

# THÈSE

*En vue de l'obtention du : DOCTORAT*

**Centre de Recherche :** Centre de Recherche en Énergie

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

**Discipline :** Physique

**Spécialité :** Mécanique, Énergétique et Génie Civil

*Présentée et soutenue le 22/07/2022 par :*

***Khadija BOUGTAIB***

**CARACTERISATIONS THERMO-MECANQUES ET AMELIORATION DE LA DURABILITE DES MATERIAUX EN TERRE CRUE COMPACTEE ET RENFORCEE PAR DES FIBRES DE PALMIER NAIN DE LA REGION DE BENI MELLAL – KHENIFRA AU MAROC**

## ***JURY***

Mohammed Ouadi BENSALAH	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	<b>Président</b>
Mohammed TAIBI	PH, Université Hassan II, Faculté des Sciences Ain Chock –Casablanca	<b>Rapporteur / Examineur</b>
El Mehdi SALMANI	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	<b>Rapporteur / Examineur</b>
Mohamed DRIOUICH	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	<b>Rapporteur / Examineur</b>
Mohammed SAMMOUDA	PH, Université Sultan Moulay Slimane, Faculté Polydisciplinaire - Béni Mellal	<b>Rapporteur / Examineur</b>
Rachid AHL LAAMARA	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	<b>Examineur</b>
Mohammed CHERRAJ	PH, Université Mohammed V, Faculté des Sciences - Rabat	<b>Directeur de Thèse</b>

Année Universitaire : 2021/2022

# *Dédicace*

---

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents : «Mohamed» et «Mina». Je les remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutiens, l'aide et les encouragements qu'ils m'ont apportés durant toutes ces années d'étude sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.*

- \* A mon frère Toufik, sa femme Laila et sa fille Ikhlas.*
- \* A ma sœur Meriem et son mari Aissame.*
- \* A ma sœur Halima, son mari Mohamed et sa fille Salwa.*
- \* A tous les membres de mes familles : Bougtaib et Adil.*
- \* A tous mes amis (es), Surtout : Samir NASLA, Jamil Youssef, Samir Nasla et Imane Blali, Chaimae El-Khaloufi.*

*Je le dédie, aussi, à toute personne qui m'a aidé et soutenue de près ou de loin.*

# *Remerciements*

---

Avant tout, je tiens à remercier Dieu le tout-puissant, qui m'a donné la volonté, la santé et la patience durant mes années d'études et surtout pendant la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mon respect et ma gratitude au Monsieur le professeur **Mohamed CHERRAJ**, mon directeur de thèse, pour sa supervision, ses conseils et ses encouragements dans la réalisation de ma thèse. Je lui suis très reconnaissante pour ses conseils et, bien sûr, pour les connaissances et l'expérience de recherche qu'il a pu me transmettre ; je suis sûr que cela me sera bénéfique dans les années à venir.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur **Mohammed OUADI BENSALAH**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté des sciences de Rabat, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur **Mohammed TAIBI**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté des sciences Ain Chok de l'Université Hassan II à Casablanca, d'avoir accepté d'examiner et de rapporter ce manuscrit.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur **El Mehdi SALMANI**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté des sciences professeur d'enseignement supérieur de la faculté des sciences de Rabat, d'avoir accepté d'examiner et de rapporter ce manuscrit.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur **Mohammed SAMMOUDA**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté Polydisciplinaire - l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal, d'avoir accepté d'examiner et de rapporter ce manuscrit.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à monsieur **Mohammed DRIOUICH**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté Polydisciplinaire - l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal, d'avoir accepté d'examiner et de rapporter ce manuscrit.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur **Rachid AHL LAAMARA**, professeur d'enseignement supérieur de la faculté des sciences de Rabat, d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Ce travail a été élaboré au sein de l'équipe de modélisation et simulation en mécanique et énergétique (EMSME) à la faculté des sciences de Rabat, au Laboratoire d'Études, d'Essais et de Contrôle (LABO CONTROL) à Salé et au Centre de Recherche Forestière de Rabat.

Je tiens à remercier Monsieur **Abderrahim FAMIRI**, professeur et Chef du Centre de Recherche Forestière, de m'avoir accueilli dans les laboratoires du Centre, pour ses précieux conseils, son soutien et son aide durant mes travaux.

Je tiens également à remercier Monsieur **Mohamed FARAH** et Monsieur Salah KABOURI, respectivement Directeur du Laboratoire d'Études, d'Essais et de Contrôle (LABO CONTROL) de Salé et Directeur du Bureau d'Études SOCHEC qui m'ont donné les moyens de mener à bien mon travail. Ainsi que tout le personnel du laboratoire pour leur assistance dans certaines étapes de mes études expérimentales.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous les membres du Laboratoire de Mécanique, Simulations Mécaniques et Biomécaniques (MSME) de la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V de Rabat, en particulier le Professeur **Kamal GOURAOUI** pour ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son, très apprécié, soutien pendant mes études.

# Résumé

---

On distingue de nombreuses techniques de construction en matériaux locaux (sol) : Briques moulées à la main (adobe), mur massif damé dans un gabarit en bois (pisé), mur à armature en bois dont les espaces sont comblés d'un mélange de fibres, sable, argile et eau (torchis), briques en sol compactées manuellement ou mécaniquement (BTC) etc. Les matériaux de construction se différencient selon les caractéristiques suivantes : Physiques, énergétique, écologique et socio-économiques. Notre travail vise à mettre en valeur des matériaux locaux. Nous cherchons à contribuer dans l'abaissement des prix de revient des édifices et dans la réduction de consommation énergétique (Ex. chauffage et climatisation). En effet, plusieurs sites patrimoniaux remarquables témoignent de cet usage. Les matériaux utilisés proviennent du territoire de la province de Khénifra. Dans cette recherche, nous avons procédé, entre autres, à la comparaison entre deux méthodes de compactage : méthode statique et méthode manuelle. Les compactages ont porté sur des blocs en terre comprimée stabilisés avec l'ajout de fibres de Palmier Nain et/ou d'un liant (ciment ou chaux). De plus, Etudier les conséquences de l'utilisation d'ajouts sur la durabilité, sur les propriétés thermiques et sur la consistance des blocs de terre comprimée (BTC). Dans un premier temps, Nous avons étudié des dosages pour la fabrication de blocs de terre comprimée (BTC) à l'aide d'une presse manuelle qui a été fabriquée par un forgeron dans un quartier populaire à Salé (El Karia), à savoir : Les pourcentages en chaux respectivement incorporés au sol sont 0%, 5%, 10% et 12% ; Les dosages, successifs, en fibres de Palmier Nain sont 0%, 1%, 1.5%, 2% et 2.5%, avec des longueurs de 10 mm à 40 mm. Nous avons déduis des résultats obtenus que le fait de résister à la compression des BTC, s'améliore selon le dosage du sol avec la chaux et/ou les fibres. En effet, dans le mélange, le contenu en eau est important sur l'influence sur la stabilité et sur la durabilité des blocs de terre comprimée. Cette étude a montré, aussi, que le temps de cure conduit à l'efficacité de la résistance des BTC. Dans le deuxième temps, nous avons procédé à la stabilisation des BTC avec l'ajout de fibres de Palmier Nain (à des teneurs en masse allant jusqu'à 2.5% avec un pas de 0.5% et des longueurs moyennes de 0.1 cm, 1cm et 3 cm) et/ou d'un liant ciment ou chaux (à des teneurs en pourcentage de 0%, 5%, 10% et 12%). Nous avons étudié les propriétés mécaniques de ces mélanges en mesurant la  $R_C$  et la  $R_T$  d'une première série d'échantillons élaborés au laboratoire. D'autre part on a, aussi, étudié les propriétés thermiques. Avant l'analyse de l'effet des ajouts sur les caractéristiques thermomécaniques des blocs de terre comprimée, les caractéristiques minéralogiques et physicochimiques des matériaux de bases ont été étudiées.

**MOTS CLÉS :** Terre, fibres, chaux, ciment, matériaux locaux, propriétés mécaniques, durabilité, propriétés thermiques, compactage, statique et manuel.

# *Abstract*

---

Our research tends to enhance local materials and help reduce construction costs and save energy (heating/air conditioning). From here, the idea of designing eco-building materials based on local materials that have proven their use for millennia, through remarkable heritage sites was born. These materials (blocks of compressed earth) are made from soil that we have brought back from the province of Khenifra and static compaction method compared by manual method, we stabilized them with the addition of doum palm fibers and/or a binder (cement or lime). The main objective of this work is to study the effect of the use of additions on the mechanical properties and durability (alternate wetting/drying cycle method) of compressed earth blocks, as well as thermal properties. First, three lime contents (0%, 5%, 10% and 12%) of the dry mixture weight, and four fiber contents of the doum palm (0, 1%, 1.5%, 2% and 2.5%; 10 mm and 40 mm long) are used for the production of compressed earth blocks (BTC) using a manual press that was made by a blacksmith in a working-class neighborhood (Sale El Karia). The results obtained have shown that there is an improvement in the resistance to dry compression of the compressed earth blocks as a function of the dosage of the earth with lime and/or fibers. The results show that 10% in the dosage of lime with earth and 1% palm fiber dosage has the best resistance to dry compression, while the wet compressive strength is low compared to the dry compressive strength; it means that the water content plays an important role in the stability and durability of the compressed earth blocks. This study also showed that the flood time leads to an improvement in the resistance of compressed earth blocks. In the second step, We stabilized them with the addition of fibers of palm doum (at mass contents up to 2.5% with a pitch of 0.5% whose average lengths are 0.1cm, 1cm and 3cm) and/or of a binder (cement whose percentage contents are 0%-5%-10%-12% or the same for lime). The mechanical properties of these mixtures were studied by measuring the compressive and tensile strengths of a first series of samples developed in the laboratory. On the other hand, the thermal properties were also carried out. Prior to the analysis of the effect of the addition on the thermo-mechanical characteristics of the compressed earth blocks, physico-chemical mineralogical characterizations of the base materials were proposed.

**KEYWORDS:** Earth, fibers, lime, cement, local materials, mechanical properties, durability, thermal properties, compaction, static and manual.

# Liste des figures

---

Figure 1. Exemples de Constructions en terre dans le monde. ....	8
Figure 2. Carte du monde : utilisation de la terre en architecture [20].....	8
Figure 3. Couche tétraédrique [25]. ....	10
Figure 4. Couche octaédrique [25].....	11
Figure 5. Schéma de la structure de la Kaolinite [30].....	12
Figure 6. Schéma de la structure de la montmorillonite [30].....	13
Figure 7. Schéma des feuillets de l' Illite [30]. ....	13
Figure 8. Courbes des tailles des particules des sols utilisés pour le bâtiment en fonction des techniques pratiquées [34].....	15
Figure 9. Fuseau du diagramme de plasticité des terres [34]. ....	16
Figure 10. Cycle de la chaux. ....	18
Figure 11. La variation de la résistance à la flexion en fonction de la longueur et le taux de fibres [14]. ....	29
Figure 12. La variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur et de taux de fibres [14]. ....	29
Figure 13. Effet du taux de fibres de Coco sur la conductivité thermique [55]. ....	30
Figure 14. Effet du taux d'argile sur la résistance à la compression d'un BTC stabilisé au ciment [58]. ....	31
Figure 15. Influence du taux de ciment sur les résistances mécaniques (compression et traction) par fendage d'échantillons stabilisés au ciment [59]. ....	32
Figure 16. Effets du compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques [63]...	34
Figure 17. Exemple de Fabrication d'Adobe. ....	35
Figure 18. Etapes de construire un mur en pisé. ....	35
Figure 19. Techniques de construction en torchis alsace France. ....	36
Figure 20. Exemple de mur en terre coulée. ....	36
Figure 21. Construction en terre empilée : (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée ; (c) mosquée de Bobo Dioulasso. ....	37
Figure 22. Représentation des techniques des ouvrages en sol fait par CRATerre en 1986 (Houben, 2006) [19]. ....	38
Figure 23. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée. ....	41
Figure 24. Différentes sortes de BTC [38]. ....	42
Figure 25. Procédure d'essai de la touche [13]. ....	44

