau de construction.

+ Disponibilité :

- La terre est disponible en quantités quasiment illimitées dans la plupart des régions.
- Production possible de l'échelle artisanale à l'échelle industrielle, possibilité de produire directement sur le chantier,

+ Confort :

- Atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques à l'intérieur des bâtiments, grâce à une grande inertie thermique.
- Autorégulation du taux d'humidité à l'intérieur des réalisations grâce aux matériaux

+ Qualité architecturale :

- Produits aux dimensions standardisées, modulaires, réguliers et précis,
- Permet la réalisation des architectures aux murs apparents

III.4. Exemples de constructions modernes en BTC

On trouve aujourd'hui de nombreuses constructions en BTC à travers le monde. A titre d'exemple la mosquée Al Medy, en Arabie Saoudite (Figure 6), a été réalisée en sept semaines. Construit sans coffrage, cette mosquée est de 420 m² de superficie, couverte d'un toit voûté et un minaret de 18 mètres de hauteur.



Figure 6. Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite (Auroville).

On peut citer encore la Maison palmier à Marrakech (Figure 7).



Figure 7. Maison palmier à Marrakech (MAROC).

IV. La terre, un matériau de construction

IV.1. Définition

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre (Houben, 1996) [5].

IV.2. Composition

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (< 2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben, 1996) [5]. Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire

d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979) [12].

Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

IV.3. Les Argiles

IV.3.1. Définition

Il n'y a pas de définition universelle du terme « argile ». En effet, il en existe autant que de disciplines. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique. L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspoire,...) ou encore des minéraux ferrières (lepidocrocite, maghemite...).

Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2 μ m (Michot, 2008) [13].

IV.3.2. Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont généralement composés des phyllosilicates hydratés formés par l'association de feuillets, ceux-ci sont basés sur un ensemble de tétraèdres de silice SiO₄. Ces tétraèdres partagent trois sommets entre eux suivant un plan dit hexagonal. Le sommet restant est partagé avec un octaèdre AlO₆, comme montré sur la (Figure 8). Il existe différentes combinaisons de tétraèdre et octaèdre suivant le type d'argile [14]. La distance interfoliaires sépare deux feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets peut être désorganisés. D'autre part, il y a des déséquilibres au niveau des charges, ce déséquilibre est compensé par l'adsorption de cations dans l'espace interfoliaire (capacité d'échange des argiles).

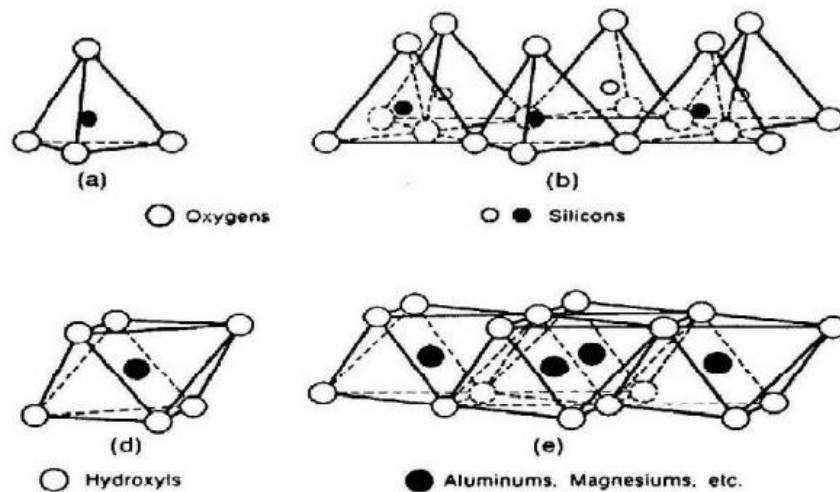


Figure 8. Eléments structuraux : (a) et (b) les tétraèdres, (d) et (e) les octaèdres. (Grim, 1959) [15]

IV.3.3. Types et classification des argiles

Différentes classifications des phyllosilicates ont été proposées. La première, établie par l'**AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972)**, se base sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième, établie par Mering et Pedro (1969) [16] prend en compte la localisation des substituants, leurs distributions et le type des cations compensateurs. La classification la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet.

On distingue ainsi quatre groupes :

✚ **Minéraux de type 1/1 ou T-O** : le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et octaédrique. Son épaisseur est d'environ 7 Å (angströms). Chaque feuillet est relié à un autre.

Feuillet par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets.

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

✚ **Minéraux de type 2/1/1 ou T-O-T-O** : le feuillet est constitué d'une couche octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques. Son épaisseur est d'environ 14 Å.

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

- **Kaolinites** :

Minéral à deux couches T-O. Le feuillet est neutre et l'espace interfoliaire est vide. L'unité structurale a une épaisseur de 7,2 Å. Les feuillets sont liés par des liaisons hydrogène entre les atomes d'oxygène de la base de la couche T et les atomes d'hydrogène du groupement hydroxyle de la couche O du feuillet suivante. La structure est stable : l'eau ne peut s'adsorber qu'autour des particules et cette argile n'est pas gonflante.

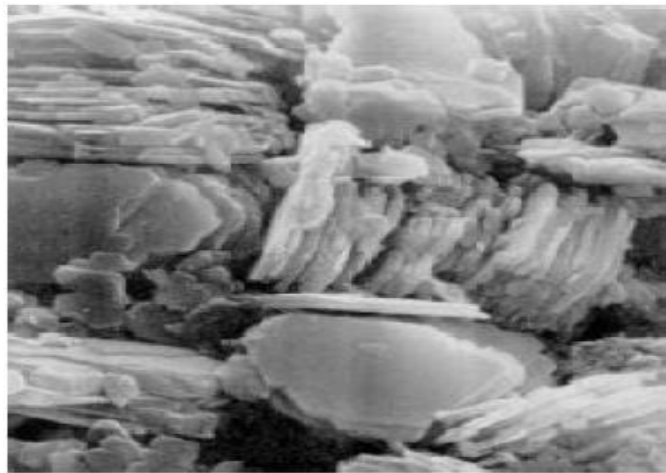


Figure 9. Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993) [17]

- **Illites** :

L'illite appartient à la famille des phyllosilicates T-O-T : les atomes de silicium dans les tétraèdres sont remplacés par des atomes d'aluminium. Il y a une charge négative élevée compensée principalement par des ions K^+ avec de fortes liaisons. Cette liaison forte empêche l'introduction de molécules d'eau entre les différents feuillets ce qui rend l'illite peu sensible à l'eau.

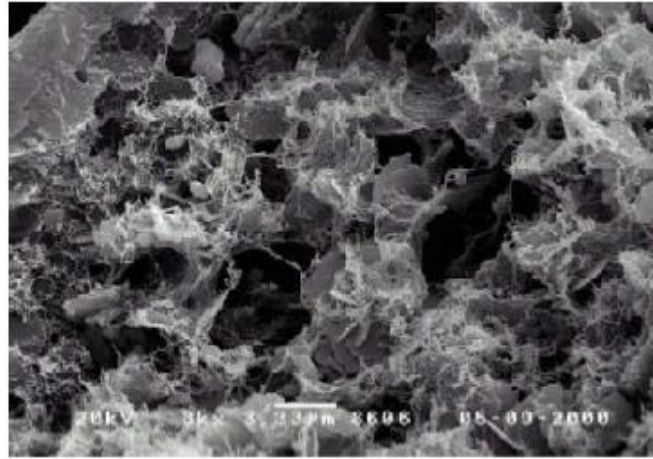


Figure 10. Photographie au MEB.

- Smectites :

Les smectites sont des phyllosilicates constitués d'une couche octaédrique (phyllosilicates) appartenant à cette famille. Les liaisons interfoliaires ainsi que les liaisons cationiques sont beaucoup plus faibles, ce qui permet à l'eau de s'introduire entre les différents feuillets et de réagir avec ces ions compensateurs. La montmorillonite est le minéral des argiles.



Figure 11. Photographie au MEB montmorillonite.

V. Les propriétés du matériau terre en construction

V.1. La texture

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques voir la (Figure 12). Il pourrait être établi à 5 %.

Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations était trouvé dans les gammes comprises entre 10 % et 22 % pour les BTC et entre 10 % à 15 % pour le pisé. Cependant, la teneur en limon entre 10 % à 25 % pour le BTC (Jiménez Delgado et al., 2007).

Doat et al (1979) [12,18], démontrent qu'une fraction trop importante en silt provoque après séchage des BTC un retrait trop important et qu'une fraction trop importante d'élément de taille plus grosse diminue les performances des BTC à cause du manque d'argile et de cohésion. Guettala et al. (1997) [19], montrent qu'il est nécessaire de bien fragmenter le sol cohésif car il existe une taille critique pour les mottes de sols argileux. Au-delà d'une taille de 5 mm, ces mottes d'argiles diminuent les résistances mécaniques du sol traité.

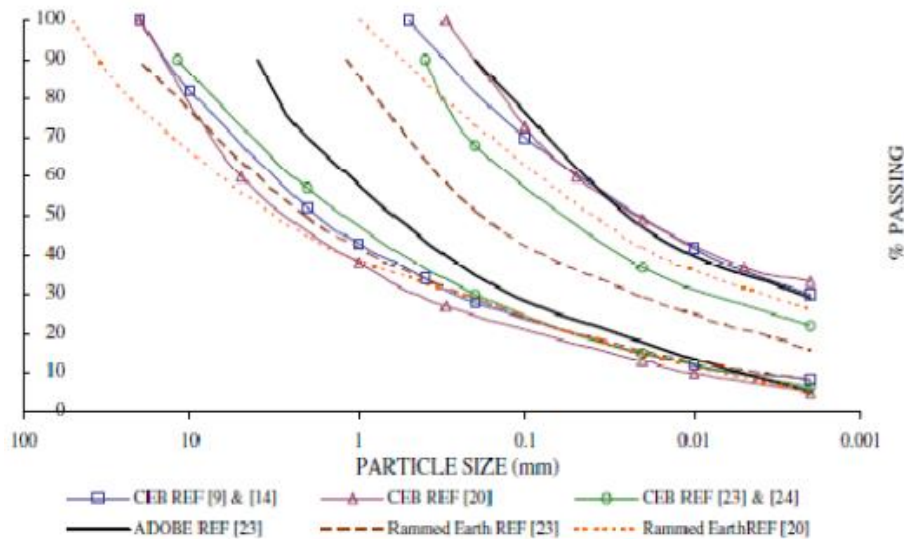


Figure 12. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre.

(Jiménez Delgado MC et al., 2007) [20]

V.2. Plasticité

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans se rompre. Elle est l'un des états de la cohérence des sols. La Figure 13 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé. En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16 à 28 % et une limite de liquidité (LL) entre 32 à 46 % (Jiménez Delgado et al., 2007) [20].

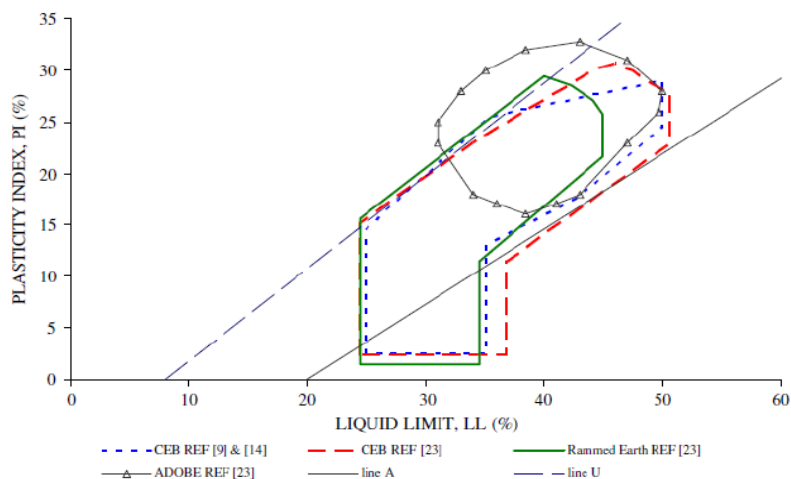


Figure 13. Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre.

(Jiménez DelgadoMC et al., 2007) [20]

V.3. Matière Organique

Dans le sol, le terme matière organique du sol regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Leurs effets sont de retarder la réaction pouzzolanique car elles enveloppent la surface de l'argile et gênent ainsi la réaction chaux-argile. Selon Houben et Guillaud (2006) [5] la matière organique supérieure à 1 % dans le sol représente un danger potentiel. Vénuat (1980) [21] a proposé un autre seuil de 2 % de la matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol.

VI. Stabilisation

C'est un ensemble de procédés permettant une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la durabilité de la terre. Elle doit permettre :

- La réduction de la porosité ;
- La diminution du retrait et gonflement ;
- L'obtention d'une meilleure cohésion ;
- L'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- L'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On dénombre trois principaux procédés de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

VI.1. Stabilisation mécanique

Elle s'opère par compactage de la terre qui modifie sa compressibilité et sa densité, sa perméabilité et sa porosité. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mise au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression.

C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la texture de la terre.

VI.2. Stabilisation physique

La stabilisation physique peut se faire de deux façons différentes : soit de modifier les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la texture, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines. Soit d'ajouter des fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lorsque la terre sèche.

VI.3. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre par l'intermédiaire de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles.

De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent des améliorations différentes à la terre selon leur propriété.

VII. Stabilisation des sols par l'ajout de la chaux

VII.1. Définition

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés

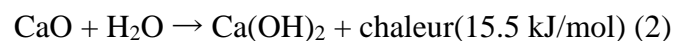
du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique. L'utilisation des produits à base de chaux et de calcaire remonte à la préhistoire. Utilisés depuis plus de 12000 ans, il s'agit des plus anciens matériaux utilisés par l'humanité dans toutes sortes d'applications : en art et en architecture, dans les matériaux de construction, la préparation des aliments, les soins de toilette personnels, les produits chimiques industriels et bien plus.

On distingue différents types de chaux utilisées dans la stabilisation des sols.

- La chaux vive est obtenue par la calcination du calcaire (CaCO_3), à une température supérieure de 900°C . Celle-ci est dissociée à cette température en oxyde de calcium (CaO) ou chaux vive, dioxyde de carbone (CO_2) selon (l'équation 1)



- La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau. La matière produite est appelée chaux éteinte ou chaux aérienne selon (l'équation 2)



- La chaux hydraulique est obtenue à partir de calcaires contenant plus de 6 % d'argile. A température entre 800 et 1500°C , le CaO du calcaire se combine avec des éléments des silicates de calcium, des aluminates et des fero-aluminates de calcium.

En principe, tous les types de chaux sont à employer, mais la préférence est néanmoins donnée aux chaux aériennes plutôt qu'aux chaux hydrauliques.

La chaux éteinte est couramment utilisée dans la stabilisation, par contre la chaux vive, son emploi est limité et il faut la manipuler avec précaution. Elle doit être maintenue à l'abri de l'humidité. Cependant, elle est très efficace par rapport à la chaux éteinte vu qu'elle apporte plus d'ions calcium (Houben et Guillaud, 1994) [5].

VII.2. Caractéristiques de la chaux

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que :

- Un pouvoir assainissant et désinfectant
- Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant ;
- Une participation à la respiration de l'ouvrage ;

- Une élasticité ;
- Une tenue dans le temps encore inégalité ;
- Une absorption des CO₂ lors de la carbonisation.

VII.3. Cycle de la chaux

Les produits dérivés du calcaire (CaCO₃) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)₂) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire.

VII.4. Modification des propriétés des sols traités à la chaux

VII.4.1. Evolution de la consistance du sol

L'ajout de chaux provoque rapidement, en quelques minutes, la floculation des argiles.

Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité.

Cette modification provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes (Cabane, 2004) [22]. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la nature des minéraux argileux du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux. Bell (1996) [23] a étudié l'évolution de la plasticité lors du traitement à la chaux de trois types de sol: le quartz et de deux types de sols argileux, composés en majorité de kaolinite pour le premier et de montmorillonite pour le second (Figure 14). Il a conclu que l'augmentation de la limite de plasticité de l'argile traitée à la chaux dépend de sa minéralogie argileuse. L'augmentation forte de limite de plasticité pour la montmorillonite, moins forte pour la kaolinite et changement non significatif pour le quartz.

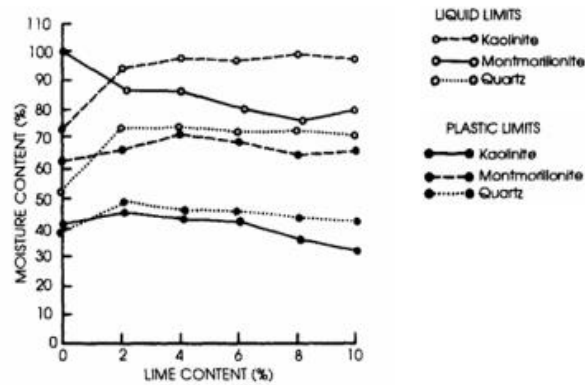


Figure 14. Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg.

(Bell, 1996) [23]

L'étude de Lasledj (2009) [24] sur l'argile très plastique (Impersol) traitée à la chaux a montré que l'indice de plasticité diminue avec la quantité de chaux ajoutée jusqu'à 6 % puis diminue plus faiblement avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés. De plus, le temps de durcissement du sol traité a peu d'effet sur les variations de l'indice de plasticité (Figure 15).

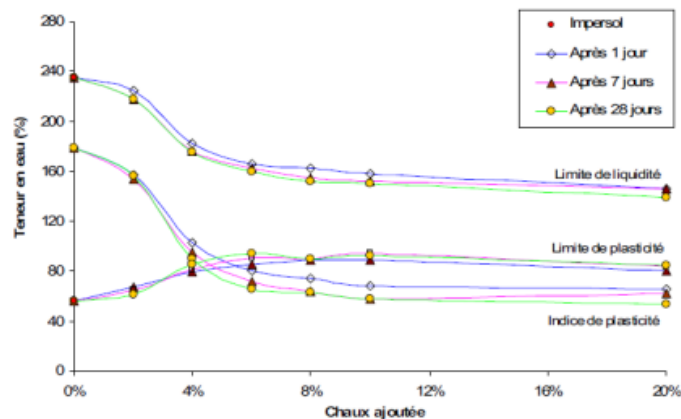


Figure 15. Evolution des limites d'Atterberg en fonction de chaux et de temps de maturation à température ambiante. (Lasledj, 2009) [24]

VII.4.2. L'optimum Proctor

Après l'ajout de chaux au sol, les courbes de compactage Proctor deviennent plus aplaties, ce qui est traduit par un décalage de la teneur en eau optimale de compaction vers des teneurs en eau plus importantes et une diminution des masses volumiques sèches.

Attoh Okine (1995) [25], explique la diminution de la masse volumique sèche par la réorganisation des particules argileuses causées par de floculation/agrégation. Cette modification dépend de la quantité de chaux ajoutée. Siddique et al. (2013) [26] ont étudié l'influence de chaux hydraulique sur la courbe Proctor (Figure 16).

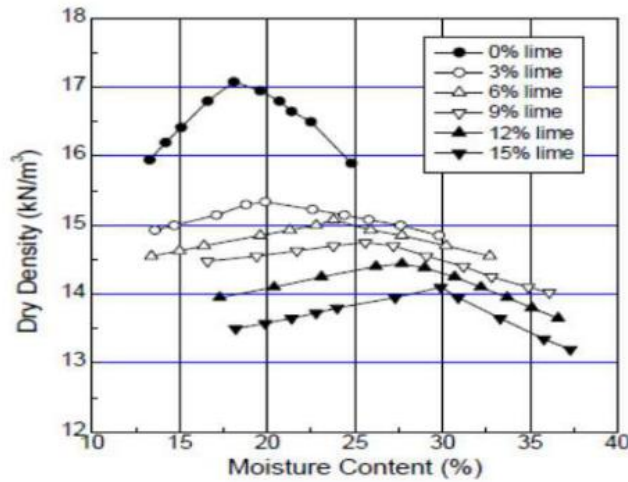


Figure 16. Influence de la teneur en chaux hydraulique sur les courbes Proctor.

(Siddique A, 2013) cité par (Flament C, 2013) [26]

Ils ont montré que l'augmentation de la teneur en chaux provoque un décalage de la teneur en eau optimale de compaction vers des teneurs en eau plus importantes et une diminution des masses volumiques sèches.

VII.4.3. L'influence de l'ajout de chaux sur les propriétés mécaniques du matériau stabilisé

Dans les études géotechniques, plusieurs travaux ont été menés pour étudier l'influence de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression des différents sols. Il en ressort que l'ajout de chaux permet d'augmenter la résistance à la compression grâce à la formation du gel hydraté. Plusieurs paramètres influent sur la performance mécanique : la nature des minéraux argileux, le dosage en chaux, la contrainte de compactage, le temps de cure et la température.

Le Roux (1996) [27] trouve que la kaolinite donne la meilleure augmentation de la résistance mécanique par rapport à l'illite et à la montmorillonite, et ce malgré une réaction moins active comparée à la montmorillonite.

Bell (1996) [23] arrive aux mêmes conclusions que le Roux. Il a étudié le comportement mécanique caractéristique de deux argiles (kaolinite et montmorillonite) et le comparant avec le quartz traité à la chaux (Figure 17). La montmorillonite donne des résistances à la compression faible par rapport à la kaolinite. Les fortes résistances sont atteintes pour quartz.

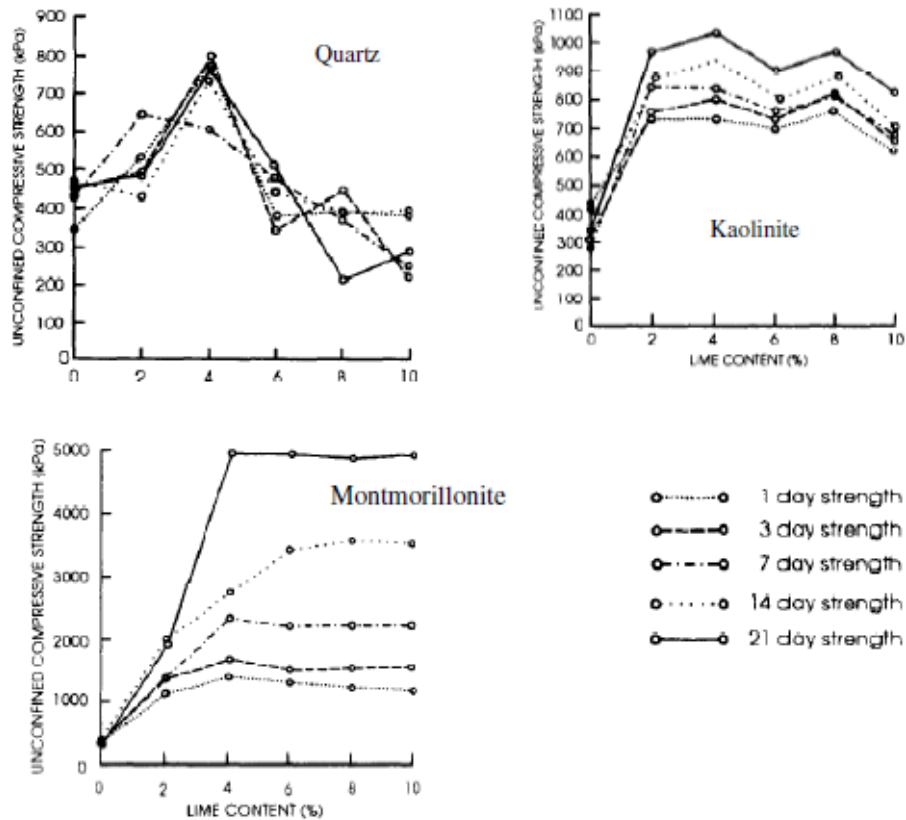


Figure 17. Influence de la minéralogie d'argile sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps de cure. (Bell, 1996) [23]

Plusieurs auteurs (Bell, 1996 ; Little, 1995) [23,28] montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et le temps de cure. Al-Mukhtar (2010 a) [29], a expliqué l'augmentation de la résistance en fonction du temps avec l'augmentation de la consommation de chaux. Après 7 jours, la consommation de chaux est peu importante malgré la variation du dosage testé (Figure 18). A 90 jours et pour un dosage en chaux de 20 %, environ (18 %) de la chaux est consommée, La consommation lente de la chaux met en évidence la lenteur de la réaction pouzzolanique engendrée par la chaux.