Figure 26. Procédure d'essai du cigare [49].	44
Figure 27. Procédure d'essai de la pastille [13].	45
Figure 28. Essai de sédimentation.	46
Figure 29. Essai de la boîte.	47
Figure 30. Etat de consistance d'un sol.	49
Figure 31. Appareil de Casagrande.	49
Figure 32. Essai de mesure de Bleu de méthylène.	51
Figure 33. Ordres de grandeur.	51
Figure 34. Principales étapes de l'essai au Pycnomètre.	53
Figure 35. Situation de la carrière dans la province de Khénifra et dans le Maroc.	62
Figure 36. Courbe granulométrique de la terre utilisée, courbe idéale et les fuseaux limites (Inférieur et Supérieur).	64
Figure 37. Carte de plasticité et la valeur expérimentale.	65
Figure 38. Mesure du PH à l'aide d'un PH-mètre.	66
Figure 39. Palmier Nain de la région de Béni Mellal-Khénifra.	67
Figure 40. Eau utilisée pour les préparations.	70
Figure 41. Appareil pour la réalisation des essais mécanique.	71
Figure 42. Essai de flexion en trois points.	72
Figure 43. Valeurs de la conductivité thermique de certains matériaux du bâti [103].	75
Figure 44. Principe de mesure à l'aide d'un fil chaud [95].	76
Figure 45. Appareils CT-mètre utilisé.	77
Figure 46. Différentes étapes de la fabrication de la presse manuelle pour la confection de BTC.	82
Figure 47. (a) Schéma du moule pour confectionner des BTC (b) Moule pour la méthode statique	82
Figure 48. Eprouvettes confectionnées.	83
Figure 49. Histogramme de la résistance à la compression humide des blocs avec ajout de chaux en fonction de la durée de cure.	85
Figure 50. Histogramme de la résistance à la compression sèche des blocs avec ajout de chaux en fonction de la durée de cure.	85
Figure 51. Histogramme de la résistance à la compression sèche et humide des blocs de terre avec ajout de 10% de chaux et de fibres à 28 jours de cure au laboratoire.	86
Figure 52. Résistance sèche à la flexion en trois points des blocs en sol plus 10% de chaux et de fibres à 28 jours de cure au laboratoire.	87

Figure 53. Variation de l'adsorption totale des blocs en terre avec ajout de 10% de chaux et fibre à 28 jours de cure au laboratoire. ....	88
Figure 54. Résistance de compression à 28 jrs de cure en rapport avec le taux de chaux et des méthodes de compactage (statique ou manuel). ....	89
Figure 55. Résistance à la compression à 28 jrs de cure en rapport avec le taux de ciment et des méthodes de compactage (statique ou manuel). ....	89
Figure 56. Influence de la longueur 0.1 cm et le taux de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5 MPa). ....	90
Figure 57. Influence de la longueur 1cm et le taux de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5 MPa)...	91
Figure 58. Influence de la longueur 3 cm et la taux en fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5MPa)....	91
Figure 59. Influence de la longueur 0.1 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).....	92
Figure 60. Influence de la longueur 1 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).....	92
Figure 61. Influence de la longueur 3 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).....	93
Figure 62. Influence de la longueur 0.1 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).....	93
Figure 63. Influence de la longueur 1 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).....	94
Figure 64. Influence de la longueur 3 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).....	94
Figure 65. Influence de la longueur et de la teneur en fibres sur la conductivité thermique à 28 jours en fonction de 12 % de ciment (pour une contrainte de compactage de 5 MPa). ....	95
Figure 66. Influence de la longueur et de la teneur en fibres sur la conductivité thermique à 28 jours en fonction de 10% de chaux (a) (pour une contrainte de compactage de 5 MPa). ....	95
Figure 67. Influence de la longueur et la teneur de fibres sur la résistance thermique à 28 jours en fonction de 12% de ciment (pour une contrainte de compactage de 5 MPa). ....	97
Figure 68. Influence de la longueur et la teneur de fibres sur la résistance thermique à 28 jours en fonction de 10% de chaux (pour une contrainte de compactage de 5 MPa). ....	97

# *Liste des tableaux*

---

Tableau 1. Classification des principaux minéraux argileux et des phyllosilicates [27]. .....	11
Tableau 2. Classification des tailles des fractions des grains des sols. ....	15
Tableau 3. Liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF EN 197-1. ....	22
Tableau 4. Les principales compositions chimiques des fibres les plus utilisées. ....	25
Tableau 5. Les propriétés physico-mécaniques pour quelques fibres végétales. ....	25
Tableau 6. Comparaison du BTC avec d'autres matériaux de construction [13 ; 68 ; 69].....	41
Tableau 7. Composition du matériau terre [13]. ....	43
Tableau 8. Propriétés géotechniques du sol utilisé. ....	63
Tableau 9. Compositions chimiques élémentaires du sol utilisé dans la fabrication des BTC (%). ....	66
Tableau 10. Compositions minéralogiques du sol utilisé dans la fabrication des BTC (%). ...	66
Tableau 11. Caractérisations physiques et mécaniques des fibres de Palmier Nain. ....	67
Tableau 12. Composition chimique des fibres (%). ....	68
Tableau 13. Les propriétés physiques et chimiques de la chaux utilisée dans la fabrication des BTC (%). ....	68
Tableau 14. Compositions chimiques du ciment (en pourcentage). ....	69
Tableau 15. Codes des mélanges des BTC stabilisés et / ou renforcés .....	80

# Notations, Symboles et Unités

ASTM	American Society for Testing and Materials
AFNOR	Association française de normalisation
NF P	Norme Française Bâtiment, génie civil
CRATerre	Centre international de la construction en terre, créée en 1979
ONG	Organisation Non Gouvernementale
A.S.T.M.	American Society for Testing and Materials
CDE	Centre pour le développement de l'entreprise
$R_{CH}$ (MPa)	Résistance à la compression humide
$R_{CS}$ (MPa)	Résistance à la compression sèche
BTC	Blocs de Terre Comprimée
BTCS	Blocs de Terre Stabilisée
BTCF	Bloc de terre comprimée à base de la chaux et des fibres
SCLF	Bloc constitue du sol, de ciment ou de chaux et des fibres
ATE	Absorption totale à l'eau
$I_p$	Indice de plasticité
$w$ (%)	La teneur en eau : rapport du poids d'eau au poids de sol sec
$D$ (mm)	Diamètre des grains
$w_l$ (%)	Limite de liquidité
$w_p$ (%)	Limite de plasticité
$m$ (kg ou g)	Masse
$w_{opt}$ (%)	La teneur en eau optimale
$\gamma_{dmax}$ (g/m <sup>3</sup> )	La masse volumique apparente sèche optimum
$G$ (Mpa)	Module de cisaillement
$E$ (Mpa)	Module d'Young
$V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume total
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique totale
$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique des grains solides
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique sec (après expulsion de l'eau libre)
$V_s$ (cm <sup>3</sup> )	Volume des grains solides
$\gamma_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique de l'eau égale à 0,981 g/cm <sup>3</sup>
$V_w$ (cm <sup>3</sup> )	Volume de l'eau
$I_c$	Indice de consistance
VBS	Valeur du bleu de méthylène
Ca	Coefficient d'activité
$\alpha$	Coefficient en fonction de la vitesse d'air
$R_{th}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	Résistance thermique
$e$ (m ou cm)	Epaisseur
$\lambda$ (W/m.K ou W/m.C°)	Conductivité thermique du matériau
$R_c$ (MPa)	Résistance à la compression
$R_T$ (MPa)	Résistance à la traction
$F$ (KN)	Force
$L$ (m ou cm)	Longueur
$S$ (m <sup>2</sup> ou cm <sup>2</sup> )	Surface
$h$ (m ou cm)	Hauteur

t (s)	temps
T (K ou C°)	Température

# *Table des matières*

Dédicace .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iv
Abstract .....	v
Liste des figures .....	vi
Notations, Symboles et Unités .....	x
Table des matières .....	xii
Introduction générale.....	2
Partie 1. Étude bibliographique et état de l'art.....	6
Chapitre 1. Généralités sur la construction en terre .....	6
1.1. Introduction.....	6
1.1. Matières premières et caractérisations .....	7
1.1.1. Matériau terre .....	7
1.1.2. Chaux.....	17
1.1.3. Ciment .....	19
1.1.4. Fibres .....	22
1.2. Stabilisation du matériau terre .....	27
1.2.1. Technique mécanique de stabilisation.....	27
1.2.2. Technique physique de stabilisation.....	28
1.2.3. Technique chimique de stabilisation .....	30
1.3. Techniques de construction en terre .....	34
1.4. Conclusion .....	38
Chapitre 2. Généralités sur les blocs de terre comprimée .....	40
2.1. Introduction.....	40
2.2. Définition .....	40
2.3. Différentes géométries des blocs de terre comprimée .....	42
2.4. Choix du matériau terre .....	43
2.4.1. Les principaux tests réalisés sur terrain.....	43
2.4.2. Principaux tests réalisés au laboratoire.....	47
2.5. Production des BTC.....	54
2.5.1. Modes de compression .....	54

2.5.2.	Types de presses .....	55
2.6.	Avantages des blocs de terre comprimée (BTC) .....	57
2.7.	Conclusion .....	58
Partie 2.	Études fondée sur des expériences .....	61
Chapitre 3.	Matériaux et procédures expérimentales .....	61
3.1.	Introduction.....	61
3.2.	Caractérisation des matières premières utilisés dans la confection des BTC .....	61
3.2.1.	Sol.....	61
3.2.2.	Fibres de Palmier Nain/Doum .....	67
3.2.3.	Chaux.....	68
3.2.4.	Le ciment .....	69
3.2.5.	Eau de gâchage .....	69
3.3.	Méthodes de caractérisation des blocs de terre comprimée (BTC) : .....	70
3.3.1.	Essais de résistance à la compression $R_c$ .....	70
3.3.2.	Essais de la résistance à la traction $R_T$ due à la flexion en trois points .....	72
3.3.3.	Essai d'humidification - séchage ou cycle de mouillage séchage alterné .....	73
3.4.1.	Propriétés thermiques .....	73
3.4.	Processus de production des blocs de terre comprimée (BTC) : .....	78
3.4.1.	Décapage .....	78
3.4.2.	Extraction.....	78
3.4.3.	Stockage et Séchage .....	79
3.4.4.	Tamissage.....	79
3.4.5.	Mélange, compactage et cure des blocs de terre comprimée.....	79
3.5.	Conclusion .....	83
Chapitre 4.	Interprétation des résultats et discussion .....	84
4.1.	Introduction.....	84
4.2.	Interprétation des résultats .....	84
4.2.1.	Effet du temps de cure sur les résistances mécaniques des BTCS .....	84
4.2.2.	Effet du taux de fibres sur les résistances mécaniques des BTCS.....	86
4.2.3.	Influence de la teneur en fibres sur l'absorption totale (ATE).....	87
4.2.4.	Effet de la méthode de compactage sur la RC simple de BTCS .....	88
4.2.5.	Effet de la longueur des fibres sur la résistance mécanique des BTCS.....	90
4.2.6.	Effet de la longueur des fibres sur la conductivité thermique de BTCS .....	95

4.2.7. Effet de la longueur des fibres sur la résistance thermique des BTCS .....	97
4.3. Conclusion .....	98
Conclusion générale .....	101
Bibliographie .....	105

# *Introduction générale*

## ***Introduction générale***

---

Partout dans le monde, les populations ont construit, adapté et évolué leurs habitats. Elles devaient satisfaire au mieux leurs besoins, intérêts et aspirations. En effet, les sociétés se sont, toujours, appliquées à mettre en œuvre leurs capacités et leur savoir-faire pour assurer des confort dans leurs habitats. Dans ce système de vie, on a élaborées plusieurs normes et réglementations de construction. Les normes énergétiques ont permis l'amélioration de l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments en réduisant la consommation d'énergie. On observe, alors, une exigence croissante en matière d'économie d'énergie, d'isolation thermique du bâtiment et des comportements écologies.

Ces derniers siècles, l'humanité a connu un développement technologique qui a rendu possible pour les populations actuelles à avoir à leur disposition plusieurs matériaux de construction qu'il n'a jamais connues dans le passé. Actuellement, on observe une tendance croissante à la construction en matériaux locaux dans tous les pays du globe [1], notamment au Maroc. L'utilisation de terre crue compressée comme matériau local est l'une des possibilités de construction dans ce sens [2]. La disponibilité du sol crue et son faible coût de revient sont parmi les avantages que nous pouvons souligner, dans la plupart des régions du monde. La terre est l'un des matériaux de construction les plus vieux. Ecologiquement, elle est, clairement, la plus convenante dans le bâti. Elle contribue, aussi, dans la préservation des ressources environnementales et dans la diminution de l'utilisation des énergies en comparaison avec les produits industriels (ciment, acier etc.) [3] et [4]. Pittet et al [5], ont démontré dans une étude comparative entre les différentes technologies de construction (terre, béton, brique et pierre) les avantages économique et environnemental du matériau local. Ils ont montré que l'utilisation du matériau terre tels que l'adobe et le torchis réduit visiblement la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>. Une étude a comparé le comportement thermique d'habitats en bois, en pierre et en pisé, sous le climat d'Espagne et a montré que le bien être interne le plus confortable était obtenue avec le pisé comme matériau de construction [6].

Par ailleurs, la terre comme matériau de construction a une faible résistance mécanique et est sensible à l'action de l'eau. Pour remédier à ces problèmes, la stabilisation de la terre est l'un des moyens le mieux indiqué. En effet, cette stabilisation peut être physique par la

modification des propriétés des sols en corrigeant la granularité pour améliorer les caractéristiques du matériau. Selon les cas, les mélanges obtenus peuvent conduire soit à :

- La diminution de l'indice de plasticité du matériau de base, soit à lui donner une certaine cohésion.
- L'amélioration de certaines propriétés comme les propriétés mécaniques, les propriétés thermiques et la durabilité de la construction en terre.

La modification de la densité naturelle de la terre, par compactage (manuel, statique ou dynamique) améliore la stabilisation des blocs de terre comprimée et réduit, essentiellement, la porosité du matériau par resserrement des particules. L'augmentation de cette stabilité à l'eau est assurée par la stabilisation chimique (ajout de ciment ou de chaux) [7, 8, 9].

Des études conduites sur les BTC, ont montré, dernièrement, que l'introduction de fibres naturelles dans les mélanges, diminue les dimensions des fentes de rétrécissement, augmente la longévité et l'endurance à la traction [10].

Ces études ont, aussi, montré que l'ajout de fibres naturelles diminue la conductivité thermique des matériaux composites [11].

Dans sa recherche, Y. Jamil [12] a montré, que dans certaines limites, l'ajout progressif de fibres d'Agave sisal et de teneurs en ciment dans les mélanges, permet d'observer une évolution significative des performances mécaniques. Cette étude a montré aussi, qu'au-delà de ces valeurs limites, l'ajout de dérivés de sisal influence négativement sur la résistance des BTC.

Rigassi et sans donner de justifications, avance que l'addition de matière végétale dans les matériaux des BTC est incompatible avec le mode de compactage. Le mélange devient trop élastique [13].

Dans cette thèse, notre travail a porté sur des blocs de terre comprimée. Pour cela, nous avons adopté un compactage statique comparé à un compactage manuel. Nous avons étudié le comportement thermomécanique et la sensibilisation de ces blocs à l'eau. Nous nous sommes intéressés à mettre en évidence l'effet des ajouts de fibres de Palmier Nain ou/et un liant (ciment ou chaux) sur les propriétés des BTC.

Cette thèse comporte une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale. Les quatre chapitres sont divisés en 2 parties :

La 1<sup>ère</sup> partie est réservée à une étude bibliographique et de l'art, elle se compose de 2 chapitres, à savoir :

- Chapitre 1 : Il présente une synthèse de la bibliographie, dans le but d'afficher une idée globale sur les constructions à base de sol et les différentes techniques utilisées. De plus, on s'est intéressé à l'étude des différents matériaux utilisés dans ces techniques, on distingue : la terre, la chaux, le ciment et les fibres. Dans cette section on développera, aussi, les études précédentes effectuées sur l'influence des ajouts (liants et/ou fibres) dans le mélange terre-eau sur les caractéristiques thermomécanique et la solidité des constructions en matière locale.
- Chapitre 2 : Il est consacré à une revue de la littérature, afin d'élaborer une idée complète sur les blocs en terre comprimée (BTC). Nous présentons, essentiellement, les différents géomètres de ces blocs. Ensuite, des essais de terrain et de laboratoire sont détaillés. Ces essais donnent des indications sur le choix du matériau terre pour la fabrication de blocs. Ce chapitre traite, aussi, les différents types et méthodes de compactage suivi d'une présentation sur les avantages des blocs de terre comprimée.

La seconde partie est destinée à l'analyse des expériences, elle est divisée en deux chapitres, à savoir :

- Chapitre 3 : il traite les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des matériaux entrant dans la fabrication des blocs et leurs origines. Il traite, aussi, les méthodes et techniques utilisées dans cette thèse ainsi que les processus de fabrication et les techniques de conservation de ces blocs.
- Chapitre 4 : Il fait le point sur les aboutissements de nos travaux expérimentaux et apporte les éclaircissements nécessaires sur cette étude.

*Étude bibliographique  
et état de l'art*

# ***Partie 1. Étude bibliographique et état de l'art***

---

## **Chapitre 1. Généralités sur la construction en terre**

### **1.1. Introduction**

La terre est, généralement, un matériau hétérogène ses caractéristiques sont variables. C'est un matériau disponible en grande quantité. Depuis les temps les plus reculés, la terre a été, toujours, utilisée dans les constructions. Elle permet de construire des édifices simples ou monumentaux et dans des conditions variées. Elle peut être utilisée sous différentes formes : pisé, torchis, adobe ou encore briques de terre comprimée.

Cependant, à cause de sa moindre portance et sa faible longévité au contact de l'eau, lorsque la terre est utilisée seule, elle rencontre des difficultés à cause de sa friabilité et sa fragilité dans le temps. En effet, pour parer à cette défaillance de la terre, des recherches ont été menées dans le but de trouver des techniques permettant d'améliorer la performance des sols destinés à la construction. On peut citer deux catégories de techniques :

- La technique permettant de renforcer la performance en compression, en traction, en flexion et en retrait par l'ajout de fibres naturelles [14,15].
- La technique permettant de renforcer la stabilisation mécanique et la durabilité par des ajouts chimiques (ciment et/ou chaux) [16].

Il faut noter que dans sa forme naturelle, le sol présente de nombreux atouts pour construire des logements durables, confortables et économiques [17].

Dans ce chapitre nous affichons les informations recueillies qui concernent :

- Les différents matériaux utilisés dans l'édification d'ouvrages en sol ;
- Les différentes techniques de structure en matériaux locaux ;
- Les différentes techniques d'amélioration des sols, elles sont classées comme méthodes mécaniques, hydriques et thermiques.

## 1.1. Matières premières et caractérisations

### 1.1.1. Matériau terre

Sachant que la terre est au cœur de cette étude, nous la définissons de manière simple, comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface du globe terrestre. Elle supporte les végétaux, les êtres vivants et leurs ouvrages.

La terre a une architecture issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération pendant de longues périodes géologiques. A travers les temps, les particules de roches solides se désintègrent progressivement pour former des grains de plus en plus fins (les sédiments) sous l'effet des agents de l'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil, ou le gel.

Les matières organiques présentes dans le sol favorisent, également, sa dégradation [18]. Les niveaux superficiels des sols qui peuvent être utilisés pour la construction sont constitués de terre meuble contenant peu de matière organique [17].

La partie mécanique des sols est constituée des matières minérales qui proviennent de l'altération de la roche mère. Ce sont des fragments de la roche initiale et des minéraux silicatés ou calcaires. Ceux-ci forment le matériau principal de construction que l'on nommera terre crue pour la suite. Les éléments minéraux sont, généralement, majoritaires dans le sol. Selon leur état, on peut les classer en deux sous-catégories [19] :

- Minéraux non dégradés : semblables à la roche mère, ils sont constitués de graviers, de sable et de silts.
- Minéraux dégradés : ils ont été fortement fragmentés et forment, par leur taille réduite ( $2\mu\text{m}$ ), une pâte collante en présence d'eau. On les dénomme colloïdes, vu la propriété collante qu'ils donnent à la terre. Ils sont, principalement, constitués d'argiles.

Ainsi, la terre mélangée à l'eau et grâce aux capacités liantes des argiles qui la constituent, offre des possibilités de réemploi infinies. Cette faculté a contribué, fortement, à l'utilisation en masse de ce matériau par nos ancêtres. Souvent, la terre a été, toujours, le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze, des tronçons de la muraille de Chine (Figure I.2a) en présente une illustration. On peut citer aussi d'autres exemples d'architectures remarquables en terre qui sont présents sur tous les continents : Kasbah Ait Ben Haddou au Maroc (Figure I.2b), pyramides en Égypte (pyramide d'El-Ahoun (Figure I.2c) par exemple), l'arche de Ctésiphon en Irak (Figure I.2d), la

Ziggourat d'Etemenanki à Babylone (Figure I.2e) et la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Figure I.2f).



**Figure 1.** Exemples de Constructions en terre dans le monde.

La terre est utilisée sur tous les continents comme matériau de construction depuis plus de onze millénaires comme on peut le voir sur cette carte réalisée par le CRATerre :



**Figure 2.** Carte du monde : utilisation de la terre en architecture [20].

Selon le CRATerre, on considère qu'environ 1.5 milliards de la population mondiale vit dans des habitats construits en terre, c'est environ 30% de la population. Pour les pays en voie de développement, la répartition est comme suit :

- Dans les zones rurales, environ 50% de la population vit dans des habitats en terre ;
- En région urbaine, environ 20% des citoyens vit dans des bâtiments en terre ;

Comme illustration, on peut citer qu'en Inde, le recensement de 1971 indiquait un parc immobilier construit à 72% en terre.

Selon de nombreuses études on estime qu'au minimum le tiers des peuples, à l'échelle universelle, vit dans des habitations en sol [21]. En effet, l'Auroville Earth Institute, estime à

environ 1,7 milliards d'habitants qui résident dans un bâtiment en terre. Les œuvres architecturales construites en terre et titrées comme richesse immatérielle universelle par l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO) sont estimées à 17 % [20].

#### 1.1.1.1. Argile

Les argiles sont des grains de minéraux microscopiques, elles ont des caractéristiques chimiques et physiques différentes des silts, sables et graviers. Les argiles font partie des colloïdes et sont, extrêmement, importants pour la cohésion des sols. Elles proviennent de l'altération chimique puis de la dégradation physique et mécanique de certains minéraux composant la roche. Elles sont constituées de lamelles plates, cette morphologie explique leur importante surface spécifique.

A travers les temps, les argiles ne cessent d'évoluer géologiquement. Elles passent d'un minéral argileux à un autre et changent de propriétés initiales en fonction de l'environnement. Elles ont une structure microscopique qui se présente en feuillet (groupe des phyllosilicates).

Pour se fixer sur l'utilisation de ce matériau, on est amené à étudier ses propriétés physiques telles que la plasticité et la structure cristallographique etc....

A l'état naturel, l'argile est souvent composée de plusieurs minéraux. Elle représente, fréquemment, un ensemble de minéraux de la famille des silicates. Elle prend le nom du minéral de grande quantité [22].

Dans une argile, on rencontre, toujours, plusieurs associations minérales, à citer :

- Les Carbonates tels que la Dolomite, la Diobertite, la Calcite, l'Aragonite, etc. ;
- La Silice, exemple le Quartz, la Cristobalite, la Tridymite ;
- Les Oxydes et les Hydroxydes d'Aluminium à titre d'exemples, le Corindon, la Gibbsite, le Diaspore, etc. ;
- Minéraux riches en fer comme la Lépidocrocite, la Maghémite etc.

On définit, donc, l'argile comme un assemblage minéralogique renfermant plusieurs autres minéraux et altérations tels le Feldspaths, l'Oxyde de Fer, le Quartz, le Titane, etc, en plus d'autres constituants comme des impuretés (Oxyde de fer titane etc.). Les argiles sont caractérisées par leur facilité à être modelées avec des particules d'une grosseur ne dépassant pas 2  $\mu\text{m}$  [23].

### a. Structure et Classification des minéraux argileux

La cristallite est l'unité de base qui constitue le minéral d'argile, elle est décomposée en deux parties :

- Une première partie composée de feuillets ;
- Une deuxième partie constituée d'inter-feuillets qui peut être occupé par des cations, de l'eau, des cations qui peuvent être hydratés, des composés organiques ou des feuillets entiers... .

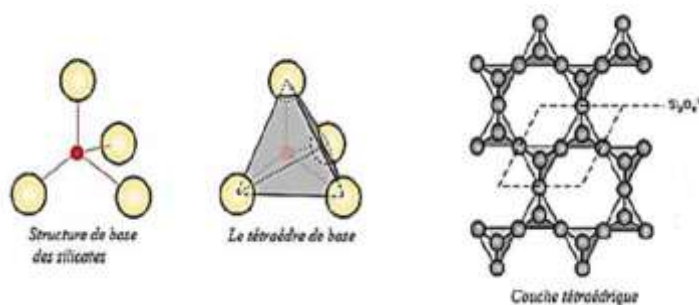
Les feuillets-espace et les inter-feuillets sont, donc, l'ensemble qui forme l'unité structurale. On appelle distance basale, l'épaisseur de l'unité structurale, c'est une caractéristique essentielle des minéraux argileux [24].

L'argile est constituée de feuillets composés de deux ou trois couches cristallisées superposées. Le grain d'argile est un ensemble de feuillets avec des liaisons plus ou moins fortes.

Le feuillet est composé de trois ou quatre plans d'anions tels que l'oxygène  $O^{2-}$  ou l'hydroxyle  $OH^-$  entre lesquels s'intercale de petits cations de silicium, d'aluminium et de magnésium. L'épaisseur du feuillet est de moins d'un nanomètre. La charge nette du feuillet dépend des proportions d'anions et de cations.

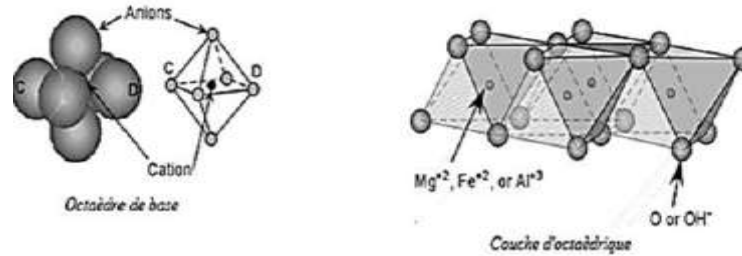
La couche est constituée de plusieurs feuillets superposés. L'ensemble de couches constitue le cristal. Les minéraux argileux se distinguent par le mode d'assemblage de deux couches : la couche tétraédrique (notée T ou Te) et la couche octaédrique (notée O ou Oc).