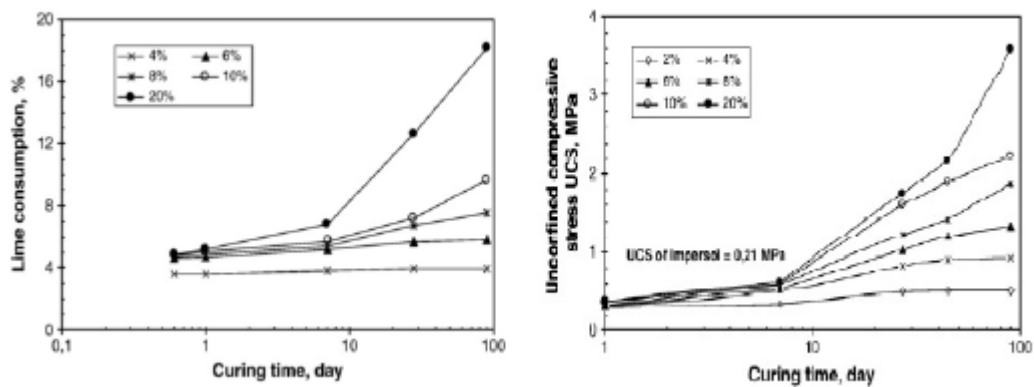


Figure 18. Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et de temps de cure d'après (Al-Mokhtar et al., 2010a) [29]

L'augmentation de la température de cure des sols stabilisés à la chaux permet d'accélérer les réactions pouzzolaniques (AL-Mukhtar et al, 2010b) [30]. Après 90 jours, un pourcentage de 6 % en chaux permet de doubler les résistances à la compression d'un sol pour un passage de 20°C à 50°C.

En ce qui concerne la construction d'éléments à base de terre crue. Guettala et al. (2002) [19] ont observé lors de leur étude effectuée sur des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra (Algérie), que la résistance à la compression à l'état sec et humide augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la contrainte de compactage. Cette augmentation est de l'ordre de 70 % quand la contrainte varie de 5 à 20 MPa.

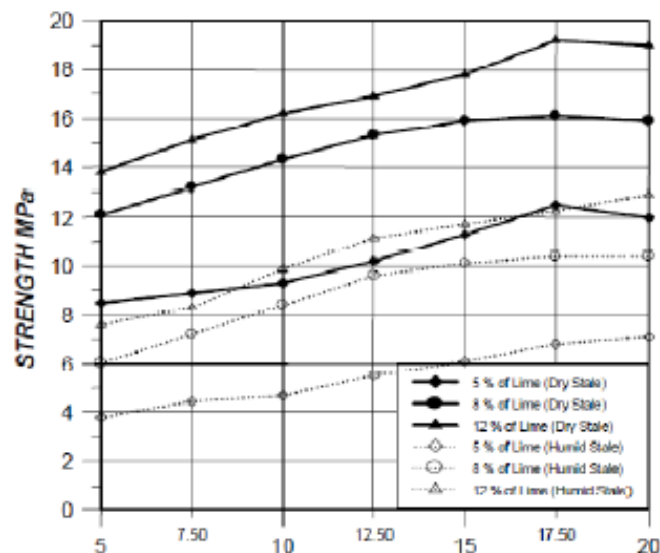


Figure 19. Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur les résistances mécaniques. (Guettala et al., 2002) [19]

Cependant, Millogo et al. (2008) [31] ont constaté que la résistance à la compression des briques d'adobe (Figure 20) augmente avec l'augmentation de l'ajout de chaux, en revanche les teneurs plus élevées de chaux supérieures à 10 % du poids de mélange n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance. Ces constats sont justifiés par la microstructure (figure 21).

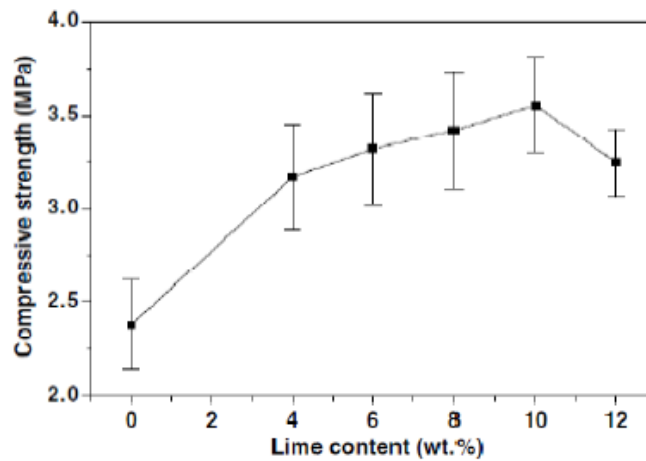


Figure 20. Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux. (Millogo, 2008) [31]

Lorsque la teneur en chaux est augmentée à 6 %, la silice libre a disparu et la liaison entre les particules a été développée, conduisant ainsi à l'apparition d'une microstructure homogène.

Dans ce cas les particules isolées sans relief (Figure 21e), identifiées comme CSH ont été développés. Comme la teneur en chaux a dépassé 12 %, la portlandite et la calcite qui manifestent des domaines aussi lumineux (Figure 21f) zone H ont été largement formés.

L'excès de la carbonatation a donné lieu à l'apparition d'une hétérogène microstructure.

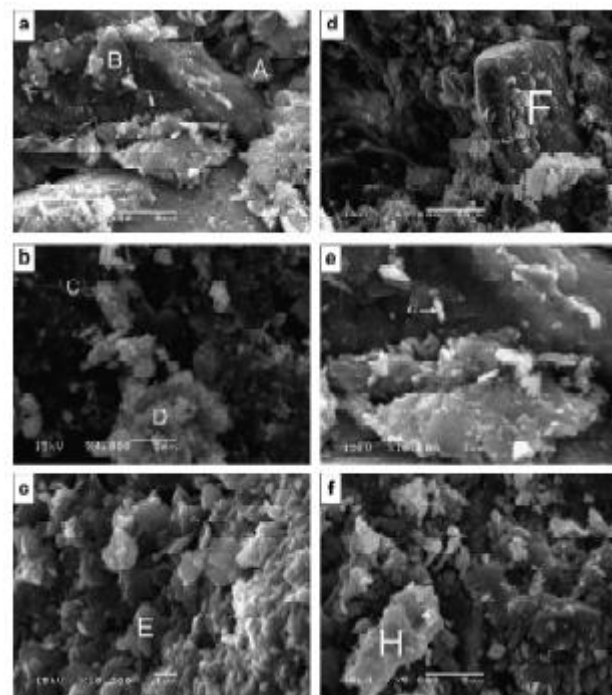


Figure 21. Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0 % chaux, (b) 4 % chaux, (c) 6% chaux, (d et e) 10 % chaux et (f) 12 % chaux. (Millogo, 2008) [31]

Venkatamara et al (2001) [32] ont traité certains problèmes liés à la technologie des blocs stabilisés à la chaux et curés à la vapeur en utilisant des terres expansives et des terres issues des réservoirs. Ils ont pu montrer que la cure par la vapeur des blocs à 80°C pendant 20 heures en pression atmosphérique, conduit à des résistances à la compression humide considérablement plus fortes que pour la cure obtenue à l'aide des tissus humides à températures ambiantes.

VII.4.4. L'influence de l'ajout de chaux sur la durabilité des briques de terres comprimée

L'un des intérêts d'ajouter une teneur de chaux dans un sol argileux est d'augmenter sa durabilité vis-à-vis de l'eau. Guettala et al. (2002) [19] ont effectué des recherches pour améliorer le comportement des blocs de terre comprimée vis-à-vis de l'eau. Les résultats ont montré l'influence de différents paramètres tels que la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur la durabilité des blocs : la perte de poids et l'absorption. Ils ont également observé que l'augmentation de la contrainte de compactage de 5 à 20 MPa et la teneur en chaux de 5 à 12% ont amélioré la perte de poids et l'absorption.

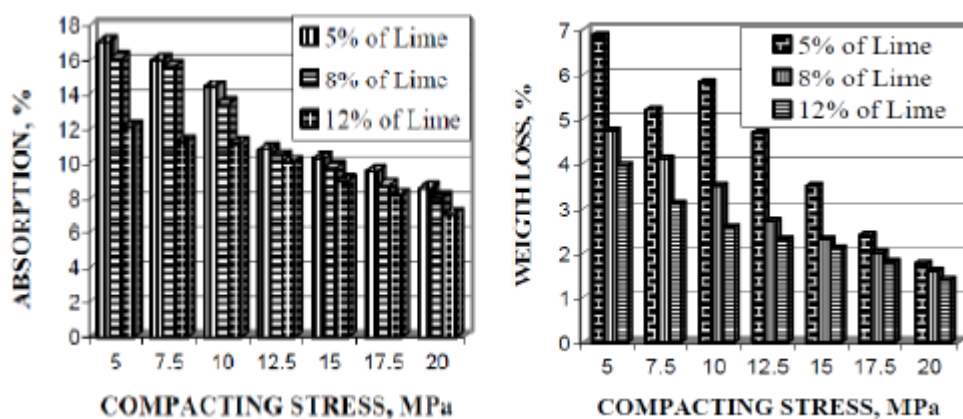


Figure 22. Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur l'absorption et sur la perte en poids (essai séchage/mouillage). Guettala et al. (2002) [19]

VIII. Stabilisation des sols par l'ajout de Ciment

VIII.1. Généralité

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente généralement sous forme d'une poudre grise. Il sert à fabriquer du béton et du mortier : additionné d'eau, le ciment durcit pour former une masse solide, résistante et notamment sous l'eau (puisque'il s'agit d'un liant hydraulique).

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment (Houben ,2006) [5].

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %) (Houben ,1996) [5].

D'après Venuat (Venuat,1980) [21], tous les ciments normalisés conviennent en principe pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Alors que d'autres auteurs (Doat,1979) [12], préconisent un type de ciment selon la nature du sol :

- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C₃S et bélite C₂S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, Ca(OH)₂. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % (Ip <25 %) (Verdeyen,1971) [33].

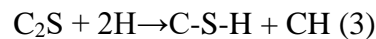
VIII.2. Mécanisme de stabilisation

La poudre de ciment contient plusieurs phases différentes. Les phases principales sont : l'alite (C₃S), la bélite (C₂S), l'aluminate tricalcique (C₃A), l'aluminoferrite tetracalcique (C₄AF) et la périclase (MgO). Des phases mineures sont également trouvées : la chaux libre (CaO), les sulfates de sodium et de potassium (Na₂SO₄ et K₂SO₄) (Moszkowicz, 2001) [34].

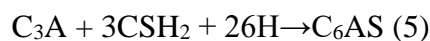
Suivant les proportions de ces éléments, les ciments pourront avoir des propriétés différentes. Par exemple, une forte teneur de C₃S donnera une résistance élevée, par contre un ciment à forte teneur en C₃A aura une faible résistance à l'action des eaux agressives.

Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydrates. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C₃S et C₂S) qui forment deux

nouveaux composés : la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H:3CaO.2SiO₂.3H₂O) :

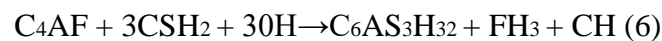


L'hydratation des aluminates tricalciques (C₃A) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



En l'absence de gypse, les C₃A réagissent avec l'eau pour donner des C₄AH₁₃, C₂AH₈, et des C₃AH₆. Les C₄AH₁₃ et C₂AH₈ sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C₄AH₈.

La phase ferrite (C₄AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols (Tran, 2009) [35].

Pour le cas des sols pulvérulents, leurs particules ont des tailles plus grandes que celles des grains de ciment, donc elles peuvent être revêtues de ciment. Le ciment peut réagir avec lui-même ou avec le squelette granulaire du sable (United Nations, 1992) [36].

Dans le cas des sols cohérents, beaucoup de particules sont plus fines que les grains de ciment, donc elles ne peuvent pas être revêtues par du ciment (Bell, 1975) [23]. Cependant, suite au compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui sera de plus en plus résistant à mesure que l'hydratation avance, menant à l'augmentation de la résistance.

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit (United Nations, 1992) :

- L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.
- Progression de l'hydratation, la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
- Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment (Vénuat, 1980) [21].

Il en résulte en fait trois structures mêlées (Houben, 2006) [5] :

- Une matrice inerte sableuse liée au ciment,
- Une matrice d'argile stabilisée,
- Une matrice de terre non stabilisée.

VIII.3. Efficacité et dosage

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des limons et des argiles (Houben, 2006) [5]. Ceci confirme les résultats obtenus par Walker (Walker, 1997) [37]. Ces résultats montrent que la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment diminue avec l'augmentation de teneur en minéraux argileux (Figure 23).

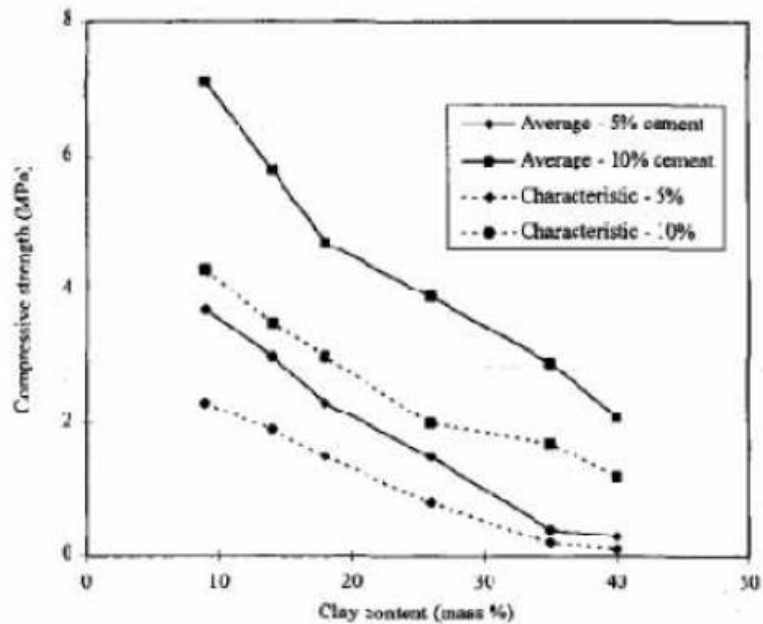


Figure 23. Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment. (Walker, 1997) [37]

En général, il faut au moins 5 à 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants.

La résistance en compression reste très dépendante du dosage, 8 % de ciment constituent souvent une limite supérieure économiquement acceptable (Doat, 1979) [12].

D'après Gooding (Gooding, 1993) [38], le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12% en masse de ciment, semble être le bloc le plus courant. (Heathcote, 1994) [39], montre que la teneur minimale en ciment est 0,75%, au-dessous de laquelle, la résistance est indépendante de la quantité de ciment employée. Mais les résultats de l'auteur ne concordent pas avec ceux d'autres chercheurs exigeant une valeur comprise entre 5 et 12% pour être le mieux adapté. Par exemple, (Walker, 1995) [37] indique que les blocs à base de moins de 5% de ciment sont souvent trop friable pour être manipulés. Plus tard Walker (Walker, 1996) [40] reconnaît que la teneur en argile du sol doit être comprise entre 5 et 20%, la teneur en ciment entre 4 et 10% et l'indice de plasticité du sol entre 2,5 et 30%.

VIII.4. Effets sur les propriétés du matériau stabilisé

VIII.4.1. Effet sur la densité

Kerali (kerali, 2001) [41], à travers les résultats de ses recherches présentés par la Figure 24, a constaté que l'incorporation du ciment dans le mélange du sol améliore la densité sèche des BTC, mais l'amélioration est plus importante avec l'augmentation de la contrainte de compactage.

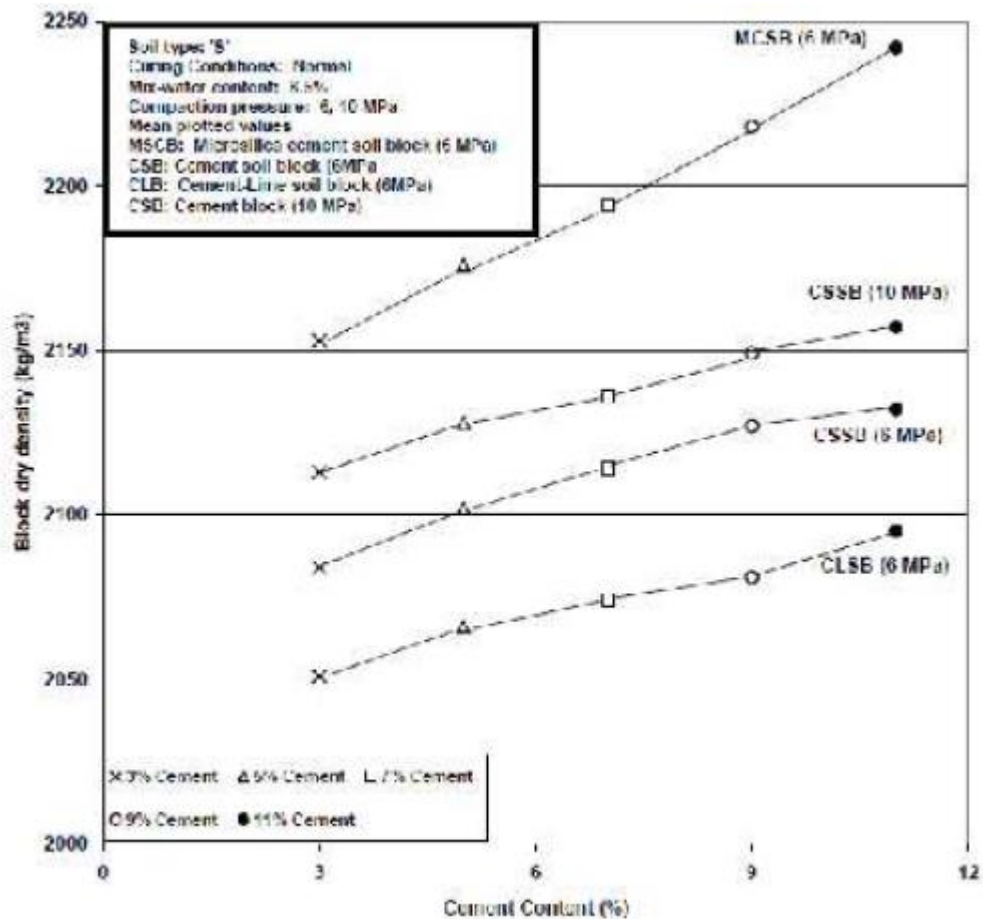


Figure 24. Effet de la teneur en ciment et la contrainte de compactage sur la densité sèche du bloc de terre comprimée. (Kerali, 2001) [41]

VIII.4.2. Effet sur la résistance mécanique

L'ajout de ciment à un sol augmente nettement sa résistance à la compression (Akpokodje, 1985 ; Walker, 1995) [37,42]. Bahar et al (Bahar, 2004) [43], ont montré que la résistance à la compression et à la traction par fendage augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment (Figure 25).

Akpokodje a examiné l'effet sur la résistance du sol avec différentes teneurs en ciment (Akpokodje ,1985) [42]. Il a constaté que la résistance à la compression augmente avec la teneur en ciment selon une fonction linéaire. La Figure 25 montre les résultats pour les trois types de sols : un loam argileux, un loam sableux et un loam limoneux. La résistance à la compression à l'âge de 7 jours pour le loam sableux est la plus élevée, avec des valeurs de 1,3 et 2,7 MPa pour 2% et 6% de ciment respectivement. La Figure 25 montre également que la résistance du loam sableux augmente plus rapidement en fonction de la teneur en ciment que celles du loam argileux et du loam limoneux. Des effets similaires sur la résistance de sol stabilisé ont été constatés par Croft (1968) et Walker (1995) [44,40].

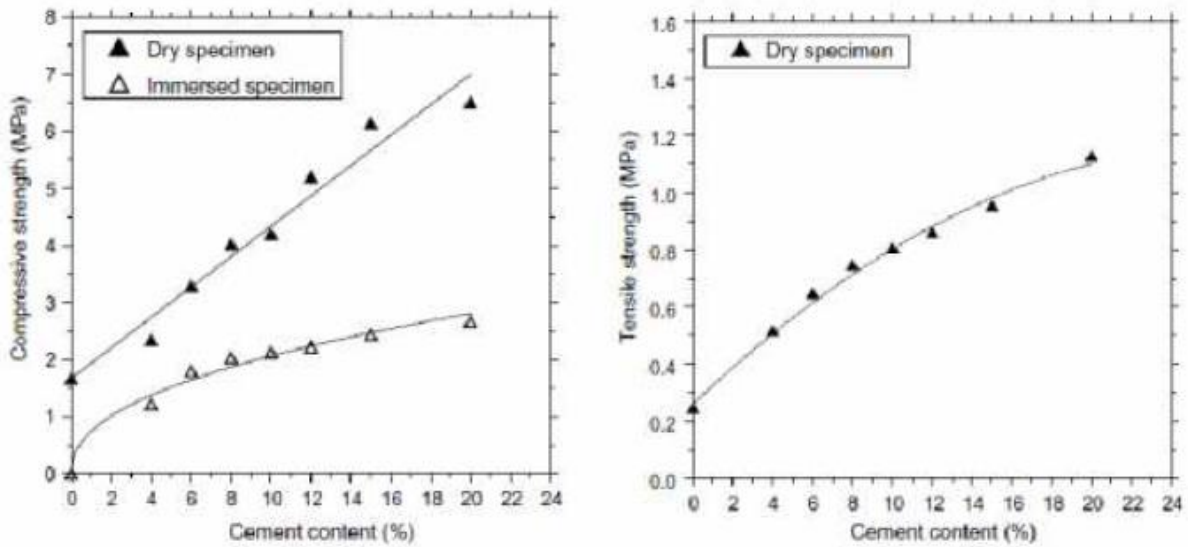


Figure 25. Effet de la teneur en ciment sur la résistance à la compression et à la traction par fendage d'échantillons de terre comprimée et stabilisée au ciment. (Bahar, 2004) [43]

L'amélioration de la résistance à la compression peut, suivant le sol traité, évoluer différemment avec la teneur en ciment (Doat, 1979) et (Akpokodje ,1985) [12,42].

L'effet principal de la stabilisation au ciment est l'insensibilisation à l'eau du matériau.