- **La couche tétraédrique (T)** (Figure3) à base de tétraèdres composée de quatre anions d'oxygène ( $O^{2-}$ ) sur les sommets qui entourent un cation de silicium ( $Si^{4+}$ ).



**Figure 3.** Couche tétraédrique [25].

- **La couche octaédrique (O)** (Figure 4) à base d'octaèdres avec, sur les sommets des groupements hydroxyles  $\text{HO}^-$  et au centre soit un ion aluminium  $\text{Al}^{3+}$  (on parle ici de gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ou un ion magnésium  $\text{Mg}^{2+}$  (on parle alors de brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ).



**Figure 4.** Couche octaédrique [25].

Différentes classifications de minéraux argileux ont été proposées dans la mesure où elles peuvent faire intervenir plusieurs critères. La classification adoptée par Le comité de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA, 1966-1972), s'appuie les variations des charges de bordures du feuillet et le nombre d'atomes en couche à 8 faces. Plus tard, les classifications de (Pédro, 1994) [26], qui considère le positionnement des substituants leur répartition et le type de cations compensateurs (Tableau 1).

**Tableau 1.** Classification des principaux minéraux argileux et des phyllosilicates [27].

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèce	Formule
1 : 1	Kaolinite	Kaolinites	Dickite Nacrite Kaolinite Metahalloysite Halloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
		Serpentines	Antigorite	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
2 : 1	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		Talc	Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Smectites	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$\text{Mg}_3\text{Si}_{3,67}\text{Al}_{0,33}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Vermiculites	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(\text{Al,Fe}\dots)_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(\text{Mg,Fe}\dots)_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Micas	Micas dioctaédriques	Muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	
	Micas trioctaédriques	Phlogopite	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	
2 : 1 : 1	Chlorites	Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$\text{Al}_4(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
		Chlorites trioctaédriques	Espèces différentes	$(\text{Mg,Fe}\dots)_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Il existe plusieurs classifications des argiles, la plus commune est fondée sur la grosseur et la composition du feuillet, on peut isoler quatre types de minéraux :

- **Type 1:1 (feuillelet = couche T + couche O) :** l'épaisseur du feuillelet est d'environ sept Angström. Entre deux feuillelets s'intercale une liaison de type Hydrogène.
- **Type 2:1 (feuillelet = couche T + couche O + couche T) :** Le feuillelet a une épaisseur avec une équidistance caractéristique qui varie de 9.4 Å à 15 Å en fonction du contenu de l'inter-feuillelet. Les feuillelets sont constitués par la succession de quatre couches d'oxygène. les groupes du talc, des smaltites, des vermiculites et celui des micas correspondent à ce type.
- **Type 2:1:1 (feuillelet = couche T + couche O + couche T + couche O) :** L'épaisseur du feuillelet est d'environ quatorze Angström. Le groupe des chlorites correspond aux feuillelets qui sont constitués par la succession de six couches d'oxygène.
- **Minéraux inter-stratifiés :** C'est un assemblage minéral d'argiles qui peut être régulier ou irrégulier. Le feuillelet a une épaisseur variable.

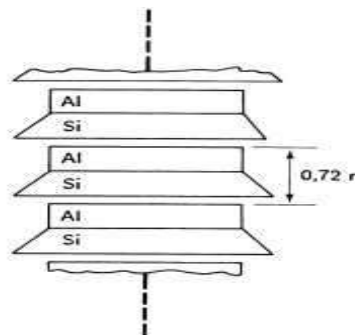
### b. Principaux types d'argiles

Les argiles sont subdivisées en de nombreuses familles. Elles regroupent 10<sup>aine</sup> de types. Cependant 3 principales espèces sont les plus fréquentes dans les sols : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

#### ➤ La Kaolinite :

Ce sont des argiles dioctaédriques (type T-O). Le feuillelet de kaolinite est neutre car la charge négative de la charpente anionique est, entièrement, compensée par la charge positive des cations Tétraédriques et octaédriques. Les liaisons Hydrogène permettent la jonction entre les couches des feuillelets argileux dont l'épaisseur est comprise entre 7 Å et 7,4 Å [28].

La formule chimique simplifiée de la kaolinite est  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  par demi-maille [29]. L'espace inter-foliaire ne comporte pas d'éléments chimiques supplémentaires. Quand l'argile est sablonneuse, l'absorption d'eau n'est possible qu'à travers les parois des grains, et par conséquent, ce sol n'est gonflant.



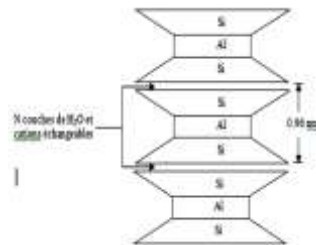
**Figure 5.** Schéma de la structure de la Kaolinite [30].

### ➤ La Montmorillonite :

Le feuillet de la Montmorillonite est constitué des couches T-O-T dont l'épaisseur est variable entre 9,6 et 15 Angström et dépend du cation compensateur et de l'hydratation de l'espace inter-foliaire.

- Lorsque le cation Calcium domine dans la structure, l'espèce est dite Calcique. Ce cation échangeable procure des caractéristiques de gonflement inférieur au cation Sodique [31].
- Si le cation Sodium est prédominant, il donne son nom à l'espèce (Sodique).

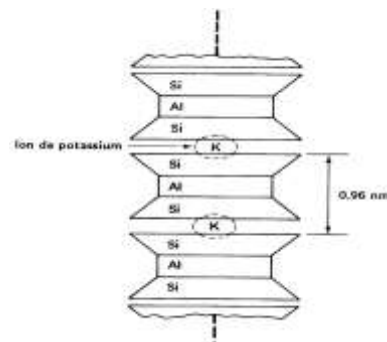
La figure 6 schématise le feuillet de la Montmorillonite, il est formé d'une succession de deux couches de Silice (type T) qui encadrent une couche d'Alumine (type O). Cette espèce est très sensible à l'eau, c'est-à-dire, elle gonfle par adsorption.



**Figure 6.** Schéma de la structure de la montmorillonite [30].

### ➤ L'Illite :

Le feuillet élémentaire de L'illite est de type 2:1 (T - O - T). Son épaisseur est fixe à 9,6 Angström. La figure 7 décrit que le feuillet de l'Illite est constitué d'une couche d'Alumine intercalée entre deux couches de Silice et ion de Potassium ( $K^+$ ) qui compense la charge négative et qui s'interpose entre les feuillets et les lie fortement, ainsi, l'Illite est imperméable à l'eau. Cette propriété lui attribue une moindre capacité de gonflement comparé à la Montmorillonite.



**Figure 7.** Schéma des feuillets de l'Illite [30].

### 1.1.1.2. Propriétés du matériau terre en construction

Les propriétés de la terre (physiques, géotechniques, chimiques et minérales) changent en fonction de sa composition granulaire. En général, le composant le plus représentatif d'un matériau sol détermine ses caractéristiques essentielles et organise son comportement, à titre d'exemple, on cite les caractérisations suivantes :

- Chimiques en rapport avec la contenance en Sels d'Oxydes de Carbonates, en Oxydes liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates ;
- Physiques, elles sont diverses à savoir : la stabilité de la structure, la masse volumique apparente, la couleur, l'adhérence, la teneur en eau, la porosité, le pouvoir absorbant, et d'autres.

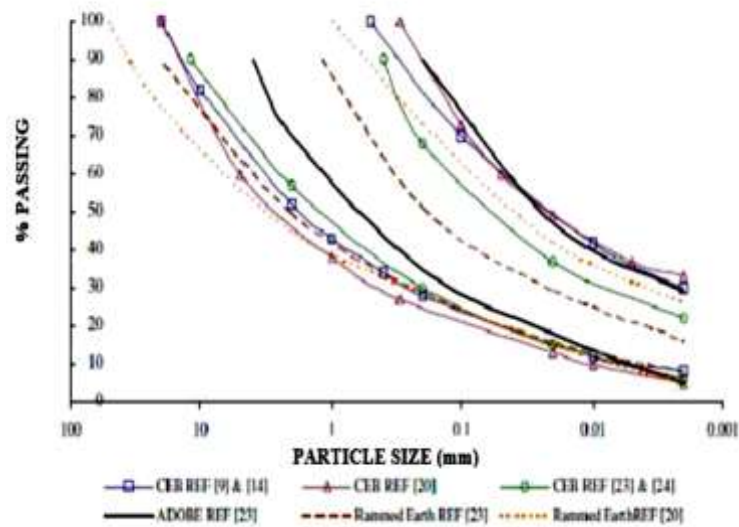
Cependant, pour construire avec un sol, il est préférable d'étudier ses caractères chimiques et physiques. Ainsi, on peut déterminer sa qualité et son comportement dans l'utilisation en bâtiment [29]. Mais il n'est pas toujours nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des propriétés chimiques et physiques du sol. En fait, il est nécessaire de connaître quatre caractéristiques fondamentales de la terre [32], à savoir :

#### ➤ Granularité :

Pour étudier la granularité d'un sol, on procède de deux manières complémentaires :

- Analyse granulométrique par tamisage du sol ;
- Analyse sédimentométrique du sol.

Les sols ont des composants qui les différencient l'un de l'autre. Les éléments principaux de ce matériau sont le sable, les graviers (squelette), le limon et les argiles ; ces derniers lient l'ensemble des constituants et garantissent la plasticité. Les argiles sont responsables du comportement du sol en présence d'eau ; par conséquent elles organisent le gonflement et le rétrécissement [33]. En effet, la granulométrie du sol destinée à la construction en terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture qui suit et dont elle épousera l'allure générale (Figure 8). Les limites du fuseau sont recommandées par CRATerre. De plus, les sols dont la texture est inscrite dans le fuseau recommandé, donnent dans la plus part des cas des résultats satisfaisants en termes de résistance. Par ailleurs, les sols dont la texture n'est pas inscrite dans le fuseau peuvent, quand même, donner des résultats acceptables, mais il est recommandé de les soumettre à un ensemble d'essais permettant de vérifier leur aptitude à être destiné à la construction.



**Figure 8.** Courbes des tailles des particules des sols utilisés pour le bâtiment en fonction des techniques pratiquées [34].

Le tableau 2 suivant donne les grosseurs des particules telles que recommandées par de nombreux laboratoires comme référence aux normes A.S.T.M et AFNOR [17].

**Tableau 2.** Classification des tailles des fractions des grains des sols.

Particules	Cailloux	Graviers	Sables grossiers	Sables fins	Silts	Silts fins	Argiles
Taille (mm)	200 - 20	20 - 2	2 - 0,2	0,2 - 0,06	0,06 - 0,02	0,02- 0,002	0,002 - 0

### ➤ Plasticité :

On peut définir la plasticité d'un sol comme étant la réaction de ses fines particules au contact de l'eau qui se positionne entre l'état solide et l'état liquide. Atterberg a mesuré les limites de la consistance des sols fins, il s'agit de : la limite de liquidité ( $w_L$ ), la limite de plasticité ( $w_P$ ) et l'indice de plasticité ( $I_P$ ). La plasticité permet de travailler la terre hydratée à l'eau tout en maintenant sa consistance (ne s'effrite pas, ne casse pas).

Les limites d'Atterberg sont parmi les caractéristiques principales qui sont pratiquées pour classer les sols. Elles permettent, aussi, de maîtriser l'effet de la compression sur les sols et leur réaction dans les composés de sols [35]. La plasticité de la terre sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité qui est représenté sur la Figure 9. Les limites de ce fuseau sont recommandés par CRATerre et la norme française XP P13-901 [36].

Les sols dont la plasticité est inscrite dans le fuseau recommandé donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Cependant, Pour les sols (grossiers ou fins) qui renferment un faible taux d'argile, lorsqu'on dépasse la limite de plasticité en ajoutant peu d'eau, les particules ne sont plus attirées l'une vers l'autre (rupture des forces d'attraction), le sol se désintègre au moindre écrasement. Inversement, pour les sols qui ont une forte teneur en argile, ils continuent à être consistants même avec l'ajout d'un important volume d'eau. Les forces qui attirent les particules entre elles ne cèdent pas sous l'effet d'un écrasement (indice de plasticité élevé). Indirectement, l'indice de plasticité est un paramètre qui permet de quantifier le taux d'humidité de l'argile d'un sol.