Par un traitement au ciment bien conduit, on peut obtenir des résultats très satisfaisants. Une étude réalisée par Venkatrama et al (Venkatrama, 2005) [45], a montré que la résistance à la compression humide et la résistance à traction des blocs de terre stabilisée au ciment augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, et qu'en doublant la teneur en ciment, la résistance à la compression humide augmente par 2,3 fois (Figure 27).

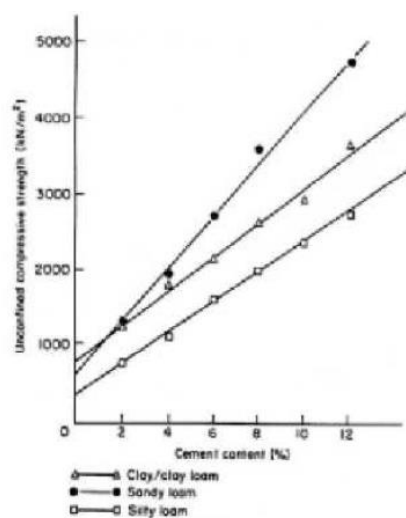


Figure 26. Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment pour 3 types de sols en zone aride australienne. (Akpokodje ,1985) [42]

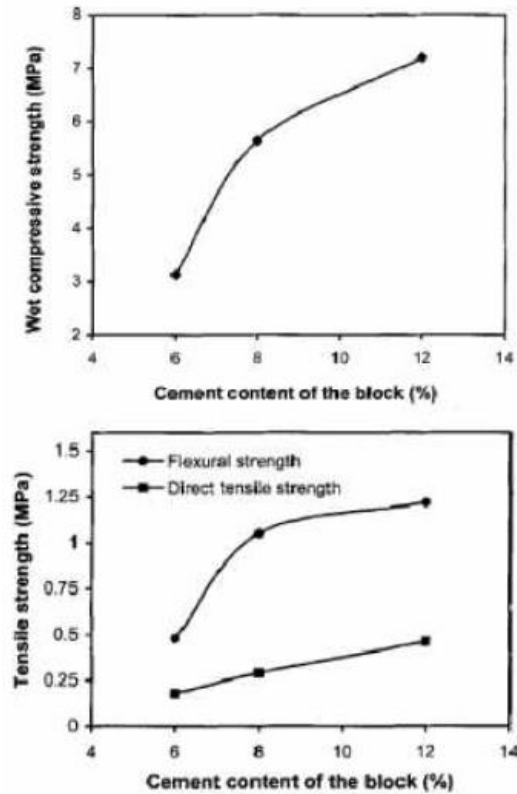


Figure 27. Variation de la résistance à la compression humide et la résistance à la traction des blocs de terre en fonction de la teneur en ciment. (Venkatrama,2005) [45]

VIII.4.3. Effet sur l'absorption totale

Les résultats de l'étude de Meukam, montrent que l'ajout du ciment a un effet bénéfique sur l'absorption d'eau du bloc de terre stabilisée. La Figure 28 montre la variation du taux d'absorption d'eau en fonction du temps à différentes teneurs en ciment. L'auteur a constaté que le taux d'absorption de l'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment (Meukam, 2004) [46].

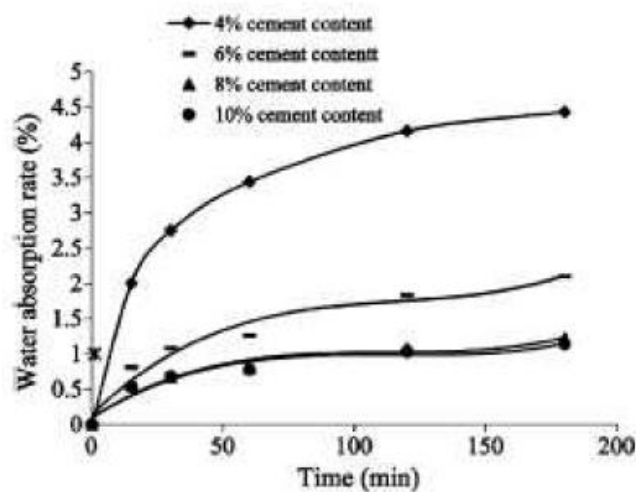


Figure 28. Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment. (Meukam, 2004) [46]

IX. Les Fibres

IX.1. Généralité

IX.1.1. Définition

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) 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.

IX.1.2. Différents types de fibres

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille :

a. Les fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (Figure 29) (Baley, 2013) [47] :

✚ **Les fibres végétales** : L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales comprennent :

- Des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- Les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),

- Les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco).

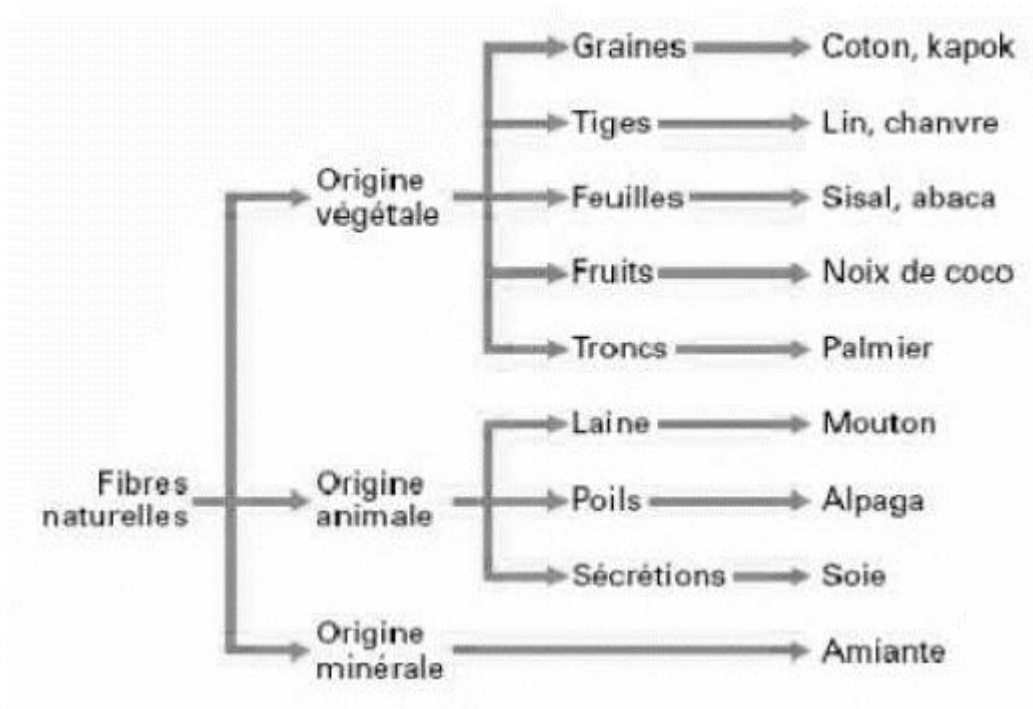


Figure 29. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine. (Baley, 2013) [47]

✚ **Les fibres animales** : La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire, ...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée ;

✚ **Les fibres minérales** : L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente.

b. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20^{ème} siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un

grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point ; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage.

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;
- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfinés : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de Toutes les fibres synthétiques.

c. Fibres artificielles

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

IX.2. Les Fibres d'Alfa

Le terme "alfa" est une appellation arabe [48] désignant autrefois toutes les graminées steppiques à feuilles résistantes et jonc forme en période de sécheresse. Le mot d'origine latine « spartum », qui a donné « sparto » ou « esparto » [49], est l'appellation employée par les espagnols. Actuellement, une seule plante est appelée alfa, c'est la "Stipa tenacissima L". L'idée de l'utilisation des fibres d'alfa dans la vie courante de L'homme est très ancienne, elle date de l'antiquité [48] pour la fabrication de tapis, de silos de blé, de cordes, de nattes et surtout d'antiquité [49], [50], [51]. Comme renforcement des matériaux de construction traditionnels, elle était utilisée dans la fabrication des briques argileuses ou des plâtres.

IX.2.1. Répartition géographique de l'alfa

L'alfa est une plante sauvage endémique qui pousse sous forme de touffes dans les régions arides du pourtour méditerranéen Figure 30. Sa répartition territoriale est donnée par le Tableau1. Les racines de l'alfa emprisonnent les particules du sol et luttent ainsi contre l'érosion et la désertification. La partie aérienne est constituée de tiges portant des gaines emboîtées les unes dans les autres, les épis dépassent ses feuilles pouvant atteindre 120 cm de longueur. Les feuilles et les tiges sont composées de filaments cellulosiques liés par de la lignine, des pectines et de l'hémicellulose.

Elle a une grande importance écologique parce que sa culture nécessite très peu d'eau, pas d'insecticides ni de pesticides. C'est une plante persistante qui ne disparaît pas pendant l'hiver et qui pousse librement, formant de vastes nappes. L'alfa est aussi consommée fraîche pour le bétail.

Tableau 1. La répartition territoriale de l'alfa [52].

Pays	Superficie de l'extension de l'alfa (ha)
Algérie	4.000.000
Maroc	3.186.000
Tunisie	600.000
Lybie	350.000
Espagne	300.000
Portugal	Peu



Figure 30. La plante alfa dans son environnement.

IX.2.2. Propriétés mécaniques des fibres d'alfa

Les propriétés mécaniques des fibres d'alfa ont été mesurées par plusieurs auteurs au moyen d'un essai de traction sur les fibres individuelles extraites des feuilles (Tableau 2). Des fibres élémentaires, dans une gamme de 10-30 μm , ont un module de Young de 19 - 71 GPa et une résistance à la traction de 245-1500 MPa (Ben Brahim et al. 2007, Khaldi et al.2014, Paiva et al. 2007) [53]. D'autres auteurs ont mesuré les propriétés mécaniques des fragments de feuilles alfa papetières (environ 50 à 200 μm de diamètre), après une série d'extractions mécaniques, chimiques et enzymatiques ; la résistance à la traction et le module de Young étaient environ de 45-114 MPa et 2,2 à 12,7 GPa, respectivement (Dallel 2012, Hanana et al. 2015) [54]. Les différences entre ces données mécaniques peuvent généralement être conférées à la méthode d'échantillonnage, aux prétraitements et à la longueur des fibres testées.

Tableau 2. Propriétés mécaniques de la fibre d'alfa selon la littérature. (Hanana et al.2015) [54]

Source	Diamètre moy (μm)	Module de Young (GPa)	Résistance à la traction max (MPa)	Elongation à la rupture (%)	Processus d'extraction	Application spécifique
Dallel 2012	-	$8 \pm 2,7$	$75 \pm 24,09$	$2,8 \pm 2$	Mécanique chimique enzymatique	Textile
Ben Brahim et al. 2007	-	21,5	247	1,96	chimique	Composite
Bessadok et al. 2009	70	71 ± 23	1480 ± 800	$2,8 \pm 2$	Rouissage chimique	Composite
Hanana et al. 2015	$24,34 \pm 8,6$	58 ± 17	1327 ± 342	$2,4 \pm 0,6$	Rouissage mécanique chimique enzymatique	Composite

IX.3. Les Fibres d'Agave de sisal

IX.3.1. Description de la fibre de Sisal

Le sisal de nom scientifique *Agave sisalana* est une plante vivace d'origine mexicaine et cultivée en Afrique de l'Est constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à plus de deux mètres de long (Figure 31), chaque feuille contenant une moyenne d'environ 1000 à 1200 paquets de fibres et une plante produit environ 200 à 250 feuilles avant la floraison. La fibre de sisal constitue avec les autres fibres textiles la plus

"grossière" des fibres dures parmi les nombreuses variétés cultivées dans des conditions tropicales et subtropicales ; il est plus "grossier" que le jute et les autres fibres libériennes. Ces feuilles sont constituées de 4% de fibres, 0,75% de cuticule, 8% de matière sèche et 87,25% d'eau.



Figure 31. Plante de Sisal

L'Agave Sisalana produit, par ses feuilles, des fibres dures flexibles qui servent à la fabrication des cordes, des ficelles, des nasses et de nattes, et pour le rembourrage et le capitonnage. Le sisal compte actuellement pour les deux tiers de la production mondiale de fibres dures. Les trois-quarts de la production sont utilisés sous forme de ficelle agricole.

IX.3.2. Utilisations traditionnelles et nouvelles

Les fibres de sisal servent traditionnellement à fabriquer de la ficelle, de la corde et des cordages. Le marché mondial du sisal (et du principal produit dérivé, la ficelle agricole) n'a cessé de se contracter depuis qu'il est apparu des produits synthétiques remplaçant les fibres naturelles, et en particulier depuis que le polypropylène est utilisé pour la fabrication de ficelle de lieuse et de cordages. La fibre de sisal offre l'avantage d'être un produit naturel, renouvelable et biodégradable, les échanges de sisal sont en passe de connaître un nouvel essor avec la remise à l'honneur des utilisations traditionnelles et l'apparition de nouvelles utilisations.

X. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des blocs de terre comprimée

L'avantage du coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques explique en partie la tendance d'utilisation en faveur des fibres naturelles (Thielemans,2004) [55]. Mais il faut dire, que l'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie (Swamy,1990) [56].

L'industrie des fibres naturelles doit relever le défi de développer de nouvelles technologies pour faciliter l'utilisation des fibres naturelles dans la production de matériaux de construction, en se basant sur leurs avantages naturels pour concurrencer efficacement les produits synthétiques. Les défis particuliers pour les scientifiques sont : l'adhérence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problèmes de compatibilité, la sensibilité à l'humidité, la dégradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres.

L'utilisation des fibres naturelles locales est plus avantageuse pour la population, vu son abondance, son coût faible, sa faible consommation d'énergie qui permet la réduction des impacts environnementaux, (Coutts, 1995 ; Aggarwal, 1995 ; Bouhicha, 2005 ; Binici, 2005; Hejazi, 2012 ; Millogo, 2014) [57,58,59,60,61,31].

Pour la stabilisation des BTC, il a été confirmé maintenant que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC (Houben, 1994) [5]. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs.

Dans ce qui suit, on va passer en revue l'influence de la présence des fibres en générale et les fibres végétales en particulier, sur les propriétés mécaniques, hygroscopiques et thermiques des BTC.

X.1. L'Effet des fibres sur les propriétés mécaniques

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction (Ramaswamy, 1983 ; Ziegler, 1998 ; Filho, 2000) [62,63,64].

Dans un travail de recherche publié en 2014 (Millogo, 2014), Millogo et al. [31] se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres d'hibiscus cannabinus (Kenaf), pour fabriquer des blocs de terre comprimée sans aucun stabilisant chimique. Les BTC ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et avec deux longueurs de fibres 30 mm et 60 mm. Les résultats montrent que la présence des fibres d'hibiscus cannabinus a amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. L'important effet a été observé avec le cas de 30 mm de longueur de fibre (Figure 32), (Figure 33).

Les auteurs ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques au non-propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après les auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile. Vergas et al. ont constaté dans une étude expérimentale sur la résistance sismique de la maçonnerie, une augmentation de la résistance à la compression du BTC avec l'utilisation de 0.5-8,0% en poids, de paille de longueur 100 mm. Ils ont justifié ce résultat par l'action de couture de l'interface BTC-mortier de fibres de paille ce qui limite l'apparition des microfissures produites par le retrait de séchage (Vergas, 1986) [65].

Lors de sa discussion sur les types de stabilisants Stulz et Mukerji reconnaissent la paille (blé, seigle, orge, etc) et les fibres végétales (sisal, chanvre, le coco et bagasse) comme une importante catégorie de stabilisants des BTC, mais ils ne l'ont pas justifié par des résultats de travaux de recherches (Stulz, 1988) [66].

Sallehan et Yaacob ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier a amélioré la résistance à la compression des briques fibrées (Sallehan, 2011) [67].

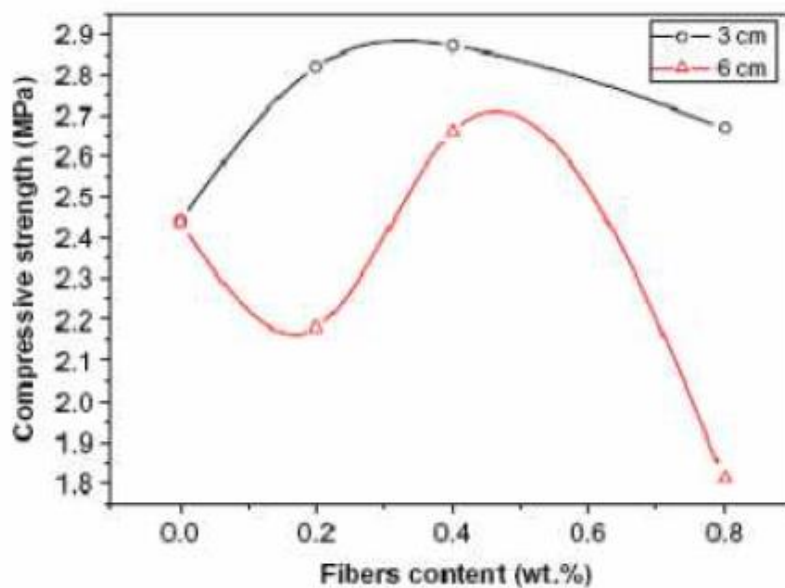


Figure 32. Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres. (Millogo,2014) [31]

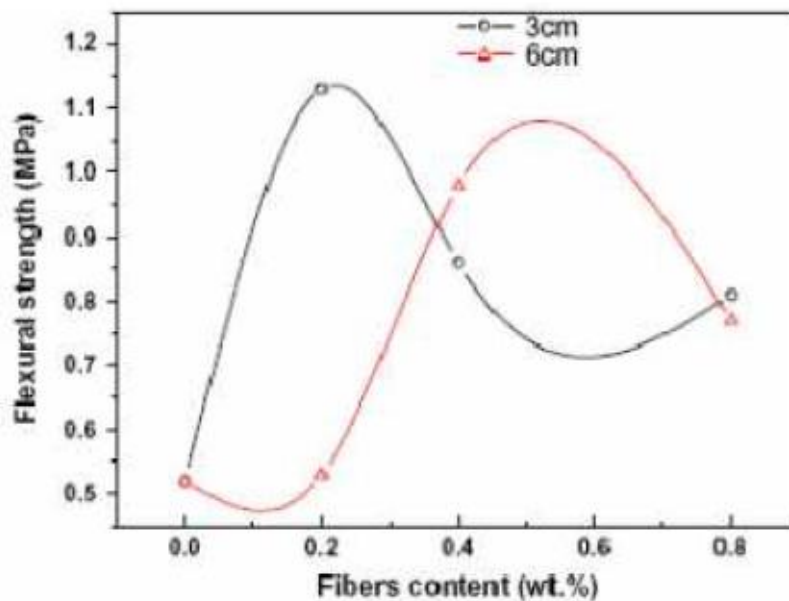


Figure 33. Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres. (Millogo,2014) [31]

Dans son étude, Namango a constaté, que dans certaines limites, il y a une augmentation considérable de la résistance à la compression et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation de fibres de sisal (Figure 34 et Figure 35), de poudre de manioc et de teneur en ciment, et qu'en dehors de ces valeurs limites, la présence des fibres de sisal a un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimée (Namango,2006) [10]. De son côté, Minke a constaté, que l'ajout de fibres tels que poils d'animaux ou humains, coco, sisal, agave, le bambou et la paille peut aider à réduire le retrait, car la teneur en argile est réduite et une certaine quantité d'eau est absorbée par les pores des fibres (Minke, 2000) [68]. Dans le même contexte, Villamisar et al. ont montré que l'utilisation des pelures de manioc a augmenté considérablement la résistance à sec des mélanges, ce qui est utile pour réduire les chutes causées par les problèmes de la manipulation du BTC (Villamisar, 2012) [69].

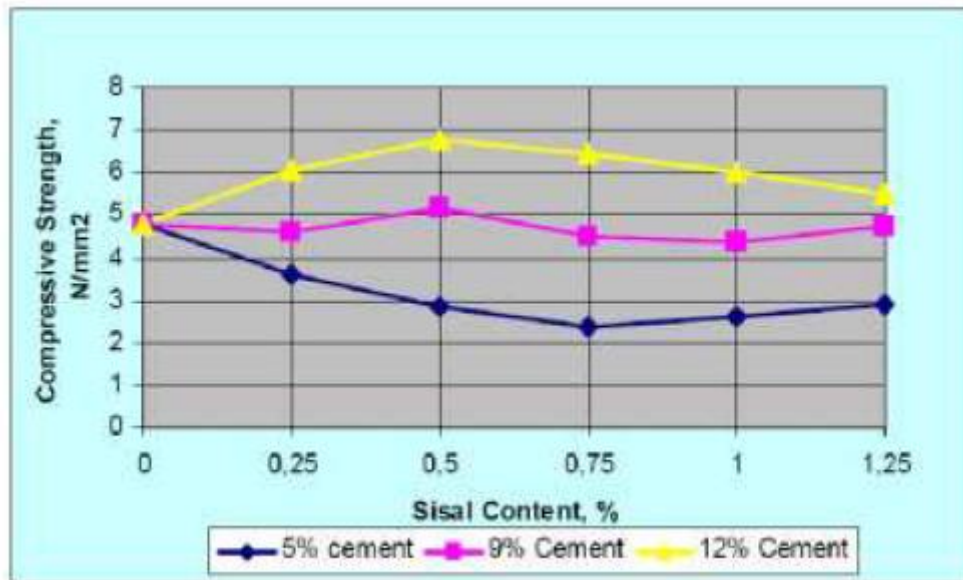


Figure 34. Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal. (Namango,2006) [10]

Rigassi a cité dans son manuel de production des blocs de terre comprimée, que l'introduction des fibres dans le matériau terre est un moyen de création d'un réseau de fibres omnidirectionnel, ce qui traduit par l'amélioration de la résistance à la traction et au cisaillement et contribue aussi à réduire le retrait. Mais sans donner d'arguments, déclare que les fibres végétales sont incompatibles avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique (Rigassi,1995) [11].

Khedari et al. ont soumis à l'étude des briques à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco. Les résultats montrent une légère diminution de la résistance à la compression (Figure 36). Les auteurs ont justifié cette baisse de résistance par l'effet des dimensions, des conditions de surface et le nombre de fibres présent dans un volume donné. Donc l'augmentation de la teneur en fibres de coco conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, d'où une réduction de la résistance à la compression (Khedari,2005) [9].

Olivier et El Gharbi ont effectué une étude sur les blocs de terre stabilisés avec des fibres de sisal, à travers cette étude, ils ont affirmé que le point faible est l'interface entre mortier de terre et les blocs de terre. Les auteurs ont tenté d'améliorer cette interface en renforçant bien les blocs de terre comprimés par des fibres de sisal comme le mortier de terre. Ils ont aussi évalué l'avantage de l'utilisation du sisal (Olivier, 1995) [70].