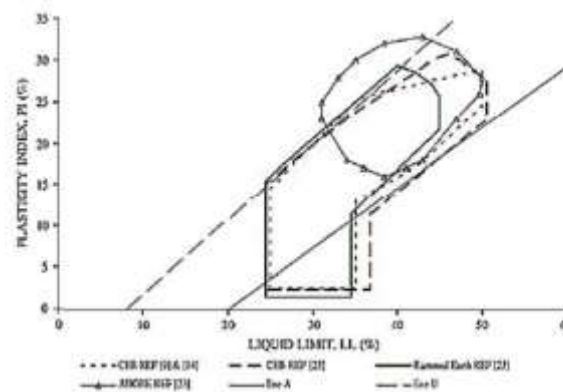


Figure 9. Fuseau du diagramme de plasticité des terres [34].

### ➤ La compressibilité :

C'est le comportement d'un sol sous l'influence d'un maximum de forces de compactage avec un pourcentage d'humidité déterminé ( $\omega_{opt}$  : teneur en eau optimale).

Les sols diminuent de volume au compactage, comprimés, les vides de ces matériaux sont comblés de matière. On en déduit que la porosité décroît à l'inverse de la densité qui s'accroît, par conséquent devient imperméable à l'eau. L'imperméabilité est le résultat de deux phénomènes : rapprochement des particules et diminution de la tortuosité des vides. Dans la plus part du temps, les sols ont, nécessairement, besoin d'être lubrifiés avec une quantité d'eau ce qui permet le réarrangement des particules et de ce fait elles occupent moins d'espace. En revanche, le pourcentage d'eau ne doit pas, non plus, être trop important car lors du compactage le volume des vides diminuent entraînant l'expulsion de l'air et une augmentation du degré de saturation. Les vides remplis d'eau sont alors difficilement compressibles.

L'essai Proctor, est l'une des méthodes les plus adaptées pour mesurer la compressibilité d'un sol légèrement humidifié, il permet, aussi, de juger son aptitude au compactage.

➤ **La cohésion :**

La cohésion entre les éléments d'un sol est définie par le pouvoir qu'ont ses constituants à rester solidaires sous l'exercice d'une force de traction. Elle est fonction des propriétés et du comportement des liants permettant de maintenir collés entre eux les grains inertes. L'efficacité des liants est subordonnée au taux et à la capacité de collage des argiles.

**1.1.2. Chaux**

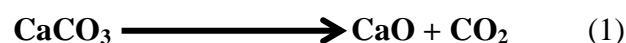
La chaux est un liant qui a pour propriété d'assembler par collage des matériaux inertes. Elle a une influence sur les résistances des mortiers, notamment la résistance à l'écrasement. Elle a été utilisée depuis 6000 ans de façon très constante dans la construction. Jusqu'à la révolution industrielle, elle a été le principal liant de la construction, qu'elle ait été incorporée à des mortiers de hourdage, à des enduits de parement, ou bien utilisée à l'état pur pour lier des peintures ou badigeons. Elle a également servi à réaliser les stucs et les fresques. Elle a donc grandement participé à la solidité et la beauté des édifices, prestigieux ou non, de l'Antiquité à l'époque moderne.

La chaux est obtenue par calcination à une température entre 800° et 1000°C de pierres calcaires réduites en poudre. Ce calcaire qui va être calciné trouve son origine dans les sédiments et dépôts des organismes marins laissés en place, après le retrait des mers dans certaines régions, il y a plusieurs dizaines de milliers d'années. Ce calcaire contient principalement du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), mais aussi de la silice, de l'oxyde de fer, de l'aluminium et d'autres minéraux dans des proportions plus faibles.

Il y a trois grandes familles de chaux (chaux aériennes, chaux naturelles et chaux hydrauliques) qui se différencient par la composition de leur matière première (le calcaire) et leur manière de faire prise, elles sont les suivantes :

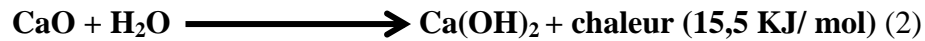
➤ **Les chaux aériennes :**

Elles sont obtenues à partir d'un calcaire très pur, qui, porté à une température d'environ 1000 degré et suite à une réaction chimique se décompose en **chaux vive** (CaO) et en gaz carbonique (Equation 1).



Après cuisson, la chaux vive garde le même aspect physique mais sa masse volumique apparente devient plus faible. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de

chaleur, puis se transforme en une poudre blanche appelée **chaux éteinte** ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Equation 2).



➤ **Les chaux naturelles :**

Elles sont fabriquées à base de calcaire siliceux, elles débutent leur prise au contact de l'eau et finissent de durcir au contact de l'air. Plus réactive, leur résistance augmente dans le temps.

➤ **Les chaux hydrauliques**

Ce sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent.

### 1.1.2.1. Cycle de la chaux

Reprendre leur forme originale : Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive ( $\text{CaO}$ ). La chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans le diagramme ci-dessous, on peut remarquer que le dioxyde de carbone contenu dans les produits dérivés du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) possède la capacité unique d'être transformé et dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Ce cycle de continuité s'appelle le cycle de la chaux (Figure 10).

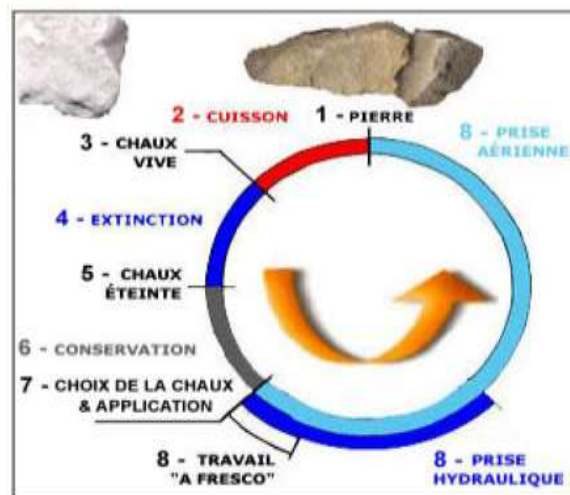


Figure 10. Cycle de la chaux.

### 1.1.2.2. 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 inégalée ;
- Une absorption des CO<sub>2</sub> lors de la carbonisation.

### **1.1.3. Ciment**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. D'un point de vue minéralogique, le ciment peut être définie comme un mélange d'oxyde basique, CaO noté C, et d'oxydes acides ou amphotères comme SiO<sub>2</sub>, noté S, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, noté A, ou Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, noté F, en notation cimentaire.

#### **1.1.3.1. Constituants du ciment**

Le matériau ciment est obtenu comme dérivé d'un ou de plusieurs composants, notamment [37] :

- Clinker :

Il résulte de la calcination à haute température (1450°C) d'un ensemble d'éléments cohérent constitué de calcaire et d'argile, appelé cru. Il entre parmi les composants de tous les ciments fréquents.

- Laitier :

Il est issu du refroidissement rapide de la scorie fondue provenant de la fusion du minerai de fer. Il est utilisé pour la fabrication de ciments entrant dans la composition de bétons devant résister à des environnements agressifs.

- Pouzzolane :

Il est généralement d'origine volcanique, cet élément composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, parfois activé thermiquement, améliore la qualité hydraulique des ciments.

- Cendres volantes :

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

- Schiste calciné :

Ils sont produits dans des fours spéciaux à une température de 800°C. Finement broyés, les schistes calcinés ont de fortes propriétés hydrauliques et pouzzolaniques.

- Calcaire :

Il peut être extrait dans la carrière même de la cimenterie. Il peut rentrer dans des proportions allant jusqu'à 35 % de la masse totale du ciment. De plus, il permet d'éclaircir la couleur de certains ciments et apporte une certaine onctuosité aux mortiers et bétons.

- Fumées de silice :

Elles sont obtenues par broyage de quartz et elles sont des particules sphériques très fines. Leur ajout permet de fabriquer des bétons très performants en termes de résistance.

- Sulfate de calcium :

Il se présente sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) dans des roches sédimentaires. Ajouté à hauteur de 3 à 5 %, il est indispensable à la régulation de la prise.

- Additifs :

Autres constituants servant à améliorer la fabrication du ciment ou ses propriétés. Leur quantité globale ne peut pas dépasser 1 % en masse du ciment. Cette limite est à 0,2 % pour les additifs organiques (extrait sec).

La diversité des composants du ciment permet de proposer différents types de ciment, qui peut être regroupés en deux grandes familles de ciment :

- **Le portland :**

C'est un ciment très consommé à travers le monde et que nous avons employé dans nos recherches. C'est un produit connu et maîtrisé par tous les secteurs de construction du bâtiment. L'utilisation la plus commune du ciment est le béton qui est un mélange d'agrégats de différentes granulométries, sables, graviers, ciment et eau.

Cependant, la fabrication du ciment Portland se fait à partir de la pierre calcaire et de l'argile ou du schiste. Ces matériaux sont extraits des carrières, concassés et stockés, puis l'analyse chimique est faite pour déterminer le dosage des matières premières. Après avoir été dosées, les matières premières sont broyées et mélangées. La poudre ainsi obtenue est extraite dans le bord élevé d'un brûloir rotatif légèrement incliné. Un fourneau est mis au bout le plus bas du four pour que la température soit comprise entre 1450 et 1650 °C. Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme chimiquement les matières premières en clinker de ciment. Le clinker se retrouve à l'état de petites boules ayant un diamètre variant entre 3 et 25 mm. Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on

ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment) pour contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland.

➤ **Les ciments alumineux :**

Ils se composent essentiellement d'alumine et de chaux. Ils ont développés au début du 20<sup>ème</sup> siècle par Bied. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrage d'assainissements ou des mises en service rapides et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière.

### **1.1.3.2. Types de ciments**

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages : Les résistances mécaniques, la résistance à une attaque physique ou chimique ou la mise en œuvre particulière.

Il existe plusieurs types de ciments, ils sont regroupés en 5 catégories principales. Ces différents types de ciments courants proviennent de la quantité de clinker contenu dans le ciment ainsi que des constituants principaux (autres que le clinker), notamment :

- CEM I ou ciment Portland, contient au moins 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
- CEM II A ou B ou Ciment Portland composé, contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants : laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10 %), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires... Les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.
- CEM III A ou B ou ciment de haut-fourneau, contient entre 36 et 80% de laitier de haut fourneau et 20 à 64% de clinker.
- CEM III C ou ciment de haut-fourneau contient au moins 81 % de laitier et 5 à 19 % de clinker.
- CEM IV A ou B est un ciment de type pouzzolanique. Avant l'introduction de la NF EN 197-1, il était connu sous l'appellation CPZ.

- CEM V A ou B ou ciment composé (anciennement ciment au laitier et aux cendres) contient de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50% de cendres volantes et/ou de 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.

Le Tableau 3 résume les différents types de ciments courants ainsi que leurs compositions en constituants selon la norme NF EN 197-1 [37].

**Tableau 3.** Liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF EN 197-1.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %		Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %			
CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts	6 à 20 %	
CEM II/B		65 à 79 %		21 à 35 %	
CEM III/A	Ciment du haut four	35 à 64 %	Laitier	35 à 65 %	0 à 5%
CEM III/B		20 à 34 %		66 à 80 %	
CEM III/C		5 à 19 %		81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane cendre ou fumée silice	10 à 35 %	
CEM IV/B		45 à 64 %		36 à 55 %	
CEM V/ A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	Laitier et cendre	18 à 30 %	
CEM V/ B		20 à 39 %		31 à 50 %	

#### **1.1.4. Fibres**

On entend par fibre un ensemble de fils très fins assemblés pour constituer une matière, sa longueur doit être au minimum égale à 3 fois la dimension de son diamètre. Elles sont classées selon :

- L'origine : Artificielle, synthétique ou naturelle ;
- La forme : Ondulée, aiguille, droite, etc.... ;
- La dimension : Microfibre ou macro-fibre ;
- La longueur : discrète ou continue ;
- Les caractéristiques mécaniques.

Actuellement, les fibres représentent un grand nombre de matériaux commercialisables comme de récentes marchandises. Cependant, pour choisir des fibres à incorporer dans des

matériaux composites on doit analyser leur réaction dans le mélange ainsi que l'efficacité du composite [38].

Plusieurs types de fibres sont généralement utilisés en géotechnique, elles peuvent être classées par famille :

#### **1.1.4.1. Les fibres d'origines naturelles**

Elles sont divisées en trois groupes : Végétales, animales et minérales.

##### **a. Végétales**

Ce sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [39].

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes : Les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface.

##### **- Les fibres de feuilles :**

Elles sont obtenues grâce au rejet des plantes. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer, ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont : L'abaca, Le sisal,... [40].

##### **- Les fibres de tiges**

Elles sont obtenues dans les tiges des plantes. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges des plantes. Les fibres de tiges sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Les fibres de tiges les plus utilisées sont [40] : Palmier dattier, le Jute, le lin, Le Chanvre, le Kénaf,...

##### **- Les fibres de bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

##### **- Les fibres de surface**

Les fibres de surface entourent, en général, la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres, on distingue : le Coton, le Coco,...

➤ **Composition chimique de la fibre végétale :**

Les différents constituants des fibres végétales sont :

- La Cellulose

La cellulose est le principal composant dans la quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse) [41]. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose [42].