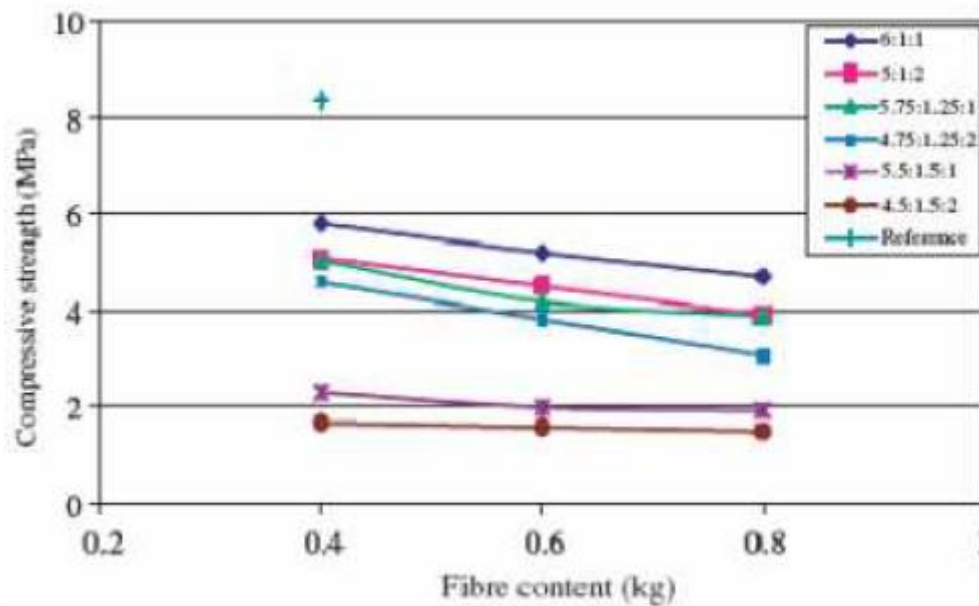


Figure 35. L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression. (Khedari,2005) [9]

Eko et. al. ont étudié le renforcement des sols avec un mélange de ciment et de fibres végétales de bagasse de canne à sucre. Dans leur étude, ils ont utilisé 5 à 10% en poids de ciment et 5 à 15% en volume de fibres de bagasse. Ils ont constaté qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression non confinée à 28 jours avec l'augmentation de la teneur en ciment, jusqu'à un maximum d'environ 5 MPa. Alors qu'une augmentation du volume de fibres est jugée préjudiciable au développement de la résistance (Eko, 2001) [71].

Bouhicha et al. ont employé dans leur recherche différentes teneurs et longueurs en paille d'orge hachée pour renforcer quatre types différents de sols sans stabilisants chimiques, dans le but d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés des sols. Les résultats des essais ont prouvé les effets positifs de l'ajout de paille à réduire le retrait (Figure 36) et à améliorer la résistance à la compression (Figure 37), si une teneur optimale du renfort est utilisée. Les résistances à la flexion (Figure 38) et au cisaillement ont également augmenté pour les échantillons fibrés (Bouhicha,2005) [59].

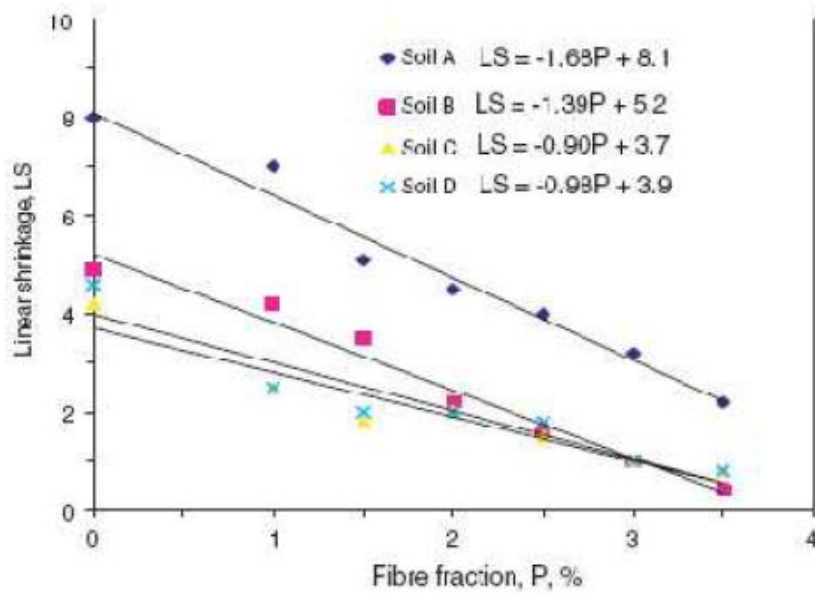


Figure 36. Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée. (Bouhicha,2005) [59]

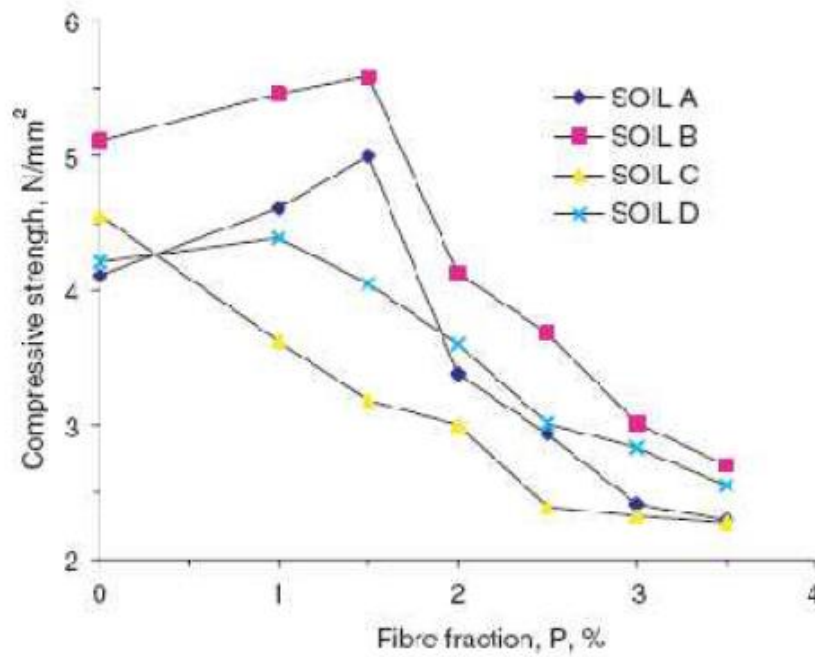


Figure 37. Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée. (Bouhicha,2005) [59]

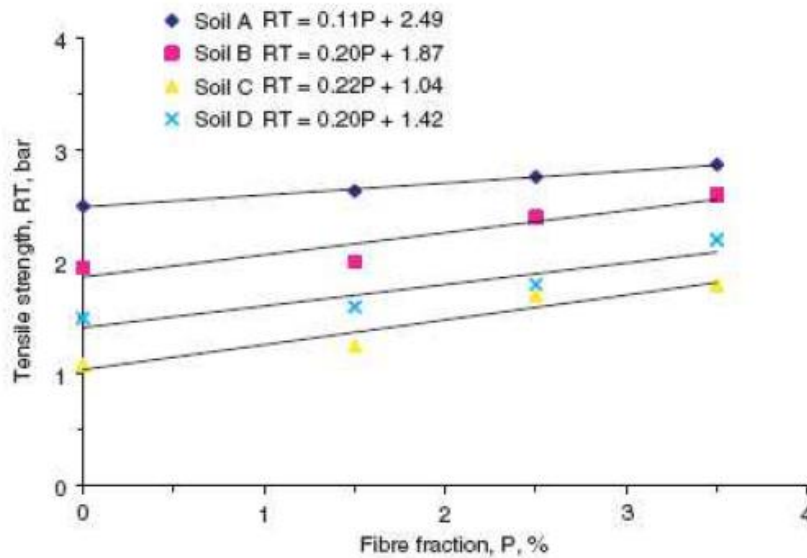


Figure 38. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée (Bouhicha,2005) [59].

Il faut signaler qu'il y a des études réalisées sur les blocs de terre comprimée renforcées par des fibres synthétiques et artificielles, à titre d'exemple, l'étude menée par Eko et al. (Eko,2012) [71]. Dans cette étude, ils ont utilisé un sol latéritique stabilisé par 6% en ciment et renforcé par trois teneurs en fibres : 1.7% ,2% et 2.7% et trois longueurs : 20 mm, 35 mm et 50 mm. Ils ont remarqué que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à un pic, ou on observe une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres (Figure 39).

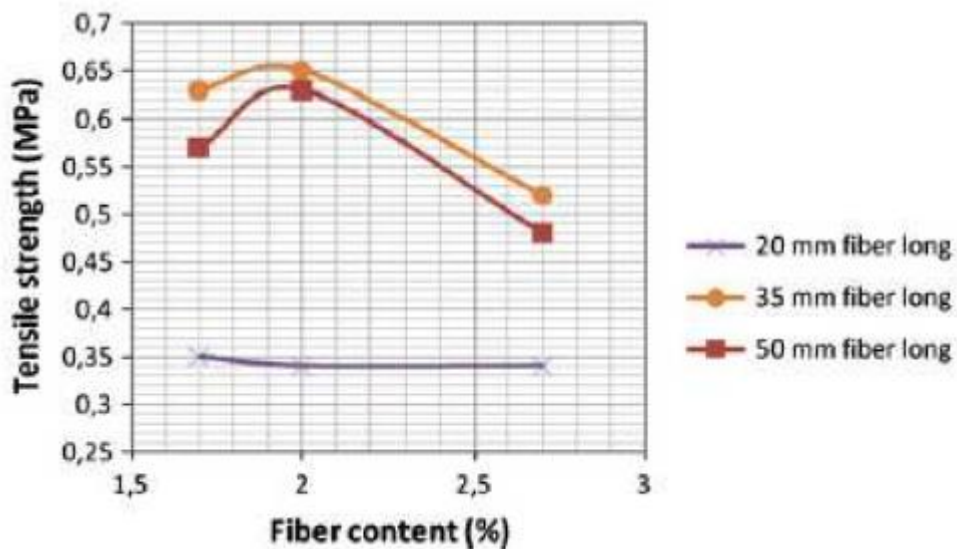


Figure 39. Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment. (Eko,2012) [71]

Dans le cadre d'une étude d'élaboration d'un essai de traction directe sur le BTC avec des fibres naturelles, Mesbah et al. affirment que l'avantage d'utilisation des fibres naturelles comme renfort dans le bloc de terre comprimée comprennent à la fois l'amélioration de la ductilité en traction (figure 40) comparativement à un bloc sans renfort et l'inhibition de la propagation des fissures de traction après sa formation initiale. D'après les auteurs, il semble que les fibres n'ont pas d'effet sensible sur le comportement du matériau avant sa fissuration (Mesbah,2004) [7].

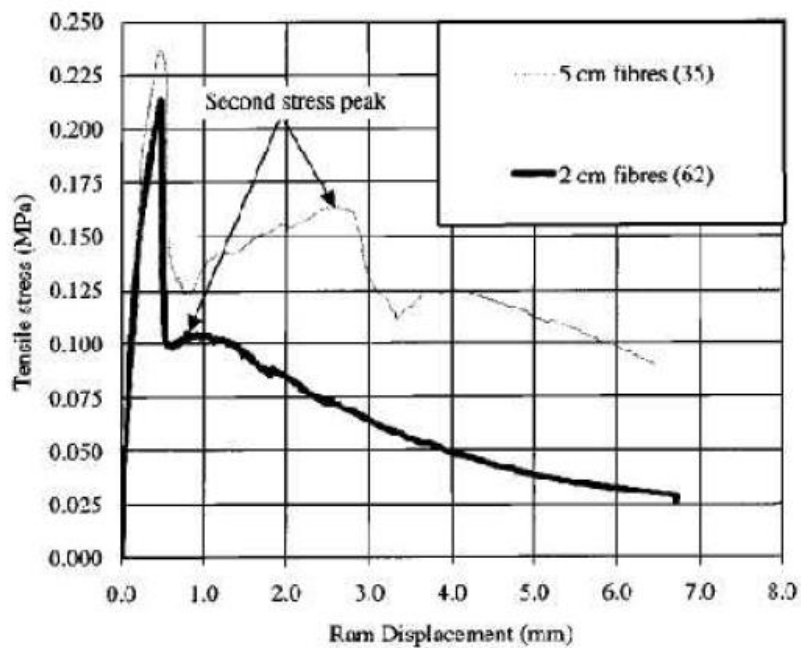


Figure 40. Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles. (Mesbah,2004) [7]

X.2. Effet des fibres sur les propriétés thermiques

Vu que l'étude des propriétés thermiques des BTC fibrées ne présente pas notre centre d'intérêt dans cette thèse, on va limiter notre recherche bibliographique sur la conductivité thermique.

Khedari et al. ont constaté que la conductivité thermique des briques à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et cette diminution a atteint un taux important qui est de l'ordre de 50 % (figure 41) (Khedari,2005) [9].

Millogo et al. ont constaté aussi, dans le cadre de l'étude présentée auparavant, que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des teneurs et des longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus (Figure 42) (Millogo,2014) [31].

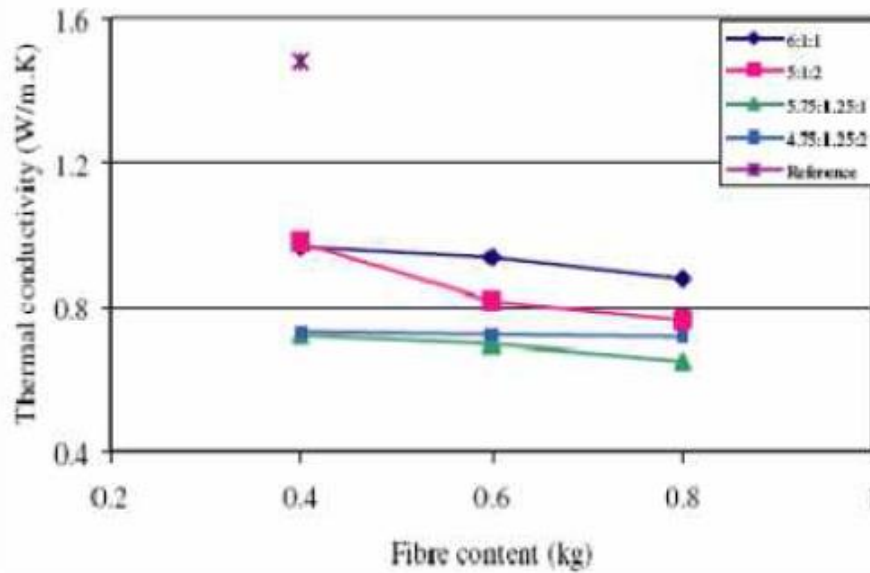


Figure 41. L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique. (Khedari,2005) [9]

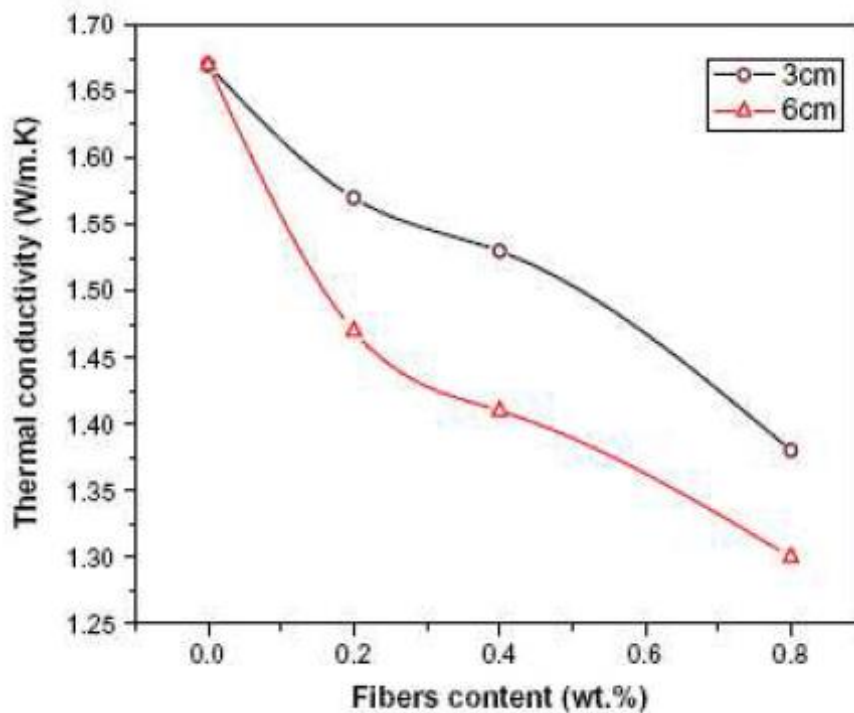


Figure 42. L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc de terre comprimée. (Millogo,2014) [31]

XI. Conclusion

Le présent chapitre a mis l'accent sur l'emploi des fibres d'une manière générale et les fibres naturelles en particulier comme renfort dans le matériau terre, que ce soit comme terrain de fondation ou comme matériau de construction. Dans cette étude, l'intérêt est porté sur la stabilisation des blocs de terre comprimée (BTC) par les fibres végétales.

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux) comme stabilisants améliore la résistance mécanique et thermique des BTC. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Il y a des recherches qui n'ont pas recommandé l'utilisation des fibres végétales dans la fabrication du BTC à cause de son incompatibilité avec le mode de compactage des BTC, alors que d'autres reconnaissent les fibres végétales comme une importante catégorie de stabilisants des BTC. Donc la synthèse sur les travaux antérieurs a mis en évidence les besoins d'expérimentation sur l'effet de l'introduction des fibres, et en particulier les fibres végétales, sur les propriétés mécaniques et thermiques du bloc de terre comprimée. C'est dans ce cadre que l'étude a été élaborée dans cette thèse.

Chapitre 2 :

Transfert thermique et méthodes de mesure de la conductivité thermique

Chapitre 2. Transfert thermique et méthodes de mesure de la conductivité thermique

I. Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace dans le temps). L'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont la température et la chaleur. La température caractérise l'état d'un corps ; la chaleur exprime un échange énergie.

Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes, il y a systématiquement transfert de chaleur toujours du corps "chaud" vers le corps "froid" . C'est une conséquence directe du deuxième principe de la thermodynamique. [72]

II. Transfert thermique

Lors d'un contact thermique entre deux corps de température différente, la température s'équilibre spontanément entre les deux corps. On observe donc un transfert d'énergie sous forme de chaleur du corps chaud vers le corps froid.

III. Modes de transfert de chaleur

Les Lois régissant les trois modes de Transfert :

Les trois modes de transfert de chaleur sont régis par trois lois de transport. Ainsi :

- 1-La conduction est régie par la loi de Fourier
- 2- La convection est régie par la loi de Newton
- 3- Le rayonnement est régi par la loi de Stefan-Boltzmann. [73]

III.1. Conduction

C'est le mode de transfert qui apparaît toujours dans un fluide ou un solide dès qu'il y a un gradient de température. Il s'agit d'un transfert thermique de proche en proche par chocs microscopiques entre particules d'énergie différente, les particules les plus énergétiques transmettant de l'énergie cinétique à celles qui en ont moins.

D'un point de vue phénoménologique elle est décrite par la loi de Fourier (Figure 43) [72,73]

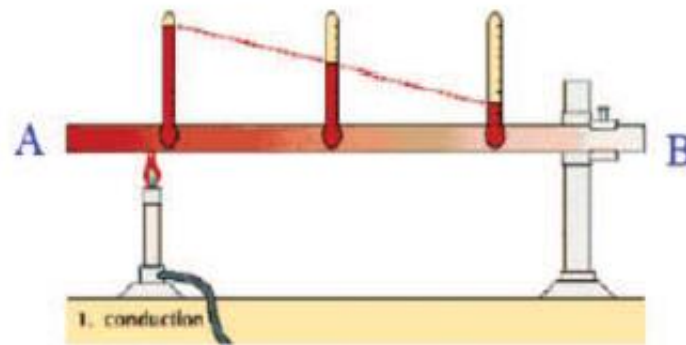


Figure 43. Transfert de chaleur par conduction [72].

III.2. Convection

La convection est un mode de transfert d'énergie qui implique un déplacement de matière dans le milieu, par opposition à la conduction thermique (diffusion de la matière). La matière est advectée (transportée-conduite) par au moins un fluide. (Figure 44).

Ainsi durant la cuisson des pâtes, l'eau se met en mouvement spontanément : les groupes de particules de fluide proches du fond de la casserole sont chauffés, se dilatent donc deviennent moins denses et montent ; ceux de la surface de la casserole sont refroidis par le contact de la surface avec un milieu moins chaud, se contractent donc gagnent en densité et plongent. Le transfert thermique est alors plus efficace que dans le cas de la conduction thermique. [73,74]

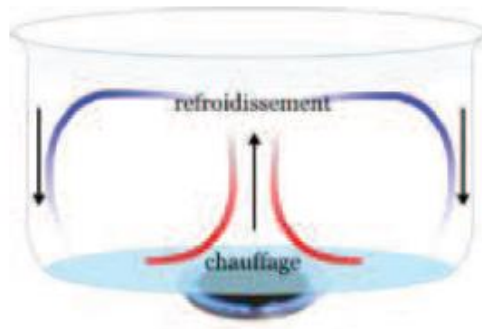


Figure 44. Transfert de chaleur par convection [72].

III.3. Rayonnement

Les transferts thermiques par rayonnement diffèrent des autres transferts par le fait qu'ils ne nécessitent pas de support matériel pour se propager contrairement à la conduction (support solide) ou à la Convection (support liquide ou gazeux).

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu contient et émet en permanence de l'énergie sous forme de rayonnement.

Le corps (1) chaud émet des radiations vers le corps plus froid et le réchauffe. (Figure 45). [72]

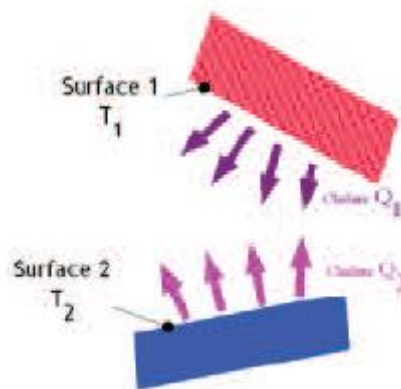


Figure 45. Transfert de chaleur rayonnement [72].

IV. Définitions

IV.1. Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire. [72]

IV.2. Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme.

La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\vec{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7)$$

Avec :

\vec{n} : Vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

IV.3. La chaleur

Forme d'énergie correspondant à l'agitation aléatoire des molécules de la matière, lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, la température de ce dernier augmente. Dans le cas d'un changement de phase, une partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, etc. ...). [72,73]

IV.4. Flux de chaleur [25.26]

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (8) \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$$

Où S : est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (9) \text{ (W)}$$

IV.5. La température

C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. On dit aussi que la température est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps par la relation [73,74] :

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot K \cdot T \quad (10) \text{ (T)}$$

IV.6. La conservation de la chaleur

Une fois que l'énergie a été transformée en chaleur, cette dernière se "conserve" lors des différents transferts qu'elle subit. [73,74]

$$Q + \Delta Q = Q' \quad (11)$$

IV.7. La Résistance Thermique (R)

La résistance thermique représente la résistance de l'élément à la transmission de chaleur à travers son épaisseur, elle est généralement connue sous le terme de « isolation thermique ». L'augmentation de la résistance thermique implique que l'élément est isolant. Elle s'exprime en m².K.W⁻¹. [73,74]

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (12)$$

Où :

e : l'épaisseur de l'élément

λ : la conductivité de l'élément.

IV.8. Le Coefficient de Transmission Calorifique (U)

Le coefficient de transmission calorifique U caractérise les déperditions thermiques d'un matériau ou d'une paroi. C'est l' inverse de la résistance thermique (R). Plus U est

faible, plus la paroi est isolante. Est exprimé en watt par mètre carré degré Celsius $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ ou kelvin $W.m^{-2}.K^{-1}$. [73,74]

$$U = \frac{1}{R} \quad (13)$$

IV.9. La Conductivité Thermique

La conductivité thermique (constante de proportionnalité) « λ » indique la résistance d'un corps oppose au flux de chaleur. Elle est toujours positive et Elle correspond à la densité du flux thermique traversant, en régime stationnaire, un corps homogène soumis à un gradient de température de 1 Kelvin (ou $1^{\circ}C$) par mètre (Figure 47). Elle s'exprime dans le système international par $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$; ou $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ou par $J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$. [73,74] La conductivité dépend essentiellement de : La nature du matériau, et la température.

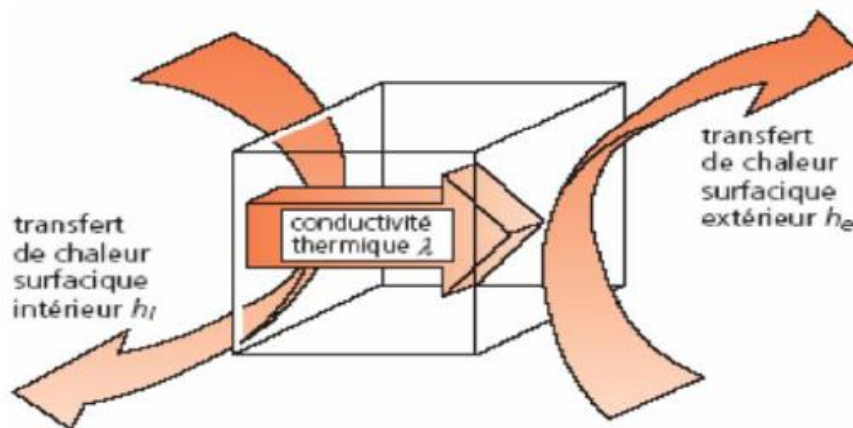


Figure 46. Représentation de flux thermique [72].

L'inverse de la conductivité thermique ($1/\lambda$) est nommé la résistivité thermique, elle représente le paramètre qui décrit la résistance des matériaux et les espaces d'air pour le transfert de chaleur.

La conductivité thermique est aussi obtenue par une formule empirique qui dépend de la vitesse de propagation de son, la densité sèche et la porosité. La formule s'établit comme suite :

$$\lambda = \alpha_0 + \alpha_1 . V + \alpha_2 . \rho + \alpha_3 . \eta \quad (14)$$

Avec :

V : vitesse de propagation de son

ρ : la densité sèche

η : la porosité

$\alpha_0 = 0,64$; $\alpha_1 = 0,371$; $\alpha_2 = 0,209$; $\alpha_3 = - 2,82$;

Tableau 3. Conductivité thermique de quelques matériaux [73].

Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)	Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)
Ciment portland	0,29	Caoutchouc	0,16
Béton	1,7	Eau	0,6
Air	0,025	Verre	1,1
Bois	0,04 – 0,4	Brique plein	1,16
Alcool, huile	0,1 – 0,21	Liège	0,046
Sol	1,5	Polystyrène	0,209
		Mercure	8,47

IV.10. La Chaleur Spécifique

La Relation Fondamentale :

$$\Delta Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (15)$$

Exprime que, si un corps de masse m stocke ΔQ (j), sa température s'élèvera de ΔT .

C_p , la chaleur spécifique (en J/ (kg K)) est une propriété physique des matériaux et elle dépend généralement de la température. Elle caractérise sa capacité à emmagasiner de la chaleur. La chaleur spécifique d'une substance est fonction de sa structure moléculaire et de sa phase. [73,74]

IV.11. L'inertie Thermique

Est la capacité d'un matériau à stocker l'énergie, traduite par sa capacité thermique. Plus l'inertie est élevée et plus le matériau restitue des quantités importantes de chaleur (ou de fraîcheur), en décalage par rapport aux variations thermiques extérieures (le matériau mettant plus de temps à s'échauffer ou à se refroidir). En général plus un matériau est lourd et plus il a d'inertie.

L'inertie thermique est utilisée en construction pour atténuer les variations de température extérieure, et permet de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante l'intérieur. Elle n'est à toutefois pas toujours adaptée aux locaux occupés et chauffés de manière intermittente.

Pour bien utiliser l'inertie d'un bâtiment, il faut considérer la vitesse de réponse des matériaux pour transmettre une variation de température, traduite par la diffusivité thermique. En effet, l'inertie permet de tempérer les amplitudes journalières de températures intérieures face aux variations de températures extérieures, ce qui est générateur de confort et d'économie pour les locaux chauffés en permanence. [73]

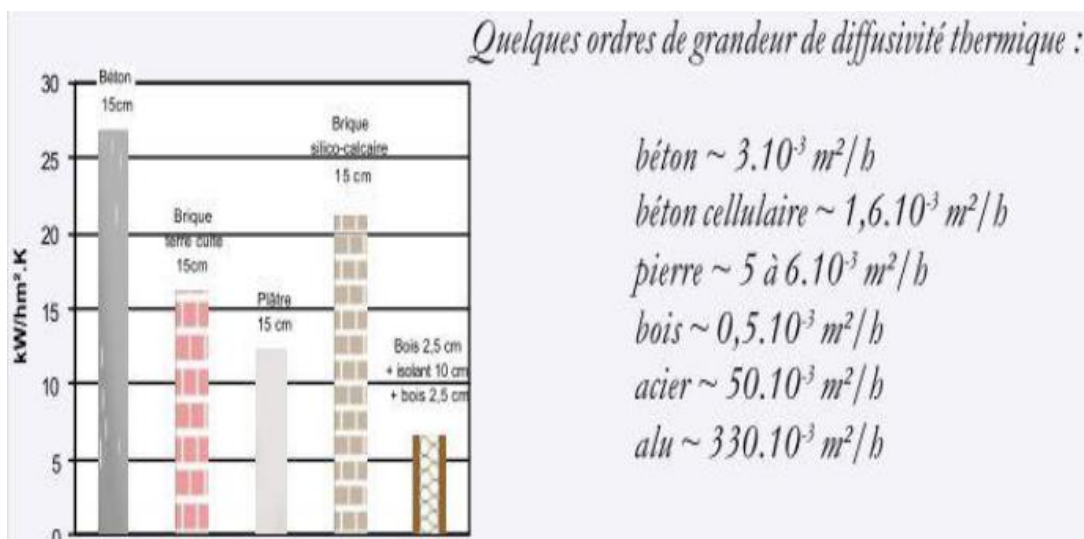


Figure 47. Quelques ordres de grandeur de diffusivité thermique [74].

IV.12. L'effusivité thermique

Caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Plus elle est grande et plus le matériau absorbe rapidement les apports de chaleur (internes ou solaires) sans que la température du local s'élève notablement.

Dans un climat tempéré à froid, les revêtements à effusivité faible sont plus appréciés (bois par exemple).

C'est l'inverse dans un climat chaud, où les revêtements à effusivité forte sont préférés. [74]

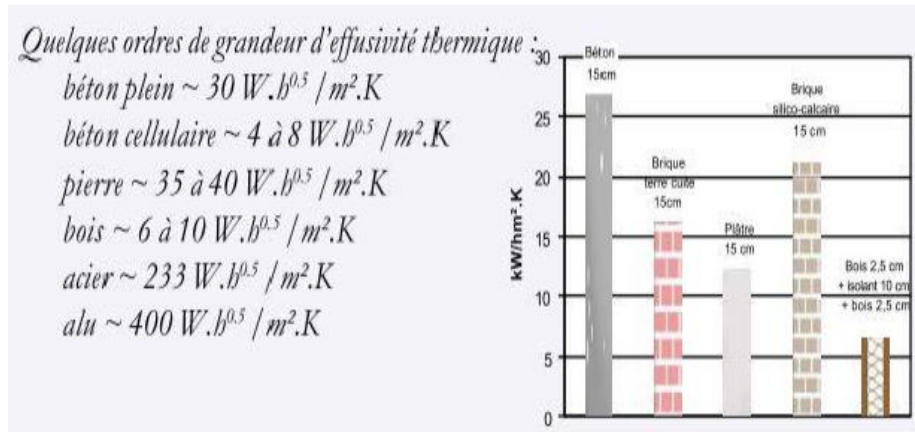


Figure 48. Quelques ordres de grandeur d'effusivité thermique [74]

IV.13. La chaleur latente de changement d'état

La chaleur latente spécifique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour entraîner le changement de phase d'une unité de masse de la substance. L'unité de la chaleur latente spécifique est le J/kg. La chaleur latente de fusion est la quantité d'énergie thermique dégagée par 1 kg de substance solide sans qu'il y ait de changement de température. La chaleur latente de vaporisation est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour transformer à l'état de vapeur 1 kg d'une substance sans qu'il y ait changement de température. [73,74]

V. Méthodes de mesures de la conductivité thermique

Des avancées importantes sont apparues récemment dans le domaine des techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique. Pour accéder à cette mesure, il est généralement nécessaire de recourir à des techniques d'excitation, fondées sur la méthodologie suivante. Une des faces (parfois tout l'échantillon) de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière.

Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte :

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.

- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.

Ce paragraphe souligne certaines méthodes dédiées à la mesure de la conductivité thermique d'un milieu. Afin de classer les méthodes de mesures, les définitions de l'excitation et le temps temporel s'imposent. Ces derniers paramètres nous permettent de distinguer les méthodes entre elles. En première analyse, l'excitation repose sur deux méthodes : Les méthodes photo thermiques et les méthodes électrothermiques.

Une deuxième distinction entre différentes méthodes s'appuie sur la définition du régime thermique temporel du milieu. Ainsi nous pouvons faire référence à deux classes :

Les mesures stationnaires, et instationnaires. [73,74]

V.1. Les méthodes en régime stationnaire

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu. Le champ d'application de ces méthodes est limité. Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude gardée [72], la méthode de la barre. La méthode des boîtes. Et la méthode du flux radial. D'une façon générale, ces méthodes de mesure présentent des difficultés expérimentales tel que :

- L'existence de résistance de contact.
- Les fuites axiales et radiales.
- Les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface.

Ces méthodes de mesure ne sont pas destinées à mesurer toutes les grandeurs physiques.

En effet, avec ces méthodes seule la conductivité thermique et la résistance de contact sont mesurées, limitant ainsi leurs champs d'application.

V.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la Figure 49. Dans la méthode de la plaque chaude gardée, on utilise une garde active pour minimiser les pertes latérales aux extrémités de l'échantillon (conditions aux limites). Le transfert est unidirectionnel et est assuré par un enroulement résistif. A l'aide de thermocouples disposés de part et d'autre de l'échantillon étudié, la température est ainsi mesurée [73,74].

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que :

$$T1 - T2 = R \cdot \phi \quad \text{et} \quad R = \frac{e}{\lambda \cdot S} \quad (16)$$

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants.

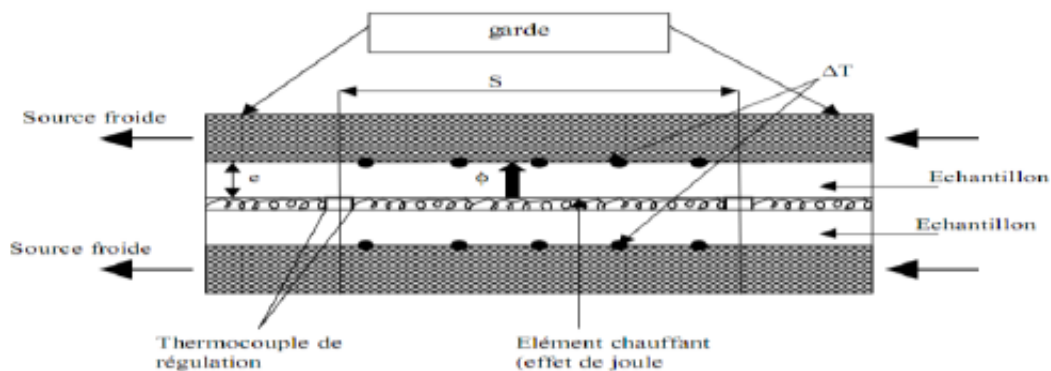


Figure 49. Principe de la plaque chaude gardée [72]

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres. La Figure 50. Montre en exemple des mesures du flux traversant l'échantillon donné par la moyenne du flux entrant et sortant.

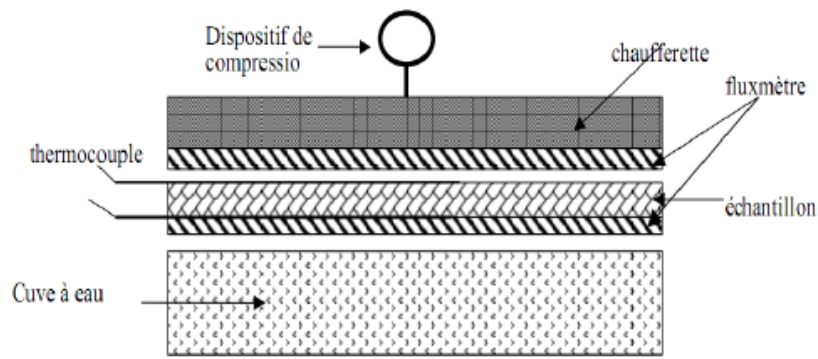


Figure 50. Mini-plaque chaude avec fluxmètres [72]

V.1.2. État stationnaire

Le principe de la détermination de la conductivité thermique d'un matériau repose sur le lien entre le flux de chaleur qui traverse ce matériau et le gradient de température qu'il génère. Il est illustré sur la Figure 51.

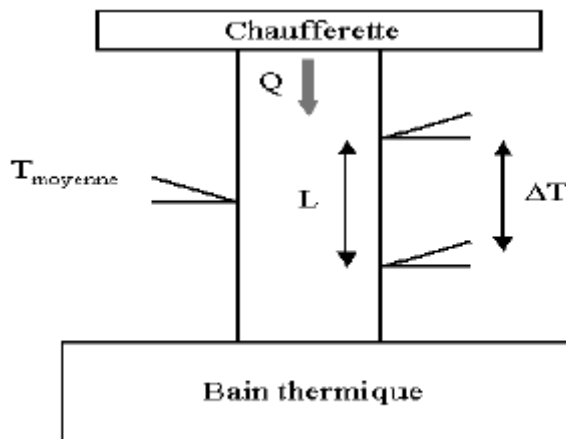


Figure 51. Principe de mesure par la méthode d'état stationnaire [72]

L'une des extrémités de l'échantillon de section A est fixée à un doigt froid (bain thermique) dont le rôle est d'évacuer le flux thermique traversant l'échantillon, et l'extrémité opposée à une chaufferette dissipant dans l'échantillon une puissance électrique (Q) obtenue par effet Joule, de manière à produire un gradient thermique suivant la longueur de l'échantillon. Des thermocouples séparés par une distance (L) mesurent la différence de température (dT) le long de l'échantillon. Un troisième thermocouple, calibré, est également fixé à l'échantillon pour déterminer sa température moyenne (la température de mesure). La conductivité thermique est alors donnée par :

$$\lambda = \frac{Q.L}{A.dT} \quad (17)$$

Si (dT) n' est pas trop important (de l'ordre de 1 °C), la conductivité thermique mesurée est celle correspondant à la température moyenne mesurée par le troisième thermocouple. Le principe de la mesure repose alors sur l' hypothèse que la totalité du flux de chaleur passe par l'échantillon. La précision de la mesure dépend donc de la capacité à éliminer les pertes thermiques, que ce soit par conduction thermique par les fils, convection par le gaz résiduel, radiation par les surfaces de l'échantillon ou pertes dans la chaufferette : la mesure s'effectue donc dans des conditions adiabatiques. Pour assurer la meilleure précision possible, l'échantillon dont on souhaite mesurer la conductivité thermique est donc placé dans une chambre de mesure sous vide (pour minimiser la convection). Cette chambre est elle-même enveloppée dans plusieurs boucliers thermiques dont la température est régulée (afin de minimiser les effets radiatifs). Enfin, les fils des thermocouples sont choisis de manière à conduire le moins possible la chaleur. [73,74]

Etant donné qu'il est d'autant plus difficile de minimiser les pertes thermiques que la température augmente, cette technique ne permet la mesure de la conductivité thermique qu'à des températures inférieures à la température ambiante (de 2 kelvins à 200 kelvins sans difficultés, et jusqu'à 300 kelvins (27 °C) pour les meilleurs appareils de mesure). [73,74]

V.1.3. Méthode dite « Laser Flash »

Pour les températures supérieures à la température ambiante, il devient de plus en plus difficile d'éliminer ou de tenir compte des pertes thermiques par radiation (conditions adiabatiques), et l'utilisation de la technique à l'état stationnaire présentée ci-dessus n'est pas recommandée. Une solution est de mesurer la diffusivité thermique en lieu et place de la conductivité thermique. Ces deux grandeurs sont en effet liées par la relation : [72,73,74]

$$\lambda(T) = \alpha(T).d(T).Cp(T) \quad (18)$$

Où

- $\lambda(T)$ est la conductivité thermique en $W.cm^{-1}.K^{-1}$
- $\alpha(T)$ est la diffusivité thermique en $cm^2.s^{-1}$
- $d(T)$ est la masse spécifique en $g.cm^{-3}$
- $Cp(T)$ est la chaleur spécifique en $J.g^{-1}.K^{-1}$

Si l'on suppose que la masse spécifique ne varie pas avec la température, il suffit de mesurer la diffusivité thermique et la chaleur spécifique pour obtenir une mesure de la conductivité thermique à haute température.

La Figure 52 suivante schématise l'appareillage utilisé pour la mesure de conductivité thermique par la méthode dite « laser flash » :

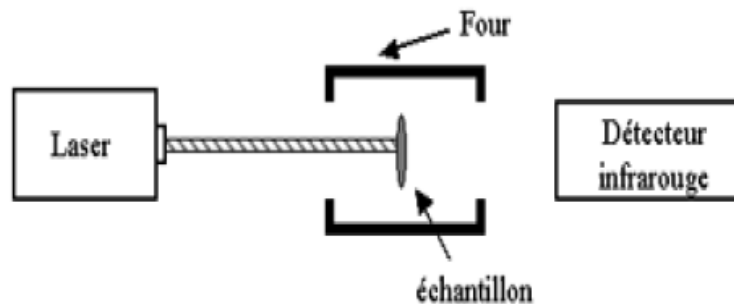


Figure 52. Principe de méthode laser flash [72]

Un échantillon cylindrique dont l'épaisseur (d) est nettement plus faible que son diamètre est placé dans un porte-échantillon qui se trouve à l'intérieur d'un four maintenu à température constante. Une de ses faces est illuminée par des pulses (de l'ordre de la milliseconde) émis par un laser, ce qui assure un chauffage uniforme de la face avant. La température de la face arrière est mesurée, en fonction du temps, à l'aide d'un capteur de mesure infrarouge. En l'absence de pertes thermiques de l'échantillon, la température devrait augmenter de manière monotone. Dans une situation réelle, l'enregistreur mesurera un pic de température suivi d'un retour à la température du four. Le temps (t) nécessaire pour que la face arrière atteigne la moitié de la température de pic (par rapport à la température du four), permet de déterminer la diffusivité thermique suivant : [73,74]

$$\alpha = \frac{1,7d^2}{t\pi^2} \quad (19)$$

Il est alors possible de calculer la conductivité thermique grâce à la masse spécifique et la chaleur spécifique.

La difficulté de cette technique réside dans le choix des paramètres de mesure optimums (puissance du laser et épaisseur de l'échantillon).

V.1.4. La méthode du fil chaud

Dans les années 30, B. Stalhane et S. Pyk développent une méthode de mesure de conductivité thermique dite du fil chaud qui permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. [73,74]

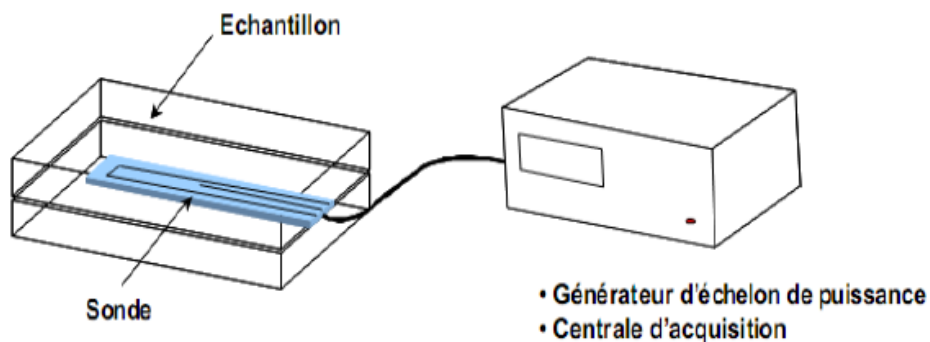


Figure 53. Principe de mesure à l'aide d'un fil chaud [72].

La conductivité s'obtient par la résolution de l'équation de la chaleur en géométrie cylindrique infinie.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \text{ Avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (20)$$

V.1.5. Technique de fil chaud par CT-mètre

Le ct-mètre a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux homogènes et isotropes.

Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température

induite dans le matériau à tester, et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite. [75]



Figure 54. Appareil CT-mètre. [75]

VI. Conclusion

L'étude menée dans ce chapitre vise à exposer :

- Des généralités et le principe de calcul de transfert thermique (comme la conductivité, la résistance ... etc.) d'un mur ou d'une paroi opaque.
- Les méthodes pratiques de mesurer de la conductivité thermique par plusieurs méthodes. La méthode dite « in stationnaire » est la méthode le plus simple est le plus adapté. Dans notre étude nous avons utilisées le CT-mètre pour obtenir les caractéristiques thermiques des différents types de briques.

Chapitre 3 :

Caractérisation des Matériaux utilisés

Chapitre 3. Caractérisation des Matériaux utilisés

I. Introduction

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des blocs de terre comprimée exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques, thermiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des BTC en fonction de leur utilisation.

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des propriétés mécaniques et thermiques des BTC.

II. Matériaux utilisés

II.1. Sol

Le Sol utilisé est extrait d'une carrière située à Bounaga, (province de Rehamna dans la région de Marrakech) (Figure 55) avec les coordonnées GPS suivant : $31^{\circ}59'08.3''N7^{\circ}57'37.0''W$.



Figure 55. Situation de la carrière.

Nous avons effectué les essais suivants sur le sol :

- Analyse granulométrique,
- Densité sèche,
- Bleu de méthylène,
- Limite d'Atterberg,
- Analyse chimique.

Ces essais sont réalisés au Centre de Recherche Forestière (CRF), laboratoire d'Etudes, d'Essais et de Contrôle (LABO CONTROL) et à la faculté des Sciences de RABAT.

II.1.1. Analyse granulométrique (norme NFP94-056 et NF P 94-057)

Déterminer les proportions des particules solides de différentes tailles qui constituent le sol.

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont ils sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

La sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80 μ m. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.

La courbe granulométrique du sol utilisée est représentée sur la Figure 56 avec la courbe idéale et le fuseau limite.