- Hémicellulose

Les hémicelluloses représentent le 3<sup>ème</sup> composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids à peu près 25% de la biomasse. L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [42].

- Lignine

La lignine forme avec la cellulose et l'hémicellulose la grande majorité de la biomasse, elle est 2<sup>ème</sup> après la cellulose en termes d'abondance. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition (barrière de protection biologique). La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel [43].

- Pectine

La pectine joue un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Les substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois) [41].

- Extractibles

Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques [44].

Le Tableau 4 représente les principales compositions chimiques des fibres les plus utilisées [45].

**Tableau 4.** Les principales compositions chimiques des fibres les plus utilisées.

Fibres	Cellulose (%)	Lignine (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Cendre (%)
Kénaf	37-49	15-21	18-24	-	2-4
Jute	41-48	21-24	18-22	-	0,8
Chanvre	57-77	3,7-13	14-22,4	0,9	0,8
Ramie	68,6-91	0,6-0,7	5-16,7	1,9	-
Abaca	56-63	7-9	15-17	6	3
Sisal	47-78	7-11	70-24	10	0,6-1
Lin	71	2,2	18,6-20,6	2,3	-
Coton	94	-	-	1,2	1,2
Noix de Coco	36-46	31-45	10	3-4	-
Genêt d'Espagne	44,5	18,5	16,3	13,3	4

➤ **Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales :**

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [42].

Le Tableau 5 représente les propriétés physico-mécaniques pour quelques fibres végétales [45].

**Tableau 5.** Les propriétés physico-mécaniques pour quelques fibres végétales.

Fibre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Module de traction (GPa)	Résistance en traction (MPa)	Allongement (%)
Lin	1,5	28	345-1100	2,7-3,2
Jute	1,45	13-27	350-550	1,2-2,5
Chanvre	1,48	29-70	550-900	1,6-3,5
Ramie	1,5	20-70	550-900	1,6-4
kénaf	1,47	6-8	1580	2,7
Abaca	1,35	20	900	3,5
Sisal	1,45	9-20	400-700	2-14
Coco	1,15	4-6	130-120	15-40
Coton	1,5	5-12	300-800	3-10

### **b. Animales**

Les fibres qui sont issues d'animaux sont classées en 3 catégories laine, poil et soie :

- La laine est une fibre animale très intéressante, elle est répandue dans tous les continents et est utilisée à grande échelle. Elle a la faculté d'être un excellent matériau qui limite la transmission de chaleur entre deux milieux (isolant thermique), elle a une grande capacité absorbante (16 – 18%) et elle possède une importante élasticité de l'ordre de 45%. Parmi les méthodes de classement des fibres animales, l'origine. On peut citer à titre d'exemple :
- Les poils : Ils proviennent de la tonte de certains animaux (chameaux, chèvres...);
- Les sécrétions : Elles sont produites par certains insectes (ver à soie, araignée...).

### **c. Minérales**

Il en existe une seule naturelle c'est l'amiante. A ses débuts, cette fibre a constitué une tendance dans l'utilisation industrielle. C'est un matériau adsorbant qui a la faculté de résister à la chaleur, au feu et aux agents chimiques. L'amiante a été, largement, employée dans le bâtiment, mais son utilisation a été interdite après que l'on est découvert qu'elle peut causer des cancers.

#### **1.1.4.2. Les fibres d'origines synthétiques**

De part leur nom, ces fibres sont synthétisées industriellement, ce sont des dérivées chimiques pétroliers. Elles ont été découvertes au début du 20<sup>e</sup> siècle. Suite au succès enregistré par la fibre dite Viscose, des recherches se sont penchées sur l'étude et la création d'autres fibres synthétiques. La destinée d'utilisation est le facteur primordial qui fixe les caractéristiques de chaque fibre. Elles intéressent de nombreux domaines d'emploi grâce à leurs bas prix, elles ne peuvent être sujet à des ruptures de stock sur le marché en tout le temps et il est facile de modifier leurs propriétés selon les besoins. Parmi les fibres synthétiques mises sur le marché on peut citer les catégories suivantes : Les polyesters, les polyamides, les polyvinyliques, les polyoléfinés (dont la production croissante d'environ 8% par rapport à toutes les fibres synthétiques [38]).

#### **1.1.4.3. Les fibres d'origines artificielles**

On entend par fibre artificielles des fibres qui sont fabriquées, mais dans ce cas, les matières premières sont naturelles (cellulose, protéines végétales, protéines animales, fibre de verre, fibre de céramique, fibre d'acier...). Elle trouve leur application dans le secteur de l'industrie et, particulièrement, en génie civil.

## **1.2. Stabilisation du matériau terre**

Dans le secteur du bâtiment artisanal en matériaux locaux, il existe une forte sensibilité aux phénomènes d'érosion liés aux pluies, à la température, aux vents ou aux gels. Pour résoudre ces problèmes, plusieurs techniques de stabilisations sont utilisées et elles doivent être choisies en fonction de paramètres tels que le type de terre utilisé, le type de construction, les moyens disponibles, la durée du chantier... En effet, la stabilisation a pour objectif d'améliorer la dureté (résistance aux chocs et aux frottements, réduction de l'effritement) et l'imperméabilité. Selon HOUBEN et GUILLAUD (2006) [19], il existe plus d'une centaine de produits employés pour la stabilisation des terres. Il faut distinguer l'usage des stabilisants dans la masse ou dans la peau de la terre (cas des enduits). On ne traitera dans la suite que de la stabilisation dans la masse du matériau, dans le but de l'appliquer au cas des blocs de terre comprimée. On propose ici de décrire les grands principes de la stabilisation de la terre crue.

La stabilisation des sols vise à satisfaire les points énumérés ci-après :

- La réduction du volume des vides entre les particules ;
- La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés ;
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable ;
- La diminution des variations de volume dans le cas des sols gonflants ;
- L'amélioration des propriétés mécaniques du sol (résistance à la force d'écrasement, cohésion) en réduisant les vides entre les particules, en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules ;
- La réduction de la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules ;
- Rendre le sol plus résistant contre la compression (sèche ou humide), contre la traction et contre le cisaillement.

On distingue 3 principales techniques qui permettent de stabiliser le sol : chimique, mécanique et physique.

### **1.2.1. Technique mécanique de stabilisation**

La stabilisation mécanique consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure et plus particulièrement sur sa porosité, perméabilité, densité et compressibilité (Houben et Guillaud, 1989) [46]. Elle consiste à apporter une énergie de compactage à la matière à bâtir. Cette première action de compression apportée au matériau va permettre un réarrangement des grains. L'effort appliqué contraint l'air contenu dans les vides laissés entre

les grains à s'échapper, contribuant ainsi à augmenter la densité du sol. La distribution granulométrique n'est pas affectée mais la structure interne du matériel change car les particules sont redistribuées. La stabilisation mécanique apporte une augmentation de la résistance mécanique. S'agissant du même sujet, Guettala et al. (2002) [47] confirment dans leurs travaux sur les blocs de terre stabilisés qu'il y a croissance des résistances mécaniques en fonction de l'importance de l'effort de compression avec un seuil de 17,5 MPa après il y a une chute de résistance mécanique. Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules conduisant à une diminution volumique du matériau. En ce qui concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore les moyens de défense du sol contre les agents d'érosion (éolienne et pluviale). La stabilisation améliore les liaisons entre les grains, ce qui augmente la robustesse contre la compression [13].

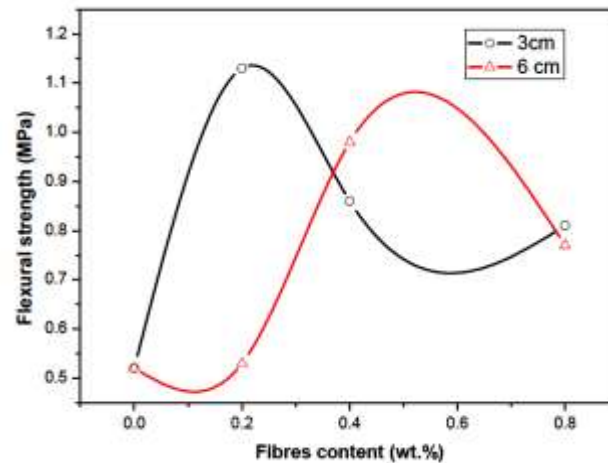
### **1.2.2. Technique physique de stabilisation**

On distingue 2 manières physiques pour stabiliser le sol, à savoir :

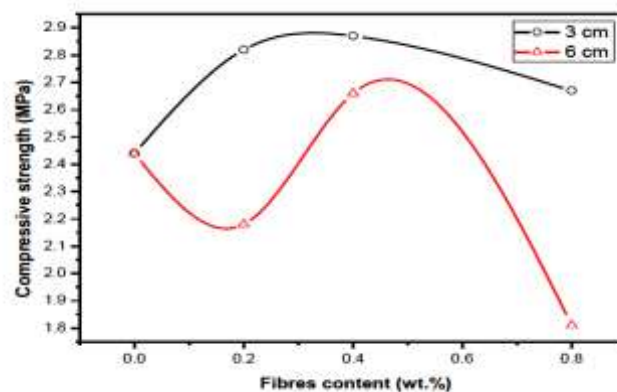
- Améliorer les propriétés des matériaux terre en modifiant et corrigeant leurs granularités. Par conséquent, l'ajout de sable ou de gravier à la terre est donc un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité [48]. Les sables et graviers permettent de structurer la terre trop argileuse en donnant un squelette au matériau. De leur côté, en 2014, Guettala et Izemmouren [49], avaient examiné l'effet de la forte contenance du matériau sable sur la longévité des BTC. Ils sont arrivés à stabiliser les BTC en corrigeant la granulométrie du sol par ajout de 2 types de sables provenant du concassage. Ils sont arrivés à confirmer que les capacités de résistances mécaniques (sèches et humides) s'accroissent au fur et à mesure de lever le taux de sable dans le sol.
- La consolidation des bâtis par des fibres est une technique très courante dans tous les pays. Pour stabiliser les ouvrages en sol, on ne peut passer à côté de cette technique. C'est une méthode qui était reconnue et employée par nos ancêtres il y a environ cinq mille ans. Depuis que l'homme a commencé à vivre en société, son besoin à construire des habitats s'est ressenti. La nécessité l'a amené à mélanger la terre-paille pour fabriquer des éléments consolidés d'une structure [50]. On peut citer, à titre d'exemple, que lorsque les chinois ont bâtis « la grande muraille », ils avaient renforcé les murs avec des branches d'arbres pour créer une résistance à la traction [51]. La terre stabilisée aux fibres présentera une bonne résistance à la fissuration, au cisaillement, et à la compression et une meilleure capacité d'absorption d'énergie sismique [46]. Cependant, l'efficacité de la stabilisation aux fibres dépend des caractéristiques de la terre et des interactions entre les fibres et la terre.

Selon l'étude menée par Millogo et al. [14] sur le renforcement d'un sol par des fibres, les Figures 11 et 12 illustrent les résultats de leurs travaux :

- Figure 11 : En utilisant des fibres de Kénafe (origine Burkina-Faso), de 0,2 à 0,8% du poids total des blocs d'adobes et de 30 et 60 mm, le meilleur résultat obtenu pour la RF est enregistré au point culminant de la courbe de 3 cm.
- Figure 12 : pour les mêmes données (Fibre Kénafe, 0,2 à 0,8% du poids total, 30 et 60 mm de longueur), le meilleur résultat obtenu pour la résistance à la compression est enregistré au point culminant de la courbe de 3 cm.



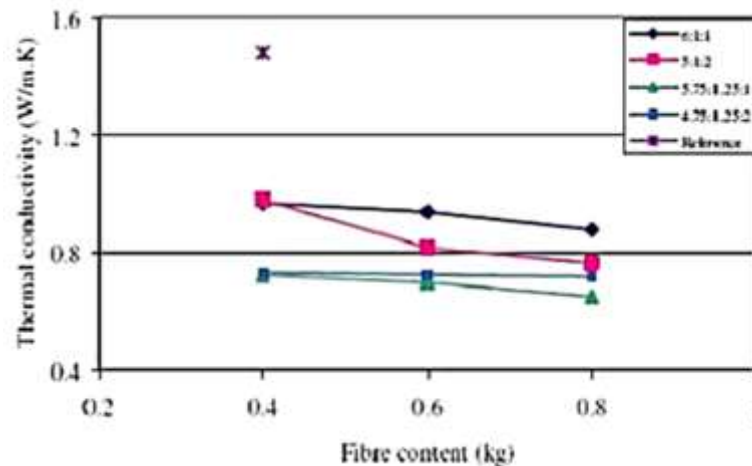
**Figure 11.** La variation de la résistance à la flexion en fonction de la longueur et le taux de fibres [14].