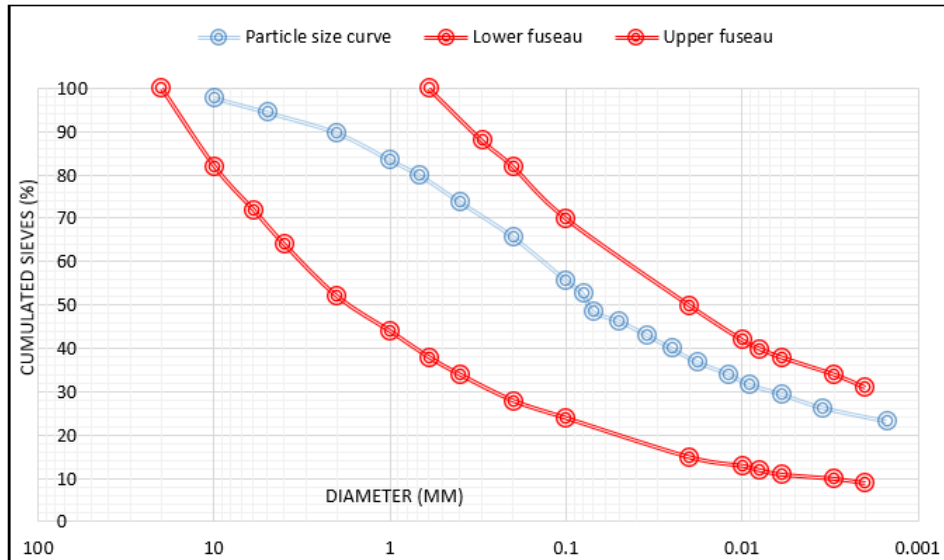


Figure 56. Courbe granulométrique du sol étudié.

Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation montrent que notre sol est constitué environ de :

- 21,59% d'argile
- 9,62% de limon
- 57,20% de sable fin.
- 11,59% de gravier

D'après ces résultats on peut conclure que la terre étudiée inscrite dans le fuseau granulométrique pour la formulation des BTC préconisé par la norme CRATERre. Houben H. et Guillaud H [5]

II.1.2. Limite d'Atterberg (Norme NF P 94-051)

L'essai destiné à la détermination des deux limites (limite de liquidité et limite de plasticité), les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et caractériser son état au moyen de son indice.

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) : est la teneur en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

- WL : limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- WP : limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

- IP : indice de plasticité : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique (voir Figure 58).

$$IP = WL - WP \quad (21)$$

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

Atterberg (1973) classifie la plasticité des argiles en trois niveaux comme montrés dans le Tableau 6.

Tableau 4. Classification des argiles selon Atterberg.

IP (%)	< 7	7 à 17	> 17
Plasticité	Faible	Moyenne	Elevée



Figure 57. Réalisation de l'essai de limite de liquidité.

Les résultats obtenus des limites d'Atterberg sont :

- WL = 26,9 %
- WP = 13,2 %
- IP = 13,7 %

D'après Atterberg, on peut classer notre argile par son indice de plasticité (IP = 13,7 %) la nature de l'argile est une argile.

On remarque que les deux sols se situent dans la zone limite de liquidité ($25 < WL < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($2.5 < IP < 29$) selon la norme **XP P 13-901**. Le graphique

(Figure 58) permet d'affirmer que les sols présentent une plasticité tout à fait adaptée à la production des BTC.

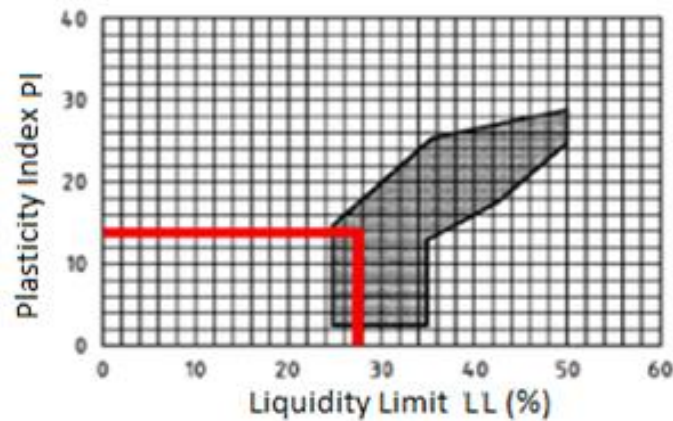


Figure 58. Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).

II.1.3. Les masses volumiques

Le Tableau 7 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau 5. Les masses volumiques du sol.

ρ_s (Kg m ⁻³)	ρ_0 (Kg m ⁻³)
2422	1027

II.1.4. Bleu de méthylène

Selon la norme (NF EN 933-9), cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à absorber de bleu de méthylène tant absorbé préférentiellement par l'argile, les matières organiques et les hydroxydes de fer cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle « valeur de bleu » des fines, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène, elle est donnée par la formule suivante : (La valeur du bleu du sol est (sans unité))

$$VBS = V.m \quad (22)$$

Avec :

V : Volume de bleu ajouté en cm³,

m : la masse de l'échantillon en gramme,

On distingue les valeurs suivantes,

- $VBS \leq 0,2$: sols sableux (sol insensible à l'eau).
- $0,2 < VBS \leq 2,5$: sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau).
- $2,5 < VBS \leq 6$: sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne).
- $6 < VBS \leq 8$: sols argileux.
- $VBS > 8$: sols très argileux.



Figure 59. Essai de mesure de Bleu de méthylène.

Le VBS du l'argile utilisé est égale 6,3 ; donc un sol argileux.

II.1.5. Matière organique

Les sols peuvent contenir des matières organiques (micro-organisme, humus,...), certains acides humiques sont néfastes en cas de stabilisation, car ils retardent ou annulent la prise des liants hydrauliques. La constitution des matières organiques n'étant pas compressible, elles sont à éviter en trop forte quantité car cela réduirait notablement la compressibilité du sol, même non stabilisé.

En règle générale, tant que des connaissances plus sûres n'auront pas été acquises, il a été admis de ne pas utiliser de terre contenant plus que 2 % de matières organiques et considéré comme risquée l'utilisation d'une terre contenant 1 % de matières organiques (Doat, 1979) [12]. Un autre seuil est proposé par Vénuat (Vénuat, 1980) [76]: « fixant faute de mieux à 2 % la limite à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol ». Cette limite correspond à une teneur en matières organiques totale. Kujala (Kujala, 1996) [77] propose un

seuil en humus de l'ordre de 2 % pour des retards de prise et de 3,5 % pour une inhibition. Tremblay (Tremblay, 1998) [78] indique comme limite de stabilisation une teneur de 3 % en matières organiques.

L'analyse de notre sol à révéler la présence d'un taux de % en matières organiques, ce taux ne dépasse pas 2 %, qui représentent la limite recommandée par Doat (Doat, 1979) et Vénuat (Vénuat, 1980) [12,79].

II.1.6. 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 de 7,3. D'après Vilenkina (Vilenkina, 1956 ; cité par Guettala, 2003) [80,] pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6 un pré - traitement du sol est indispensable.



Figure 60. Essai de mesure de pH.

II.1.7. Analyse chimique et minéralogique des sols

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire de la faculté des Sciences de Rabat.

L'analyse par la fluorescence X permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent l'échantillon de la terre.

Le Tableau 8 présente les résultats de l'analyse chimique élémentaire du sol.

Tableau 6. Analyse chimique des sols.

Composition chimique (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Perte au feu	TiO ₂
24,7	5,95	1,66	38	0,76	18,99	0,65	0,39	0,04	20,41	0,35

Le Tableau 8 montre que le pourcentage de CaO est de près de 38% qui est dû à la présence de la matrice du carbonate, et d'une teneur en SiO₂ de 24,7% qui est due à la concentration de quartz.

La diffraction des rayons X du sol a permis de déterminer la composition minéralogique présentée sur le tableau. La Figure 61 présente le spectre de diffractions des rayons X de l'échantillon. On s'est rendu compte finalement que notre sol contient un taux important de calcite (CaCO₃) et de quartz (SiO₂)

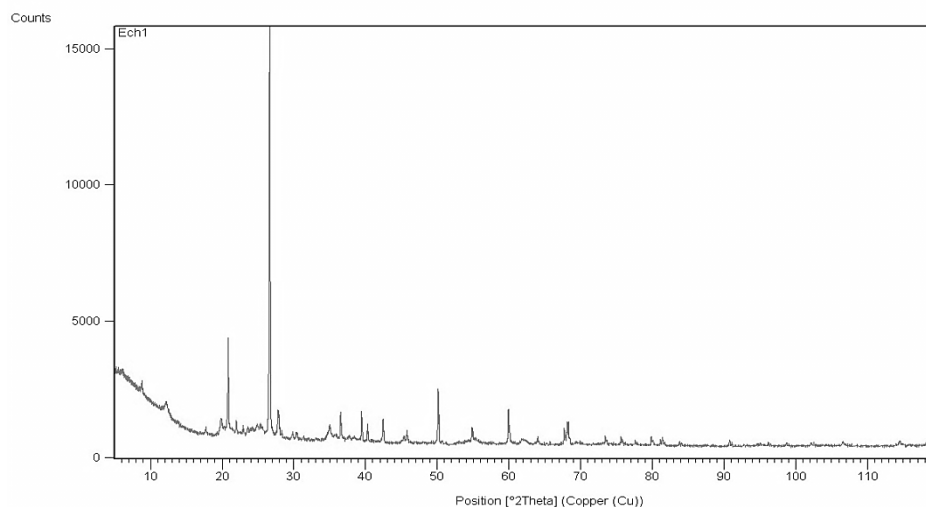


Figure 61. Le diffractogramme de rayons X du sol.

La composition minéralogique estimative (semi quantitative) a été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle figure sur le Tableau 9.

Tableau 7. Analyse minéralogique des sols.

Minéraux	Quartz	Gypse	Calcite	Muscovite	feldspath k	Kaolinite	Minéraux ferrugineux + fond RX
Teneurs (%)	33,8	26,5	27,4	-	3,5	7,8	1

L'analyse d'Infrarouge (IR) permet de déterminer la présence de groupements fonctionnels dans les molécules géniques, et les structures dans certaines molécules simples.

Cette analyse nous a permis d'obtenir les spectres d'Infrarouge du sol (Figure 62). Ces spectres sont fortement dominés par les bandes de vibration $884,33$; $2265,69 \text{ cm}^{-1}$ de la calcite, du quartz $1071,98$; $1131,40 \text{ cm}^{-1}$ et d'une bande de vibration $3586,41 \text{ cm}^{-1}$ de l'eau.

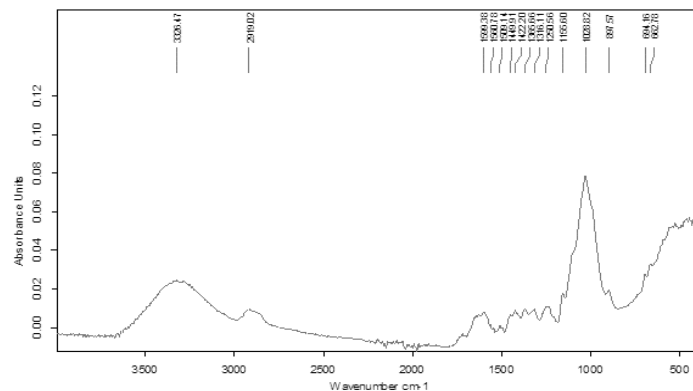


Figure 62. Spectre d'Infrarouge (IR) du sol.

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.

D'après les images du sol obtenues par la microscopie électronique à balayage (Figure 63), on remarque que la calcite est dominante ainsi que le quartz.

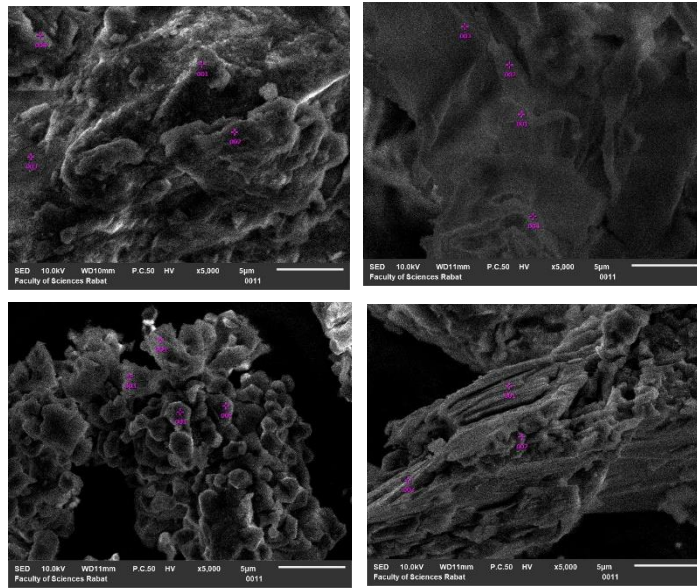


Figure 63. Images MEB prises sur le sol.

II.2. Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé CPJ45 fabriqué à la cimenterie de Marrakech, Sa composition chimique représenté sur le Tableau 10.

Tableau 8. La composition chimique du ciment (%).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl-	K ₂ O	Na ₂ O
22.17	4.53	5.04	64.55	1.02	1.34	0.00	0.42	0.21

II.3. Chaux

Dans cette étude on a utilisé la chaux vive produite par l'unité de chaux de ---- (Maroc). La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de moins 20 %. Houben H. et Guillaud H [5]

La composition chimique de la chaux vive par la fluorescence X est présentée dans le Tableau 11.

Tableau 9. La composition chimique de la chaux vive (%).

OXYDES	CO2	MgO	Al2O3	SiO2	CaO
%	25.57	26.90	0.86	0.71	45.97

II.4. Fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres végétales (les fibres d'Alfa et les fibres d'Agave de sisal)

II.4.1. Les Fibres d'Agave de Sisal

On a utilisé des fibres d'agave de sisal (Figure 64) et (Figure 65). Les fibres de sisal ont également été découpées en morceaux de 2,5 cm de longueur. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées dans le Tableau 12.



Figure 64. Les fibres d'Agave de Sisal après arrachement.



Figure 65. Les fibres d'Agave de Sisal découpées en morceaux.

Tableau 10. Caractérisation des fibres d'Agave de Sisal.

Masse volumique (g/m ³)	1.3-1.45
Charge de rupture à la traction (MPa)	80-840
Déformation à la rupture (%)	1.6-2
Longueur (cm)	2.5 - 5

II.4.2. Les Fibres d'Alfa

On a utilisé aussi des fibres d'Alfa (Figure 66)



Figure 66. Fibres d'alfa.

La fibre d'alfa « Esparto Grass ou bien Stippa Tenacissima plant » est largement cultivée dans la région sèche et aride de l'Afrique du Nord (région méditerranéenne chaude).

L'alfa peut également être trouvée dans les régions centrales et du sud-est de l'Espagne et des Baléares d'islande.

En Maroc, deuxième producteur (Tableau 14), l'alfa est généralement employé dans la production du papier de haute qualité mais aussi utilisée pour la fabrication de cordages, d'espadrilles, de tissus grossiers, tapis, paniers.

Tableau 11. La répartition territoire de la plante Alfa.

Pays	Algérie	Maroc	Tunisie	Libye	Espagne	Portugal
Superficie (ha)	4.000.000	3.186.000	600.000	350.000	300.000	<u>peu</u>

Les caractéristiques physico-chimique et mécanique sont prises à partir d'une étude précédente de [81]

Tableau 12. Propriétés physico-chimiques de la fibre d'Alfa.

Propriétés	<u>T cell</u> (%)	<u>T lig</u> (%)	<u>T hem</u> (%)	<u>T ext</u> (%)	T MM (%)	<u>T abs</u> (%)	T h (%)	Densité
Valeurs	45	29,8	20,94	2,26	2	65,08	10,2	0,92

III. Confection des blocs

✚ Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule selon le modèle de Guettala et al. (Guettala, 2006) [19]. Il est en acier trempé, et il est

composé de 5 éléments formant après montage un volume de 10x10x20 cm³. Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange.

Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la Figure 67.

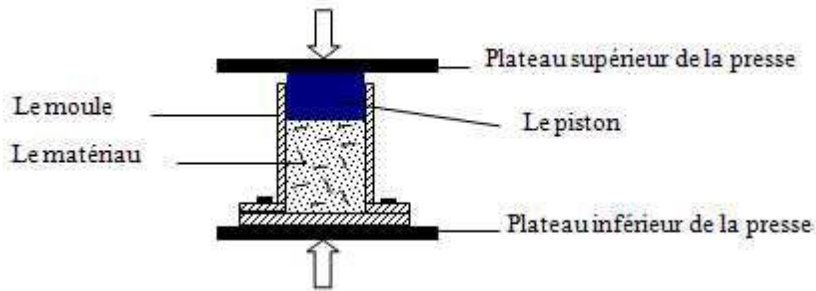


Figure 67. Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC.

III.1. Blocs de terre comprimée et stabilisés en fibre de sisal d'agave et/ou de chaux

Dans notre travail les compositions des blocs de terre stabilisés (sol + ciment + fibre d'alfa) a été faite suivant une composition de référence composition C0F0T100 : 100% Sol + 00% chaux + 00% fibre d'agave de sisal.

Tableau 13. La composition des mélanges employés dans cette étude.

Désignation	Compositions		
	Sol (%)	Chaux (%)	Fibre d'agave de sisal (%)
C0F0T100	100	0	0
C6F0T94	94	6	0
C10F0T90	90	10	0
C14F0T86	86	14	0
C0F1T99	99	0	1
C6F1T93	93	6	1

C10F1T89	89	10	1
C14F1T85	85	14	1
C0F2T98	98	0	2
C6F2T92	92	6	2
C10F2T88	88	10	2
C14F2T84	84	14	2
C0F3T97	97	0	3
C6F3T91	91	6	3
C10F3T87	87	10	3
C14F3T83	83	14	3



Figure 68. Eprouvettes en terre avec des fibres d'agave de sisal.

III.2. Blocs de terre comprimée et stabilisées en fibre d'alfa et/ou de ciment

Nous avons proposé pour notre travail les compositions (sol + fibre d'Alfa + ciment) suivant une composition de référence composition D0 : 100% latérite + 00% Fibre et autres compositions sont consignées dans le Tableau 17.

Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble – moule

+ mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué quatre contraintes de compactage (1 MPa, 2 MPa, 3 MPa et 4 MPa).

Tableau 14. La composition des mélanges employés dans cette étude.

Désignation	Compositions		
	Sol (%)	Ciment (%)	Fibre d'Alfa (%)
D0	100	0	0
D1	95	5	0
D2	93.5	6.5	0
D3	92	8	0
D4	99	0	1
D5	94	5	1
D6	92.5	6.5	1
D7	91	8	1
D8	98	0	2
D9	93	5	2

D10	91.5	6.5	2
D11	90	8	2
D12	97	0	3
D13	92	5	3
D14	90.5	6.5	3
D15	89	8	3

IV. Propriétés mécaniques

IV.1. Introduction

On s'intéresse dans cette partie à la détermination des caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression des BTC à l'état sec par le biais de l'essai de compression simple, et la résistance à la flexion par le biais de l'essai de flexion 3 points. Il faut noter que nous avons chargé nos BTC de 0 à 1,5% de fibres. Pour chaque essai, trois blocs ont été testés. Nous allons entrer autre calculer la masse volumique des éprouvettes à l'état sec en fonction de la teneur en fibre.

Essai de compression simple :

Cet essai est effectué conformément à la norme P 18-406

➤ Matériel :

La réalisation de cet essai nécessite des éprouvettes de forme cubique donc les dimensions sont les suivantes 40x40x40 (mm), dimensions définies selon la norme camerounaise « NC 103 Bloc de Terre Comprimée : Norme de définition, classification et désignation des BTC », et une machine de compression.

Dans notre cas, nous avons utilisé une machine de compression à affichage numérique de marque ELLE (MIPROMALO).



Figure 69. Appareil de mesure de compression simple.

➤ Méthode :

Lorsque nous avons nos éprouvettes, nous les plaçons sur le l'un des plateaux qui composent notre machine d'essai, en l'occurrence le plateau inférieur. Cette machine fonctionne avec un système de pression hydraulique. La mise en charge est réalisée par pression hydraulique qui fait déplacer la partie supérieure vers le bas jusqu'à la rupture. L'éprouvette est centrée entre deux les plateaux métalliques de façon que l'axe vertical de l'éprouvette coïncide avec l'axe des blocs de chargement. La charge est appliquée au spécimen de manière continue avec une vitesse de 5 KN/mn

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{L \times l} \quad (23)$$

Avec :

R_c : Résistance à la compression des blocs en (N/mm²).

F : Charge maximale supportée par le bloc (N).

L : Longueur de l'éprouvette en mm ;

l : largeur de l'éprouvette en mm.

✚ Essai de flexion 3 points (norme EN 196-1)

➤ Matériel

Comme pour l'essai de compression, la réalisation de cet essai nécessite des éprouvettes de forme parallélépipédique dont les dimensions sont 40x40x160 (mm) ; ces dimensions sont définies par la norme camerounais « NC 103 Bloc de Terre Comprimée : Norme de définition, classification et désignation des BTC ». Nous avons réalisé cet essai sur la même machine utilisée pour l'essai de compression tout en adaptant les 3points caractéristique de l'essai.



Figure 70. Appareil de mesure de flexion 3 points.

➤ Méthode

Lorsque nous avons nos éprouvettes, nous plaçons deux baguettes métalliques distantes de 100mm sur le plateau inférieur de notre machine. Nous déposons notre éprouvette sur ces deux baguettes et nous posons une troisième au-dessus de l'éprouvette. Ensuite, on met la machine en marche. Cette machine fonctionne avec un système de pression hydraulique. La mise en charge est réalisée par pression hydraulique qui fait déplacer la partie supérieure vers le bas jusqu'à la rupture. L'éprouvette est centrée entre deux des plateaux métalliques de façon que l'axe vertical de l'éprouvette coïncide avec l'axe des blocs de chargement. On note ainsi la force maximale que peut supporter l'éprouvette.

La résistance à la flexion du mortier classique et de fibres est déterminée selon la norme EN196-1 par un dispositif de flexion trois points.

La résistance à la flexion est donnée par la formule :

$$R_f = 0,9 \times 10 \frac{2F}{\pi l x h} \quad (24)$$

Avec :

R_f : résistance à la flexion en MPA

F : Charge de rupture en N.

l : La largeur de l'éprouvette en mm

e: l'épaisseur de l'éprouvette en mm

d : distance entre les deux points en mm. Dans notre cas, elle est fixée à 50mm

La masse volumique de brique

➤ Matériel

La réalisation de cet essai demande comme matériel les éprouvettes parallélépipédiques (celle de l'essai de flexion) et une balance (de préférence numérique) pour avoir des mesures assez fiables.

➤ Méthode

Elle consiste à peser chaque éprouvette de chaque échantillon et de calculer la masse volumique apparente.

La masse volumique apparente à l'état sec de la brique est déterminée par la formule (exprimée en kg/m³) ci –dessous :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (25)$$

Avec :

M : la masse en kg.

V : le volume en m.

ρ : masse volumique.

V. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée fibrés développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le ciment, la chaux et les fibres.

Les fibres utilisées dans cette étude sont d'origine végétale (fibres d'alfa et l'agave de sisal).

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude.

La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des BTC dans ce chapitre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés du BTC fibré.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Chapitre 4. Résultats et Discussion

I. Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet de l'ajout des fibres (alfa et l'agave de sisal) sur les propriétés du bloc de terre comprimée. Ce chapitre s'intéresse à présenter et interpréter l'ensemble des résultats des essais sur les blocs de terre comprimée.

Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre, trois teneurs en ciments (5, 6.5 et 8 %), trois teneurs en chaux vive (6, 10 et 14 %), deux types de fibres (les fibres d'alfa et les fibres d'agave de sisal), et quatre contraintes de compactage (1, 2, 3 et 4 MPa) sont utilisées dans cette étude.

II. Résultats et discussion

II.1. Effet de la teneur en fibres d'Alfa sur la masse volumique apparente du BTC

La densité apparente des échantillons a été déterminée après 28 jours.

Les Figures 71, 72, 73 et 74 représentent les variations de la densité apparente des BTC en fonction d'effort de compactage.

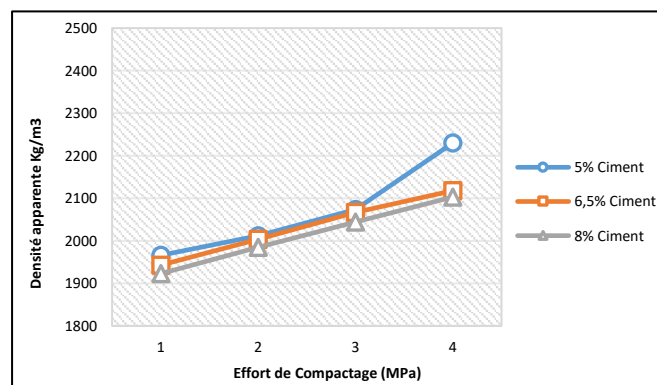


Figure 71. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 0% des fibres d'alfa.

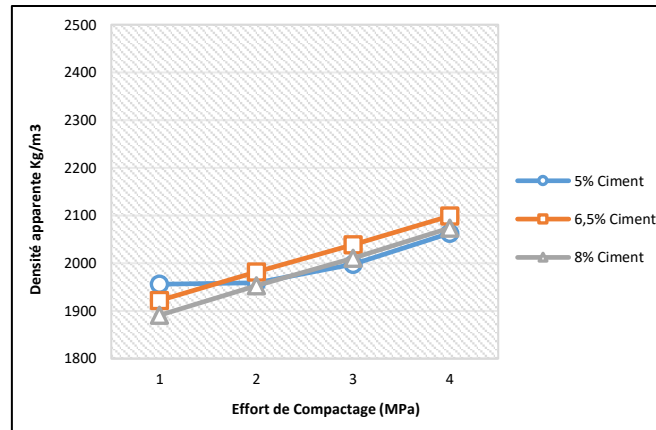


Figure 72. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.

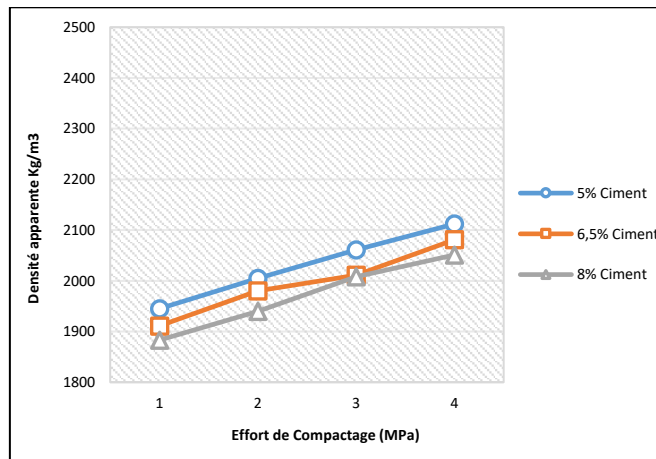


Figure 73. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.

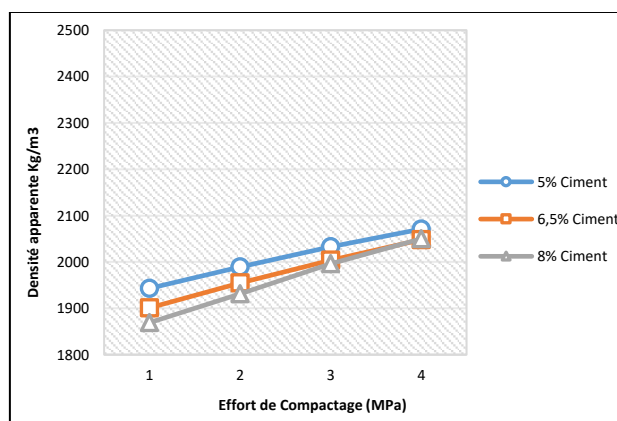


Figure 74. La densité apparente en fonction d'effort de compactage des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.

On observe une augmentation de la densité apparente en fonction de l'effort de compactage.

La densité apparente qui varie de 1869 kg/m³ à 2422 kg/m³ lorsque la pression de compactage appliquée augmente de 1 MPa à 4 MPa, comme le montre les figures 72, 73, 74 et 75 qui montre que cette variation obéit à une loi logarithmique.

Ceci s'explique par le fait que l'augmentation du compactage la pression conduit à un réarrangement d'une structure interne de la phase solide (garnissage granulaire) et la phase fluide en diminuant la quantité de pores microscopiques et macroscopiques.

Cette modification entraîne une diminution de la porosité du matériau et une augmentation de sa densité.

II.2. Effet de la teneur en fibres d'Alfa sur les propriétés du BTC

La conductivité thermique :

Les Figures 75, 76, 77 et 78 représentent la variation de la Conductivité thermique des BTC en fonction de la densité apparente des blocs de terre comprimée (BTC).

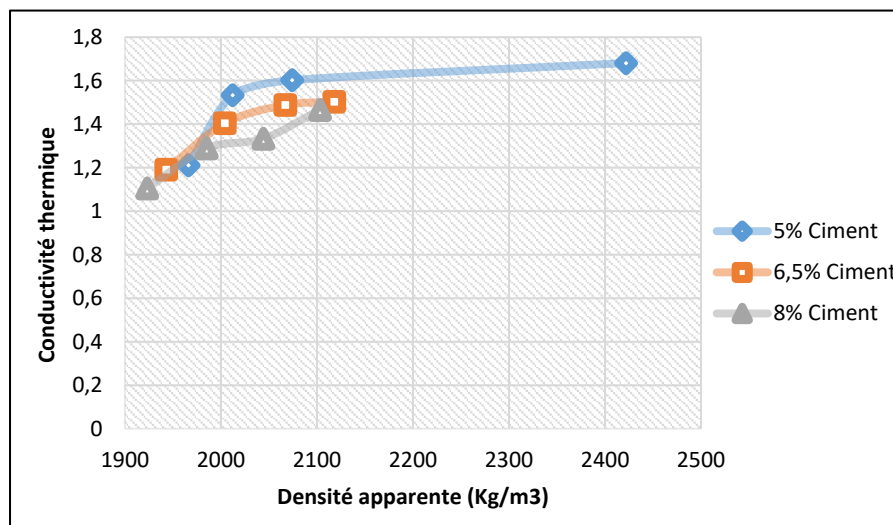


Figure 75. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisés à 0% des fibres d'alfa.

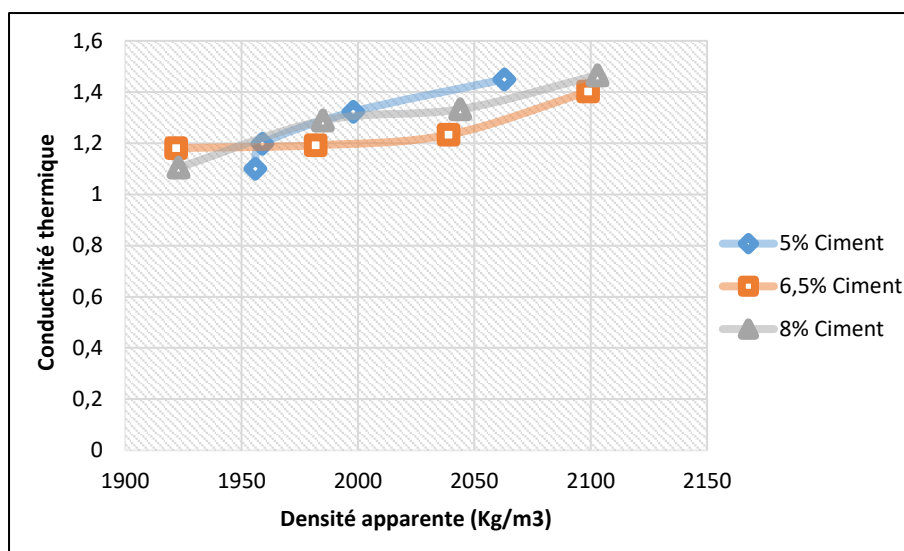


Figure 76. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.

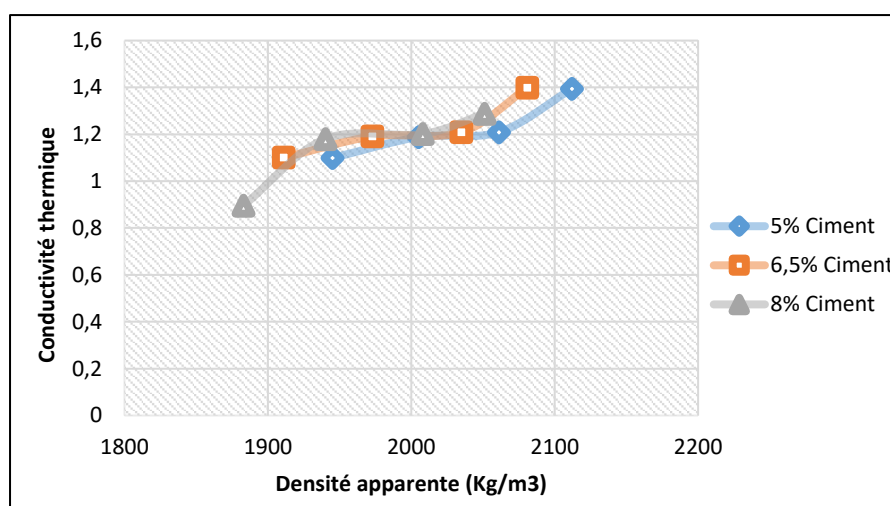


Figure 77. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.

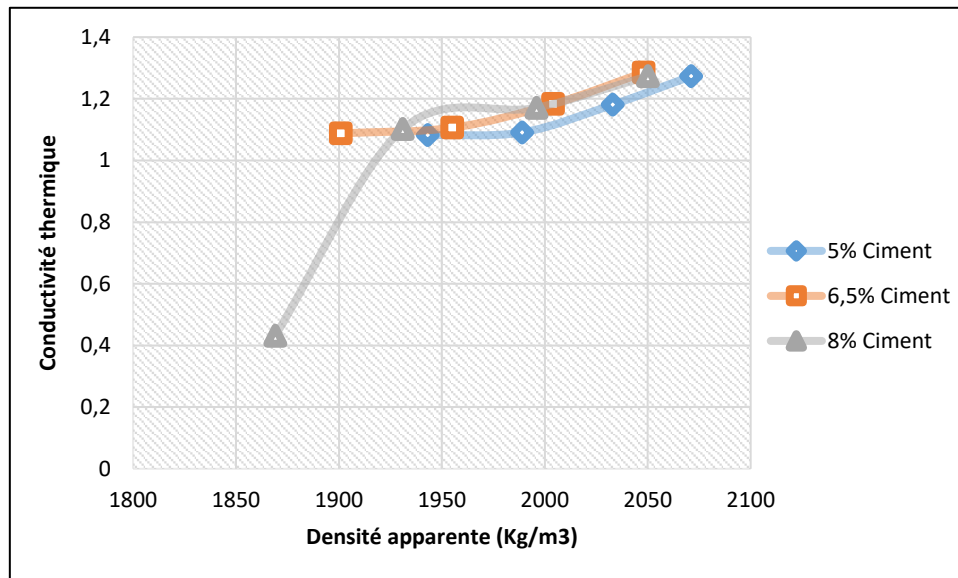


Figure 78. La conductivité thermique en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.

La conductivité thermique du BTC a été mesurée en utilisant une méthode du fil chaud.

Les valeurs de la conductivité thermique sont entre 0,431 et 1,681 W/m.K.

La variation de la conductivité thermique en fonction de l'apparente densité est illustrée dans les Figures 75, 76, 77 et 78 pour 0%, 1%, 2% et 3% des fibres d'alfa.

Augmenter la pression de compactage appliquée et donc l'augmentation de la densité apparente conduit à un CEB avec de faibles performances thermiques.

La diminution de la conductivité thermique avec la densité apparente s'explique principalement par l'augmentation de la porosité du BTC.

Ce résultat confirme les travaux d'autres auteurs [82,83] sur l'effet de la porosité sur les performances thermiques des matériaux.

Les BTC sont matériaux biphasiques, qui comprennent une phase solide et une phase liquide, la conductivité thermique du bloc dépend de la conductivité thermique des deux phases. A l'état sec et à faible teneur en eau, la chaleur de transfert se fait principalement aux points de contact entre les grains formant la matière.

La diminution de la conductivité thermique est principalement due à l'air contenu dans les pores qui représente un milieu isolant pour transfert de chaleur entre les grains.

Par conséquent, le transfert de chaleur à travers la phase solide s'améliore [84].

L'idée d'améliorer l'efficacité thermique des matériaux de construction a toujours été liée à la diminution de leur densité et l'augmentation de leur porosité en incorporant des matériaux légers (caractérisé par une porosité élevée) [85,86,87].

La Résistance à la compression

Les Figures 79, 80, 81 et 82 représentent la variation de la Résistance à la compression des BTC en fonction de la densité apparente.

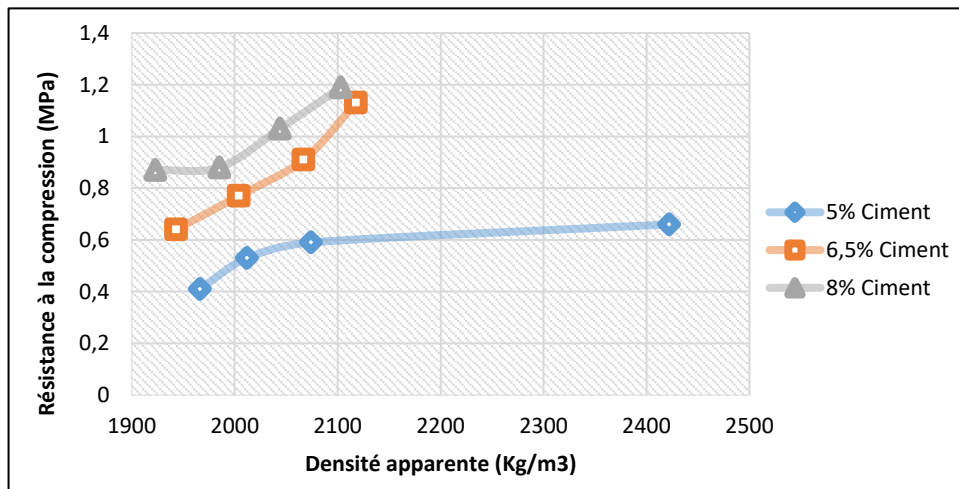


Figure 79. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 0% des fibres d'alfa.

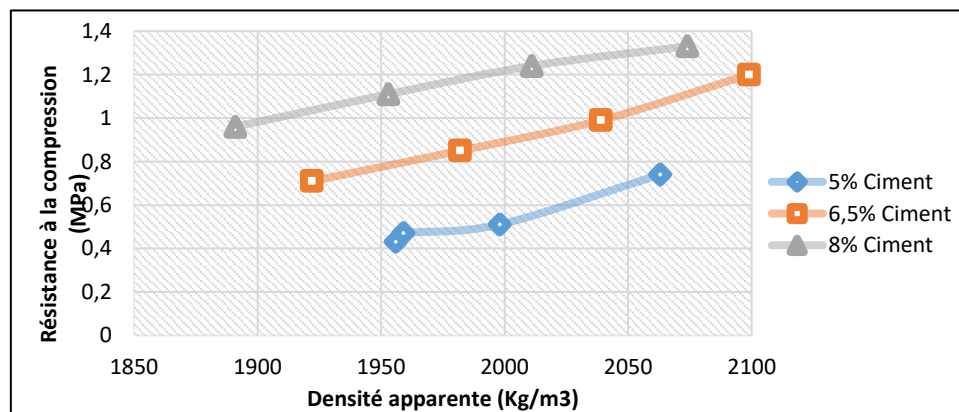


Figure 80. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 1% des fibres d'alfa.

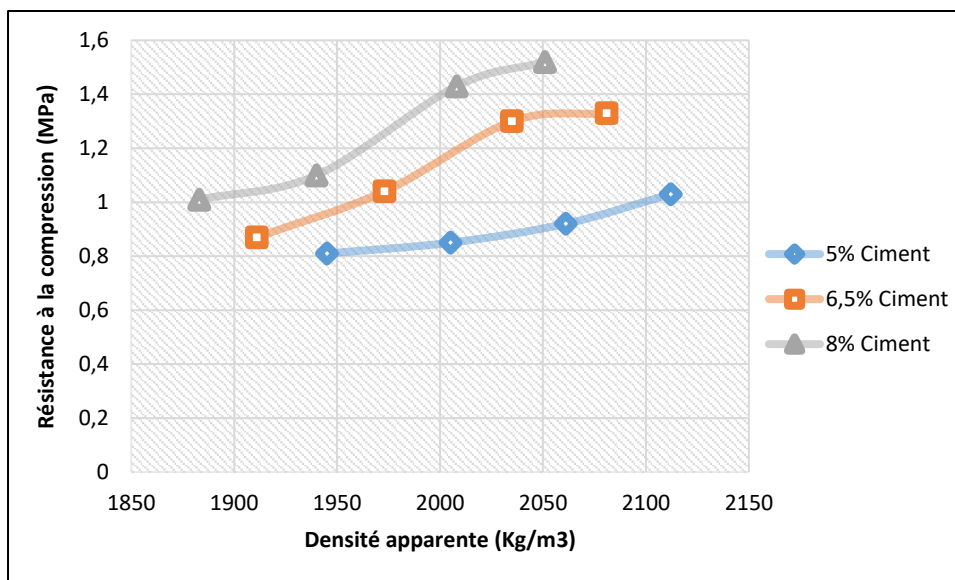


Figure 81. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 2% des fibres d'alfa.

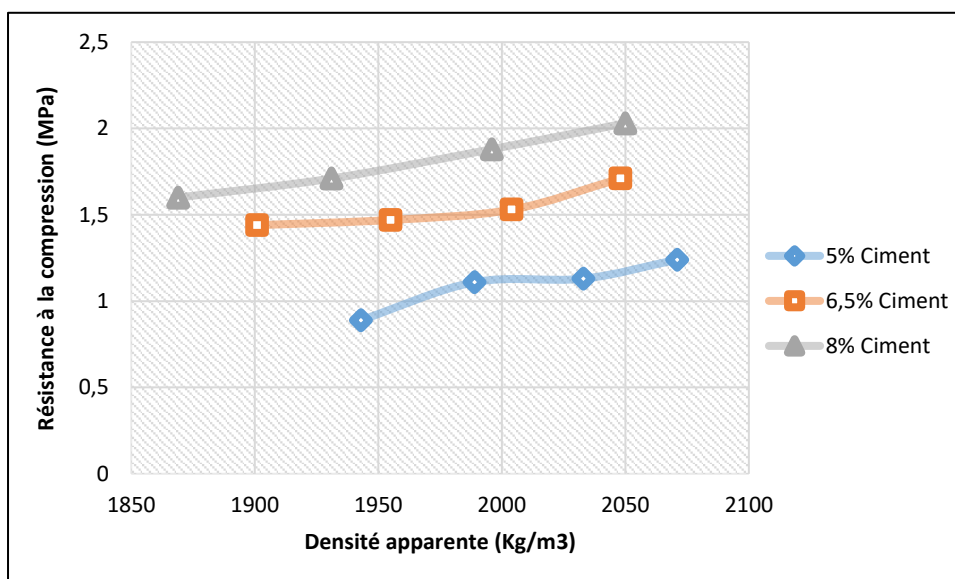


Figure 82. La Résistance à la compression en fonction de la densité apparente des BTC stabilisé à 3% des fibres d'alfa.

Les Figures 79, 80, 81 et 82 présentes la résistance mécanique en compression des blocs de terre comprimée (BTC) en fonction de la densité apparente stabilisée avec trois teneurs des fibres d'Alfa (1%,2% et 3%).

On observe que la résistance mécanique des blocs de terre comprimée en général dans les quatre figures augmente plus que linéairement avec la densité apparente.

Les figures montrent la grande influence de la densité apparente sur la résistance mécanique du BTC.

Pour le BTC à haute densité apparente, la résistance à la compression est supérieure à 2 MPa, elle peut atteindre une valeur de 3 MPa.

En revanche, pour les faibles densités apparentes, la résistance à la compression du BTC est faible et il diminue jusqu'à une valeur de 0,41 MPa pour une densité apparente de 1966 kg/m³.

Cela montre que la présence de fibres dans les mélanges compactés a un effet négatif sur la résistance, ce qui est en accord avec l'avis de Rigassi [11].

II.3. Effet de la teneur en fibres d'Agave de Sisal sur les propriétés du BTC

Les paramètres thermiques :

Les figures 83, 84 et 85 représentent les variations de Diffusivité thermique, Conductivité thermique et l'effusivité thermique des BTC en fonction de la teneur en fibres.

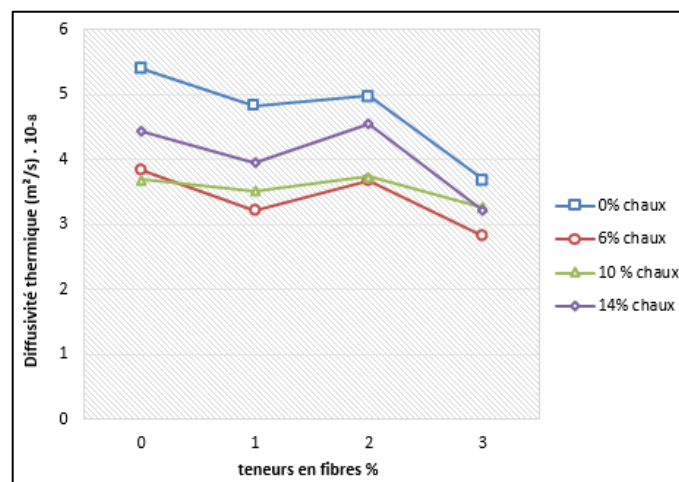


Figure 83. Diffusivité thermique en fonction de la teneur en fibres.