**Figure 12.** La variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur et de taux de fibres [14].

Stulz et Mukerji [52], dans leurs travaux sur les types de stabilisants physiques, citent la tige de blé, la tige du seigle, la tige d'orge (paille), la fibre de sisal, la fibre de chanvre, la fibre de coco et la fibre de bagasse et les qualifient permettant la stabilisation des BTC. Alors que d'autres comme Sallehan et Yaacob [53] ont procédé par des essais d'absorption d'eau sur

les BTC renforcés par les fibres brutes de palmier et ont conclu que l'absorption d'eau s'accroît à l'effet de lever le taux de fibre. Ravishnkar et Raghvan ont confirmé ce même résultat en utilisant dans leurs essais la fibre du coco [54]. Tandis que, dans leurs analyses Khedari et al. [55] sont arrivés à montrer que pour des BTC renforcés avec des fibres de coco, on enregistre une diminution de la conductivité thermique en élevant le taux de fibre. La Figure 13 illustre ce résultat et montre la conductivité thermique décroît et peut atteindre 50% les différentes catégories de fibres de coco utilisées.



**Figure 13.** Effet du taux de fibres de Coco sur la conductivité thermique [55].

### **1.2.3. Technique chimique de stabilisation**

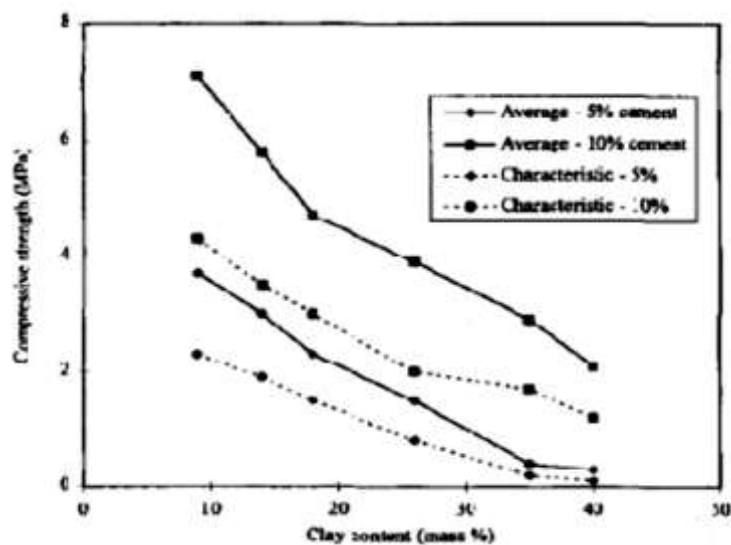
Cette technique permet de stabiliser le sol en incorporant de la matière chimique qui en agissant affecte les propriétés du matériau traité. Cette action peut être une réaction physique et chimique (physicochimique) qui élabore un liant entre les particules. A titre d'exemple, on peut citer le ciment, la chaux, le bitume et d'autres sous-produits de l'industrie. Sur le marché, on trouve une large gamme de produits qui sont utilisés dans ce sens. Les paramètres qui fixent le choix du produit chimique à ajouter au matériau sont la nature du sol à traiter et les résultats escomptés [56].

En pratique, on peut procéder au renforcement de l'efficacité d'un sol par addition de matières chimiques selon 2 méthodes :

- Ajouter le produit chimique (liant) dans le matériau à traiter ;
- Enduire ou badigeonner les parties superficielles du bâti construit en sol qui sont exposées aux intempéries en guise de les protéger [57].

#### **1.2.3.1. Stabilisation au ciment**

Le ciment a prouvé son statut parmi les plus efficaces liants recommandés pour stabiliser les BTC [46]. L'addition de ciment à un sol produit de fortes liaisons entre ses particules et le rend plus infiltrant et, donc, plus résistant à l'eau. A titre comparatif, dans un sol, le ciment va se comporter comme dans un béton ou dans un mortier en liant les sables et les graviers. Par conséquent, il est déconseillé d'ajouter le ciment à un sol argileux d'un taux dépassant 30% [19]. Cette confirmation est le résultat de travaux effectués par Walker [58]. La Figure 14, illustre ces résultats, en effet les courbes, représentant la résistance à la compression des BTC renforcés au ciment, sont ascendantes avec la progression des teneurs en argile.



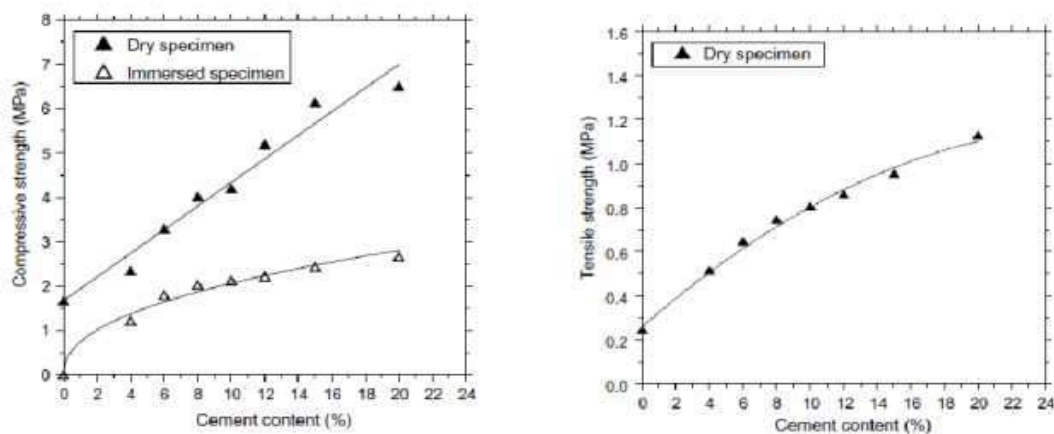
**Figure 14.** Effet du taux d'argile sur la résistance à la compression d'un BTC stabilisé au ciment [58].

Effectivement, dans le mélange terre-ciment, le ciment hydraté réagit de deux façons [13] :

- La réaction de ses constituants entre eux : formation d'un mastic par addition d'eau au ciment pur.
- Réaction avec l'argile selon trois phases :
  - L'addition d'eau (en petite quantité) à un mélange d'argile et de ciment conduit à la constitution d'un gel de ciment en surface de l'argile.
  - L'addition croissante de petite quantité d'eau (hydratation) active l'affaiblissement de la consistance de l'argile et permet l'infiltration du gel de ciment entre les particules d'argile.

- Le processus d'infiltration du gel de ciment entre les grains d'argile ralentit progressivement avec le temps.

Cependant, le ciment permet d'enchaîner : il crée une liaison inerte qui s'oppose à tout mouvement. Il améliore la résistance à l'eau en créant des liens entre les particules de sables et graviers. Ceci confirme les résultats obtenus par Rigassi [13] qui a fait un mélange d'environ 6 % du ciment avec la terre pour avoir des résultats satisfaisants. L'addition du ciment au sol le rend sensiblement résistant à la compression [56]. D'après Bahar et al [59], la résistance à la force de compression et à la force de traction, par l'essai de fente, s'accroît avec l'élévation du taux de ciment dans le sol (voir Figure 15). Alors que, Akpokodje [56] a analysé l'influence sur la résistance d'un sol avec l'addition de différents taux de ciment. Le résultat est une fonction linéaire qui schématise que le sol devient plus résistant à la compression avec l'ajout progressif de différents taux de ciment. De plus, le ciment diminue la conductivité thermique de la terre. Plus il y aura de ciment dans un bloc de terre, plus la conductivité thermique se rapprochera de celle du ciment [60].



**Figure 15.** Influence du taux de ciment sur les résistances mécaniques (compression et traction) par fendage d'échantillons stabilisés au ciment [59].

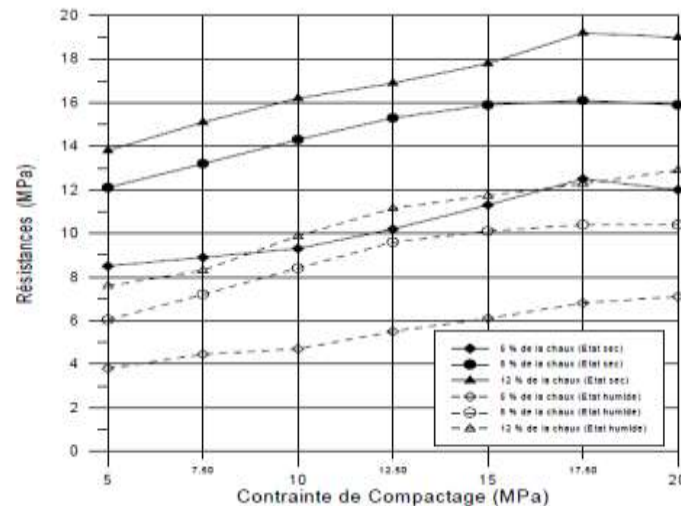
### 1.2.3.2. Stabilisation à la chaux

La technique de stabiliser le sol en ajoutant de la chaux qui a fait ses preuves depuis longtemps. C'est une technique qui a été employée par les romains pour renforcer les chaussées des routes [61]. Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de bases [62] :

- Absorption d'eau : plus remarquable en cas d'utilisation de la chaux vive. La chaux subit une réaction d'hydratation qui abaisse la teneur en eau du mélange. Pour 1% de chaux vive ajouté, on peut constater, après 2 heures, une diminution de la teneur en eau de 1 à 1,5 %.

- Echange cationique : L'addition de la chaux à une terre humidifiée correspond à un apport important d'ions de calcium. Par un phénomène d'échange cationique, ces ions de calcium se substituent aux cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) de la terre. La capacité d'échange cationique de la terre est déterminante dans ce phénomène.
- Agglomération : L'interaction entre les cations et l'augmentation des quantités d'électrolytes dans l'eau interstitielle conduisent à la floculation et agglomération des particules fines de la terre. Ainsi, il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine de la terre. La structure et la texture de la terre changent.
- Carbonatation : la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Cette réaction consomme un faible pourcentage de la chaux utilisée dans les réactions pouzzolaniques.
- Altercation pozzolanique : C'est le mécanisme le plus important influençant la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistances du matériau sont dues essentiellement à une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et à la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates d'aluminium et de calcium qui ciment les grains entre eux.

En effet, plusieurs chercheurs géotechniciens se sont penchés à faire des analyses pour clarifier les effets de l'addition de chaux aux sols quant à la résistance à la compression. Les résultats de ces études montrent que l'ajout de chaux au sol le rend résistant à la compression, c'est le gel de chaux formé qui lui procure cette propriété. De nombreux facteurs interviennent donner au sol cette efficacité mécanique : La teneur en chaux, la nature de l'argile, le compactage, la période de cure et la température. En général, Il existe un dosage optimal pour chaque terre. La quantité de chaux pour stabiliser la terre est de l'ordre de 6% à 12% en général [13]. Une terre argileuse (jusqu'à 70%) est favorable à l'utilisation de la chaux. Guettala a effectué une étude dans le but d'améliorer la longévité du sol par l'addition de chaux [63]. Le résultat de cette étude confirme que le sol est devenu, progressivement, plus résistant à la compression (sèche et humide) avec l'accroissement des taux de chaux à chaque essai. A titre d'exemple, il a été constaté que l'ajout de chaux à l'état sec permet une rapide élévation de la résistance à la compression avec des taux faibles de chaux, 5 à 8% entraîne un accroissement de 54% puis cet accroissement ralenti pour atteindre seulement 18% avec des pourcentages en chaux de 8 à 12% pour une contrainte de 10 MPa (Figure 16).



**Figure 16.** Effets du compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques [63].

De plus, quand la température de cure est augmentée pour les sols stabilisés à la chaux on remarque une accélération des réactions pozzolaniques [64], selon les teneurs en chaux et le temps de cure et avec un taux de chaux de 6% pendant une période de cure de 90 jours, les résistances à la compression doublent pour des températures 20°C à 50°C. Venkatamara et al [65] ont résolu certaines difficultés concernant des blocs du sol expansif et du sol issus des réservoirs, stabilisés à la chaux, la cure s'est faite à la vapeur durant une période de 20 heures et à une température de 80°C, ils ont pu confirmer que dans ces conditions, la résistance à la compression humide est remarquablement plus intense que dans le cas d'une cure à une température ambiante.

### **1.3. Techniques de construction en terre**

La couche superficielle terrestre a permis à l'homme de développer dans divers domaines (agriculture, chasse, vie de société, etc.) et notamment dans le domaine de l'édification en matériaux locaux. Ce cumul de connaissances détermine les traditions, la culture et le lieu de chaque peuple. La terre a, largement, été employée dans les ouvrages, la gamme de techniques de constructions adaptée et appliquée a été élaborée par l'établissement CRATerre de renommée internationale. La liste, des principales techniques, arrêtée par ce même groupe, en 1986, se limite à 12 techniques [19] : il faut noter qu'on ne va citer que 7 techniques, habituellement, utilisées.