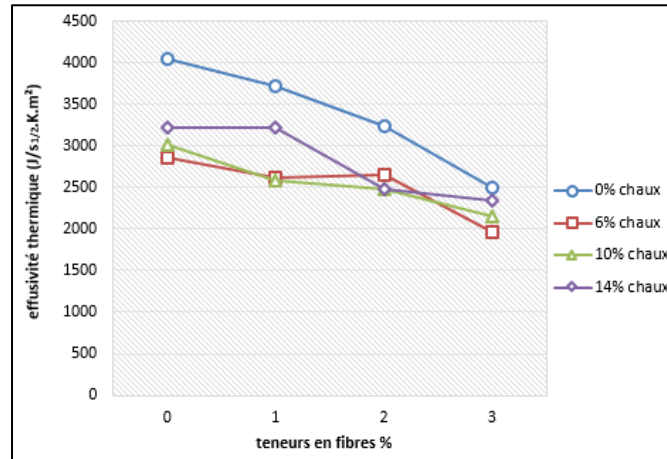


Figure 84. Effusivité thermique en fonction de la teneur en fibres.

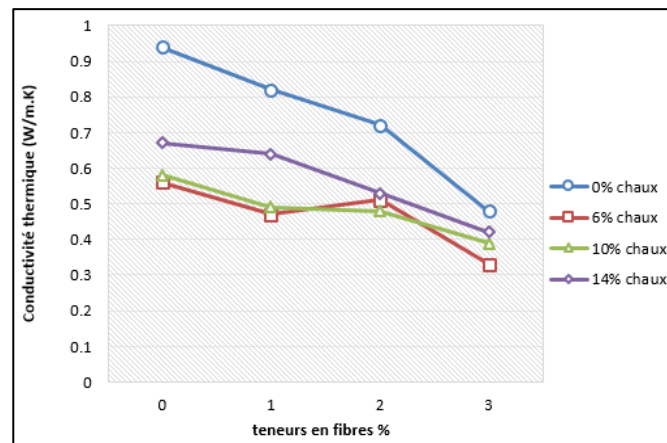


Figure 85. Conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres.

On observe sur la Figure 85 une diminution de la conductivité thermique en fonction du % de fibre, cette diminution est dû au fait que la présence des fibres dans la matrice augmente la porosité et les poches d'air au niveau des interstices, ce qui a pour conséquence l'augmentation de sa résistance thermique. De même sur la figure 85 on observe une diminution de l'effusivité thermique, la diminution de la conductivité entraine directement une diminution de l'effusivité car la conductivité et l'effusivité sont liées. La figure 84 montre aussi que la diffusivité diminue avec le pourcentage de fibre, ce qui est tout à faire normal car la baisse de la conductivité rend le matériau de moins en moins diffusif.

Les conductivités thermiques variant de 0.33 à 0.94 W.m-1.K-1, nous pouvons dire que les valeurs de conductivité se rapprochent de celles mesurées par O. Coulibaly [3]. Aussi ces conductivités sont dans les mêmes ordres de grandeurs que celles des briques comprimées

stabilisées au ciment, à la sciure de bois et à la pouzzolane, dont les valeurs moyennes varient de 0,55 à 0,95 W.m-1.K-1[85].

✚ **Les paramètres mécaniques:**

Les Figures 86 et 87 représentent les variations de la résistance à la compression des BTC en fonction de la teneur en fibres.

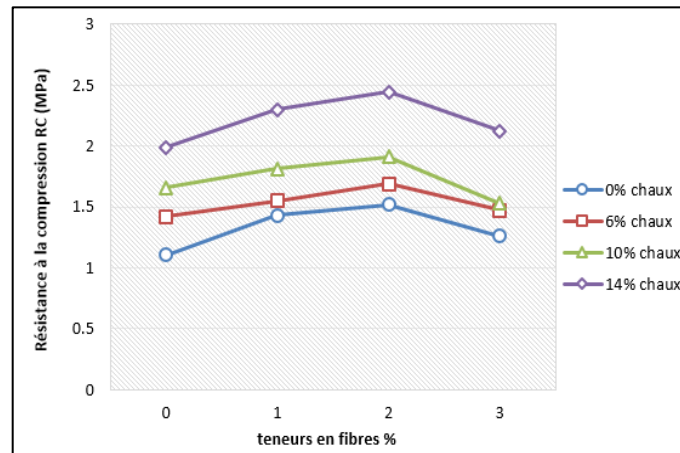


Figure 86. Effet de la teneur en fibres sur La Résistances à la compression.

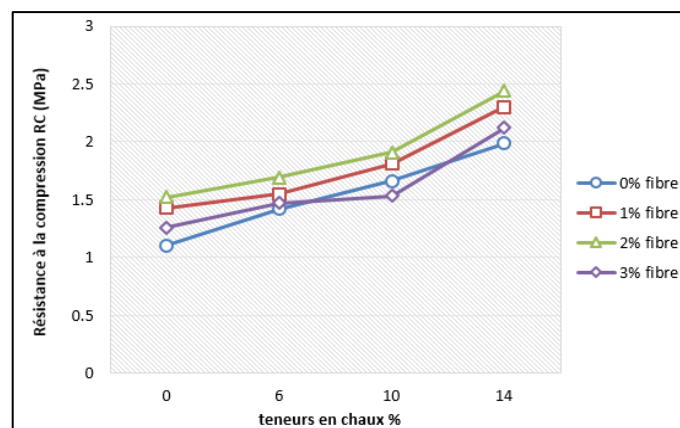


Figure 87. Effet de la teneur en chaux sur La Résistances à la compression.

L'effet de la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression du BTC est présenté dans la figure. À travers ces résultats de BTC sans traitement (0% chaux) on observe une augmentation de la résistance avec l'augmentation des fibres. Les éprouvettes contenant les fibres résistent mieux à la compression que les éprouvettes de sol naturel.

Pour les autres cas 6 et 10 et aussi 14% de teneur en chaux, on remarque que l'ajout des fibres a conduit à une augmentation de la résistance jusqu'à 2 % en fibres.

Pour les blocs renforcés avec un dosage en fibres supérieur à 2%, il y a une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres. La diminution de la résistance à la compression du BTC peut être attribuée à la domination de l'effet des fibres sur celui de la teneur en chaux. Ceci peut être expliqué par le fait que la quantité de produits d'hydratation est faible devant l'importance des vides créés par les fibres. Ces vides sont dus au caractère élastique des fibres durant le compactage. Une fois la contrainte de compactage enlevée, le matériau relâche et le volume occupé par les fibres augmente créant ainsi une porosité supplémentaire et conséquemment affecte négativement la résistance.

A titre d'exemple, la résistance à la compression des mélanges non renforcés en fibres augmente de 1.42, 1.66 et 1.98 MPa quand les blocs sont stabilisés par 6, 10 et 14%, respectivement.

Ces pourcentages sont calculés par rapport au mélange de référence (sol naturel).

Les Figures 88 et 89 représentent les variations de la résistance à la flexion des BTC en fonction de la teneur en fibres.

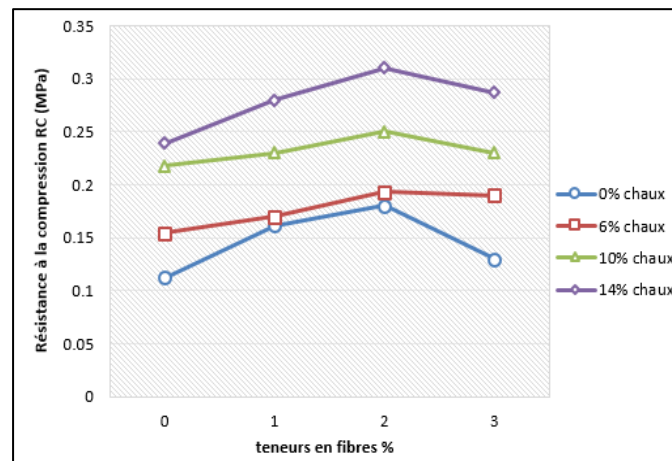


Figure 88. Effet de la teneur en fibres sur La Résistances à la flexion.

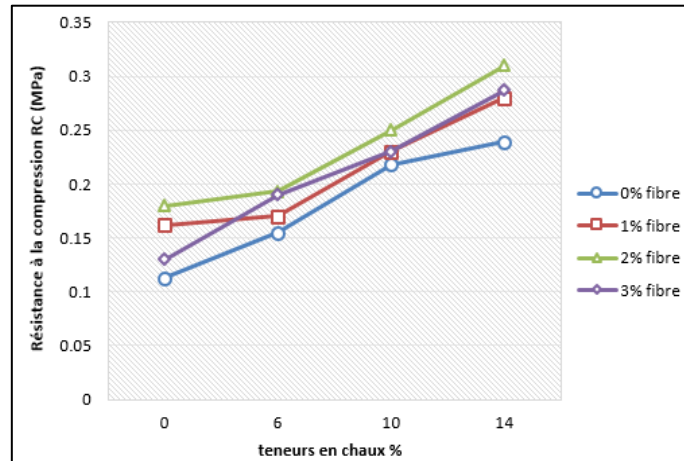


Figure 89. Effet de la teneur en chaux sur La Résistances à la flexion.

Les résultats montrent aussi, que la résistance à la flexion augmentée avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à certain taux des fibres. Pour ce cas, l'augmentation de la résistance à la flexion pour une teneur en chaux respectivement de 6%, 10% et 14%. Conformément aux résultats obtenus pour la résistance à la compression. De la figure 90 on observe que l'augmentation de la teneur en chaux a causé une augmentation de la résistance à la flexion.

A titre d'exemple, la résistance à la flexion des mélanges renforcés par 2% en fibres augmente de 0.193, 0.25 et 0.31MPa quand les blocs sont stabilisés par 6, 10 et 14% respectivement. Ces pourcentages sont calculés par rapport au mélanger de référence (sol naturel avec 2 % fibres). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Millogo [31] et Meukam et al [46].

III. Conclusion

Les BTC à haute densité apparente ont une bonne compression résistance pouvant atteindre 2 MPa. Cependant, il se caractérise par conductivité thermique élevée allant jusqu'à 1,681 W/m.K.

L'utilisation du ciment conduit à des améliorations importantes de la résistance en compression.

La présence des fibres d'alfa dans la fabrication des blocs de terre comprimée est indésirable, si le critère de choix est la résistance. Mais si le critère de choix est l'isolation

thermique, tout en assurant une résistance mécanique modérée, alors là on peut procéder à une étude appropriée, en optimisant la teneur en fibres d'alfa utilisée dans le mélange.

Dans la plupart des cas examinés, l'ajout des fibres a un effet positif sur la résistance à la compression et la résistance à la traction du bloc de terre comprimée.

En considérant les propriétés mécaniques et thermo-physiques, les blocs stabilisés aux fibres et à la chaux présentent les meilleurs avantages. Ils ont les plus grandes résistances à la compression (environ 2.3 MPa) et à la flexion à trois points (0.31 MPa), de faibles conductivités thermiques (0,33 W.m-1.K-1) et de masses volumiques faibles.

L'isolation thermique des briques confectionnée où le pourcentage en fibre d'agave de sisal est 3% est le meilleur car de la présence de la fibre qui impose la meilleure isolation.

Conclusion et Perspectives

Conclusion et Perspectives

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, nous avons besoin d'identifier le sol et les stabilisateurs de fibres (analyse granulométrique, chimique et minéralogique) avant de les utiliser et la chaux. C'est nécessaire, parce qu'il peut être nécessaire de formuler des recommandations concernant leur traitement éventuel.

Nous avons étudié les propriétés chimiques du sol provenant de BOUNAGA région de Marrakech, deux fibres différentes (la fibre d'alfa et la fibre d'agave de sisal), la chaux et ciment, préparer les échantillons de blocs de terre comprimée par ce sol, puis mesure leur conductivité thermique, la résistance mécanique à la compression et à la flexion.

À la suite de l'étude réalisée, on a obtenu les conclusions suivantes :

- Identification du sol avant utilisation est nécessaire, elle pourra également conduire à des recommandations concernant leur éventuel traitement.
- Dans la plupart des cas examinés, l'ajout des fibres a un effet positif sur la résistance à la compression et la résistance à la flexion du bloc de terre comprimée.
- Les BTC à haute densité apparente ont une bonne compression résistance pouvant atteindre 2 MPa.
- L'utilisation du ciment conduit à des améliorations importantes de la résistance en compression.
- La présence des fibres d'alfa dans la fabrication des blocs de terre comprimée est indésirable, si le critère de choix est la résistance. Mais si le critère de choix est l'isolation thermique, tout en assurant une résistance mécanique modérée, alors là on peut procéder à une étude appropriée, en optimisant la teneur en fibres d'alfa utilisée dans le mélange.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] S. O. SORÉ, A. MESSAN, E. PRUD'HOMME, G. ESCADEILLAS, F. TSOBNANG, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, *construction and building materials*, 165 (2018) 333 -345
- [2] L. LAOU, L. ULMET, S. YOTTE, M. TAKARLI, P. MAILLARD, S. ROSSIGNOL, Etude des conditions hygrothermiques sur la fissuration d'une paroi en brique de terre crue, bois et mortier minéral, 34èmes Rencontres de l'AUGC, Université de Liège, Belgique, (25 au 27 mai 2016)
- [3] E. OUEDRAOGO, O. COULIBALY, A. OUEDRAOGO, A. MESSAN, Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment, *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2 (2015) 68 -76
- [4] A. AMMARIA, K. BOUASSRIAB, M. CHERRAJA, H. BOUABIDA, S. CHARIF D'OUAZZANEC, Combined effect of mineralogy and granular texture on the technico-economic optimum of the adobe and compressed earth blocks, *Case Studies in Construction Materials*, 7 (2017) 240 -248
- [5] Houben H and Guillaud H. *Earth construction-a comprehensive guide*. Intermediate Technology, London, 1994.
- [6] Swamy, R.N., Vegetable Fibre Reinforced Cement Composite. A False Dream or A Potential Reality ?. *Proceedings of the Second International RILEM Symposium, Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials*, Salvaor, Bahia, Brazil, Chapman and Hall, Ed. Sobral, H.S., pp. 139-149, Sept 17-21, 1990.
- [7] Mesbah A, Morel J.C, Walker P, Ghavami Kh. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2004;16(1):95-98.
- [8] Ziegler S, Leshchinsky D, Ling H.L, Perry E.B. Effect of short polymeric fibres on crack development in clays. *Soils Found* 1998;38(1):247-253.
- [9] Khedari J, Charoenvai S and Hirunlabh J. New insulating particleboards from durian peel and coconut coir. *Buil Environ* 2003;38(3):245-254.
- [10] Namango S.S. *Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres. Cassava Powder and Cement Compositions*. A Doctoral Dissertation, Brandenburg Technical University, Cottbus, Germany, 2006.
- [11] Rigassi V. *Compressed earth blocks*. CRATerre-EAG Volume I. Manuel de production. Germany, 1995.
- [12] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. *Construire en terre*. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [13] Michot A. *Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C*. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.

- [14] Caillère S, Hénin S, Rautureau M. Minéralogie des argiles. Masson, Tomes 1 et 2, Paris France, 184p et 189 p, 1982.
- [15] Grim RE. Physico-Chemical Properties of Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations division. ASCE , vol. 85, no . SM2, pp. 1-17, 1959.
- [16] Pedro G. Les minéraux argileux, 47-64, dans pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris, France, 665p, 1994.
- [17] Michel J. Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction. Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics Série Matériaux N° 339, pp.22-35, 1999.
- [18] Jiménez Delgado MC, Guerrero IC. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials vol 21 (2007) 237–251.
- [19] Guettala A. Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.
- [20] Jiménez Delgado MC, Guerrero IC. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials vol 21 (2007) 237–251.
- [21] Venuat M . Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon-sous-Bagneux, 459
- [22] Cabane N. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004.
- [23] Bell, FG. Lime stabilization of clay minerals and soil. Eng. Geol. 42 (4), 223–237, 1996.
- [24] Lasledj A. Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico-chimique et propriétés géotechniques, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 359 p, 2009.
- [25] Attoh-Okine N. Lime treatment - revisited of laterite soils and gravels. Construction and Building materials. 9(5) : 283–7, 1995.
- [26] Siddique A, Hossain A. Effect of lime stabilisation on engineering properties of an expansive soil for use in road construction. Journal of Society for Transportation and Traffic Studies.;2(4):9, 2013.
- [27] Le Roux A, Rivière A. Traitement des sols argileux par la chaux. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris. 1969;(40):59–95.
- [28] Little D N. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Arlington, 219, 1995.
- [29] Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. Appl. Clay Sci. 50, 191–198, (2010 a).
- [30] Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. Applied Clay Science 50 , 199–203, (2010 b).
- [31] Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R. Microstructure and physical properties of lime-clay adobe bricks. Construction and Building Materials, 2386-2392. Volume 22, 2008.

- [32] Venkatarama Reddy BV, and Hubli SR. Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 35, pp 293-300, 2002.
- [33] Verdyan J., Roisin V, Nuyens J. *Applications de la mécanique des sols*", Dunod Ed. Paris, 1971.
- [34] Moszkowicz P, Barna R. Stabilisation - solidification des déchets. *Techniques de l'ingénieur*, Article G 2 080, Volume G. 04 . 2001.
- [35] TRAN N T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009.
- [36] United Nations. *Earth Construction Technology*. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- [37] Walker P. and Stace T. Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars, *Materials and Structures Vol 30*, pp 545 – 551, 1997.
- [38] Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.
- [39] Heathcote, K, and Piper R. Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. *J. Proc. Roy. Soc. New South Wales*, vol. 127, pp. 33-37, 1994.
- [40] Walker, P. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites*, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.
- [41] Kerali AG. Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University, 2001.
- [42] Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [43] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.
- [44] Croft JB. The problem in predicting the suitability of soils for cementitious stabilization. *Engineering Geology*, Vol. 2(6), 397-424, 1968.
- [45] Venkatrama Reddy BV, Gupta A. Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils. *Journal of Materials and Structures*, 38, 651-658, 2005.
- [46] Meukam P, Jannot Y, Noumowe A, Kofane TC. Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials*, Volume 18, issue 6, pp.437–443, 2004.
- [47] Baley C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Les techniques de l'ingénieur*, AM 5 130, 2004.
- [48] Trabut L., *Etude de l'alfa*, 90 p., Jourdan, Alger, 1889.
- [49] Turrel L. *Le sparte (Stipa tenacissima)*, *Bulletin Mensuel de la Société d'Acclimatation*, 7, pp. 489-495, 1876.
- [50] Charrier Cdt., *L'alfa des hauts-plateaux de l'Algérie*, *Algérie Agricole*, 32 p. 1873
- [51] Montessus de Ballore H., *Fibres végétales utilisables en papeterie*, *Rev. Tun.* 14, pp. 61-67, 1907.
- [52] Portail de l'agriculture marocaine, *L'alfa : Importance écologique et socio-économique*, *Terre et Vie*, N° 61-62, 2002.

- [53] Ben Brahim, S.B., Cheikh, R.B. (2007). Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite. *Compos. Sci. Technol.* 67, 140–147.
- [54] Hanana, S., Elloumi, A., Placet, V., Tounsi, H., Belghith, H., Bradai, C., (2015). An efficient enzymatic-based process for the extraction of high-mechanical properties alfa fibres. *Ind. Crops Prod.* 70, 190–200.
- [55] Thielemans W, Wool RP. Butyrate Kraft lignin as compatibilizing agent for natural fiber reinforced thermoset composites. *Compos Part A: Applied Sci Manuf*;35(3): 327-38, 2004.
- [56] Swamy RN. Vegetable fibre reinforced cement composite A false dream or a potential reality. In: Sobral H.S, editor. *Proceedings of the second international RILEM symposium, vegetable plants and their fibres as building materials*, Salvaor, Bahia (Brazil), Chapman and Hall; p. 139–49, 1990.
- [57] Coutts RSP, Ni Y. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. *Cem Concr Compos*;17(2):99–106, 1995.
- [58] Aggarwal LK. Bagasses-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 17(2):107–12, 1995.
- [59] Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cem Concr Compos*, 27(5):617–21, 2005.
- [60] Binici H, Aksogan O, Shah T. Investigation of Reinforced Mud Brick as Building Material. *Construction and Building Materials*, 19(4):313-318, 2005.
- [61] Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr Build Mater* 2;30:100–16, 2012
- [62] Ramaswamy HS, Ahuja BM, Krishnamoorthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *Int J Cem Compos Lightweight Concr*;5(1):3–13, 1983.
- [63] Ziegler S, Leshchinsky D, Ling HL, Perry EB. Effect of short polymeric fibres on crack development in clays. *Soils Found*;38(1):247–53, 1998.
- [64] Filho RDT, Scrivener K, England GL, Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cem Concr Compos* ; 22(2):127–143, 2000.
- [65] Vergas J, Bariola J, Blondet M. Seismic Strength of Adobe masonry. *Materials & Structures*, 19, pp. 253-258, 1986.
- [66] Stulz R, Mukerji K. *Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions*. Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.
- [67] Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika J Sci Technol*;19(1):33–43, 2011.
- [68] Minke G. *Earth Construction Handbook*. Boston: WIT Press; 2000.
- [69] Villamizar MCN, Araque VS, Reyes CAR, Silva RS. Effect of the addition of coalash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Constr Build Mater*;36(11):276–86, 2012.
- [70] Oliver M. and El Gharbi Z. *Sisal Fibre Reinforced Soil Masonry*. Proceedings of the 4th International Masonry, London, pp. 55-58, Oct. 1995.

- [71] Eko RM, Riskowski G. A Procedure for Processing Mixtures of Soil, Cement, and Sugarcane Bagasse. *Agricultural Engineering Journal: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript BC 99 001, Vol. III, pp. 1-11, 2001
- [72] YVES J. ; « Transferts Thermiques », Ecole des mines Nancy, Edition 2012.
- [73] Fiche thermique, « Isolation thermique » Mairie de Paris, Edition Novembre 2009.
- [74] CLONED J. ; « Les matériaux isolantes thermiques pour le bâtiment », Centre d'animation régional en matériaux avancé, Mai 2010.
- [75] « Guide d'utilisation CT-mètre » SMEE – ZI des Blanchisseries- 38500 VOIRON;
- [76] Venuat M . Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon-sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- [77] Kujala K, Mäkikyrö M, Lehto O. Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils. *Grouting and Deep Mixing*, Yonkura, Terashi and Shibazaki (eds). Balkema, Rotterdam. pp 415-420, 1996.
- [78] Tremblay H. Amélioration mécaniques et prédiction de la compressibilité des sols fins du Québec. Thèse de doctorat de l'Université de Laval. 218 p, 1998.
- [79] Venuat M . Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon-sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- [80] Vilenkina N. Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux, Mouscou, 1956.
- [81] P'KLA A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002.
- [82] H. Guillaud, T. Joffroy, P. Odul, CRATerre-EAG, in: *Compressed Earth Blocks: Volume II. Manual of Design and Construction*. Germany: Aus der Arbeit von GATE, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1995.
- [83] S. Nasla, K. Gueraoui, M. Cherraj, A. Samaouali, E. Nchiti, Y. Jamil, O. Arab and K. Bougtaib, An experimental study of the effect of pine needles and straw fibers on the mechanical behavior and thermal conductivity of adobe earth blocks with chemical analysis, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 23, Issue 1, Pages 35 - 56 (June 2021).
- [84] M. Filali, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, Ph.D. thesis. Institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [85] P. Meukam, Y. Jannot, A. Noumowe, T.C. Kofane, Thermo physical characteristics of economical building materials, *Constr. Build. Mater.* 18 (2004) 437–443.
- [86] S. Herrero, P. Mayor, F. Hernández-Olivares, Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars, *Mater. Des.* 47 (2013) 633–642.
- [87] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco, V. Calderón, Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 653–658.