#### ➤ **Adobe :**

C'est un matériau de construction fait d'un mélange de sol, d'eau et de chaume. Le sol utilisé doit contenir une proportion déterminée d'argile et de sable. Chaque élément du

mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et le chaume de blé, le chaume donne un certain grade de flexibilité à l'ensemble [66].



**Figure 17.** Exemple de Fabrication d'Adobe.

➤ **Pisé :**

De nature très sableuse et graviers et cailloux, à peine argileuse (10 à 20%), la terre est plus souvent conservée à son taux d'humidité naturel (teneur en eau modifiée si elle est trop sèche ou trop humide) puis déversée dans un coffrage et compactée (à l'aide d'un pilon manuel) jusqu'à constituer un béton maigre de terre qui durcit en séchant. Les coffrages traditionnels sont en bois. Elle consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages.



**Figure 18.** Etapes de construire un mur en pisé.

➤ **La terre et la paille :**

Le sol est arrosé d'eau pour obtenir une solution liquide épaisse à laquelle est ajouté de la paille pour que chaque brin de paille soit recouvert de boue. Le mélange produit servira à dresser de murs verticaux sur des structures porteuses.

➤ **Torchis :**

La technique du torchis est mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. La structure en bois est, en général, extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser.



**Figure 19.** Techniques de construction en torchis alsace France.

➤ **La terre façonnée :**

La technique de façonnage du sol est basée sur le mélange du sol avec de la paille ou avec d'autres fibres pour servir à la construction de murs.

Elle amène à utiliser la terre sous forme de boue lâche (liquide) dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse. Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème.



**Figure 20.** Exemple de mur en terre coulée.

➤ **La bauge**

Le sol est souvent mélangé avec de la paille ou avec d'autres fibres, le produit de cette action permet de faire des boules sans aucune finition qui serviront à dresser des murs dans la verticale. En effet, les dites boules sont posées une sur l'autre et tassées doucement à la main ou aux pieds pour construire des murs. Dans certaines régions, les boules de boue (bauge) sont introduites dans une armature en bois [19].



**Figure 21.** Construction en terre empilée : (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée ; (c) mosquée de Bobo Dioulasso.

➤ **Bloc de terre comprimée :**

Cette technique est le résultat de recherches récentes menées pour développer des moules pour le façonnage de briques en sol, réputés sous le nom de blocs d'adobe (CRATerre, 1991).

H. Guillaud et H. Houben [62] ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre, mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité.



fibres ou des approches purement mécanique, tout en mettant en évidence le mode de compactage et l'énergie de compactage.

## **Chapitre 2. Généralités sur les blocs de terre comprimée**

### **2.1. Introduction**

La technique du BTC, peut être considérée comme un développement et une modernisation des blocs de terre moulée, ces blocs ont des dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide, suivie d'un démoulage immédiat. Les blocs de terre comprimée ont, généralement, un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés, à relief verticale ou horizontal. Les blocs de terre comprimée sont constitués, principalement, de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec, essentiellement, à la fraction argileuse composant la terre (gravier, sable, limon et argile) ; des additifs tels que le ciment, la chaux, les fibres, etc... peut être ajouté, néanmoins, à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques final des BTC dépendent de la qualité des matières premières (terre, additifs) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) [67].

### **2.2. Définition**

En relation avec l'historique de l'édification des structures en sol, l'utilisation des BTC est une méthode contemporaine dans ce domaine. Dans les années 50, en Colombie on avait mis au point une planification d'un programme de recherche concernant les habitations dans les zones rurales.

La technique du BTC représente la modernisation de la façon de construction en bloc moulé, qu'on appelle, aussi, bloc d'adobe. En remplacement du moulage à la main des blocs d'adobe dans des moules en bois, les blocs en terre hydratée sont moulés et pressés dans des presses métalliques. En guise de comparaison avec le bloc d'adobe façonné à la main, le BTC a une forme et des dimensions régulières, il est plus consistant, ne se désintègre pas facilement au contact de l'eau et résiste à la compression [63, 67].

La tendance à perfectionner les qualités et l'efficacité des adobes ne date pas d'aujourd'hui. Dans le temps, on a utilisé des dames en bois pour fabriquer les premiers BTC. Cette méthode est, toujours, employée dans tous les pays. La conception des presses primaires avait été mise au point au 18<sup>ème</sup> centenaire. La fabrication de presses mécaniques n'est intervenue qu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ces machines ont élaborées et constituées, principalement, d'un moule et d'un lourd couvercle à rabattre pour venir exercer une forte

force sur le moule rempli du matériau hydraté. Dans le même contexte, le processus de développement de toutes les machines ne s'est jamais arrêté, les presses de mortier ont été équipées de moteurs. En effet, la production des blocs en terre comprimée a permis la construction de nombreux édifices dans le monde (Figure 23), en adoptant cette nouvelle méthode qui présente plusieurs avantages : préservation de l'environnement, faible prix de revient, beauté des sites, dynamique thermique etc. Pour argumenter, on cite les exemples suivants : Qasbah sud (Maroc), Mosquée de Djenné (Mali), château escoffié (France) et Mausolée (Inde).



**Figure 23.** Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.

La comparaison des BTC par rapport à d'autres matériaux de construction a été faite par plusieurs auteurs et est résumée dans le Tableau 5.

**Tableau 6.** Comparaison du BTC avec d'autres matériaux de construction [13 ; 68 ; 69].

Caractéristiques	BTC	Adobe	Pisé	Brique cuite	Bloc de béton
<u>Aspects :</u>					
Surface	Lisse	Irrégulière	Rugueuse à lisse	Rugueuse à lisse	Rugueuse
Esthétique	Moyen à bon	Pauvre	Bon à excellent	Bon à excellent	Moyen
<u>Performances :</u>					
Résistance en compression (MPa)	1 à 4	0 à 5	0,5 à 3	0,5 à 6	0,7 à 5
Dilatation thermique (%)	0,02 à 0,2			0 à 0,02	0,02 à 0,05
Isolation thermique (W/m°C)	0,81 à 1,04	0,4 à 0,8	1,05	0,7 à 1,3	1 à 1,7
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1700-2200	1200 à 1700	1900	1400 à 2400	1700 à 2200
Durabilité	Faible à très bonne	Faible	Faible à très bonne	Faible à excellente	Faible à très bonne
Emploi en maçonnerie	Porteur	Porteur	Porteur	Porteur	Remplissage
Coût au m <sup>2</sup> (euros) : exemple à Kinshasa	100 à 180*			20 à 50	20 à 35
Coût au m <sup>2</sup> (euros) : exemple en Belgique	250 à 500		500 à 700	50 à 140	60 à 90

\* Ce coût est à prendre avec précaution étant donné qu'il a été calculé sur des projets réalisés par des ONG qui ne sont pas habituées à ce système de construction.

### 2.3. Différentes géométries des blocs de terre comprimée

Il existe plusieurs sortes de moules produisant différents types de blocs. Selon le travail qui sera réalisé (maçonnerie porteuse, maçonnerie de remplissage, maçonnerie armée, travaux particuliers, pose par juxtaposition, pose par emboîtement,...), on distingue un éventail de formes des blocs de terre comprimée (Figure 24) [38] à savoir :

- **Blocs plein en terre** : Souvent, ils sont moulés dans des gabarits de diverses formes géométriques (parallélépipède, cube, etc.). On peut les utiliser dans des gammes de structures très diversifiées ;
- **Blocs creux** : Pour préserver la rigidité du bloc, on doit respecter le taux de 15% de creux. Dans le cas où les méthodes de confection des blocs sont modernes, le taux des creux ne doit pas dépasser 30%. Les vides rendent les blocs plus légers et assurent une bonne jonction du mortier d'intercalation.
- **Blocs alvéolaires** : Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compactage plus forte que la normale ;
- **Blocs à emboîtements** : Leur jonction se fait par emboîtement les uns aux autres, ils donnent la possibilité de ne pas utiliser le mortier d'intercalation. Ces blocs sont façonnés selon des procédés modernes pour les soumettre à un fort compactage ;
- **Blocs parasismiques** : Ils ont une forme améliorée et une conduite en cas de séisme, ils laissent la meilleure possibilité pour introduire des systèmes parasismiques dans les structures, par exemple une chaîne ;
- **Blocs spéciaux** : Ce sont des blocs produits pour un usage particuliers.



Figure 24. Différentes sortes de BTC [38].

## 2.4. Choix du matériau terre

Le choix de la terre est nécessaire, c'est un facteur important dans la procédure. Il intervient avant de prendre la décision relative à la technique à adopter pour transformer le sol en matériau du bâti pour la fabrication des BTC. Toutes les terres ne conviennent pas pour la fabrication des blocs. Les quelques règles simples qui suivent ont pour but d'écartier rapidement les terres de trop mauvaise qualité. On estime que la meilleure terre doit se composer de :

**Tableau 7.** Composition du matériau terre [13].

Gravier	0 à 40%
Sable	25 à 80%
Limon	10 à 25%
Argile	8 à 30%

Pour le choix des terres, les caractéristiques suivantes sont aussi à considérer :

- $I_p$  : idéalement proche de 9, compris entre 7 et 25,
- $\omega_L$  : idéalement proche de 27, compris entre 25 et 45,
- $\omega_P$  : idéalement proche de 17, compris entre 10 et 25. [70]

Ainsi le choix de la carrière de la terre pour la confection de BTC passe par plusieurs tests d'identification : Tests sur le terrain et tests au laboratoire.

### 2.4.1. Les principaux tests réalisés sur terrain

#### 2.4.1.1. Tester l'odeur du sol

Il s'agit de prendre une poignée de sol qui vient d'être pioché et de sentir son odeur. Le sol contient de la matière organique s'il émet une odeur de la moisissure ; cette odeur devient plus forte si on hydrate le sol avec un peu d'eau. En effet, lorsque le sol contient une grande quantité de matière organique, il ne convient pas comme matériau approprié pour la confection des blocs de terre comprimée [7].

#### 2.4.1.2. Tester le sol au toucher

Pour réaliser ce test, on doit isoler une quantité de sol, la broyer et éliminer tous les gros grains alors que le sol est sec, puis on l'humidifie avec un peu d'eau. Le sol est dit sablonneux s'il est rude au toucher et produit un son aigu au frottement entre les doigts. Le sol est dit limoneux quand il est constitué de fins grains, et donne une sensation plaisante à la touche en collant à la main. On doit être prudent dans l'utilisation des sols limoneux car lorsqu'ils sèchent, ils deviennent peu résistants à l'eau. Un sol est dit argileux quand on en prend une

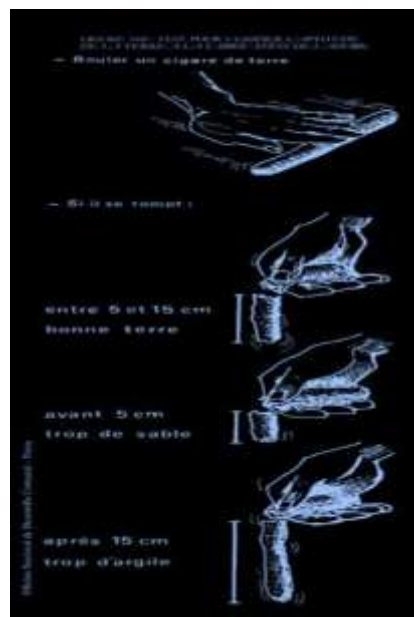
poignée hydratée puis écrasée dans la main devient difficile à rompre et colle aux mains, il est lentement dilué dans l'eau [13].



**Figure 25.** Procédure d'essai de la touche [13].

#### 2.4.1.3. Test de la cohésion

Dans ce test, le premier constat à faire, c'est que le sol ne salit pas les mains lors de sa manipulation. L'échantillon est imbibé d'eau pour atteindre l'état plastique, il est laissé au repos pendant 1 heure pour que l'argile réagisse. L'étape suivante se résume à rouler la patte d'argile sur un plan de travail pour fabriquer un boudin en forme de cigare de 20 cm de longueur et 3 cm de diamètre. Le test consiste à pousser, sans précipitation, le boudin dans le vide, puis mesurer le morceau qui tombe. Cette opération doit être répétée à 3 reprises et donne lieu au calcul d'une moyenne (Figure 26).



**Figure 26.** Procédure d'essai du cigare [49].

#### 2.4.1.4. Test de résistance à sec

Dans ce test, le chercheur est amené à commenter la nature du sol en faisant intervenir sa résistance à sec. Le sol est arrosé d'eau pour arriver à l'état plastique. De la pâte obtenue, l'opérateur confectionne 2 pastilles à l'aide d'un moule circulaire. Après le séchage de ces pastilles, on doit s'intéresser à une probable rétraction du sol tout en évaluant sa résistance à la rupture et l'écrasement entre les doigts. Si la pastille est très difficile à casser et rupture avec un claquement, la terre est très argileuse. On dit que la terre est bonne, si la pastille est difficile à casser mais sans trop d'effort en arrivant à la réduire en poudre. Tandis que, la terre est sableuse ou siliceuse, si la pastille est très facile à casser et se transforme facilement en poudre [49].

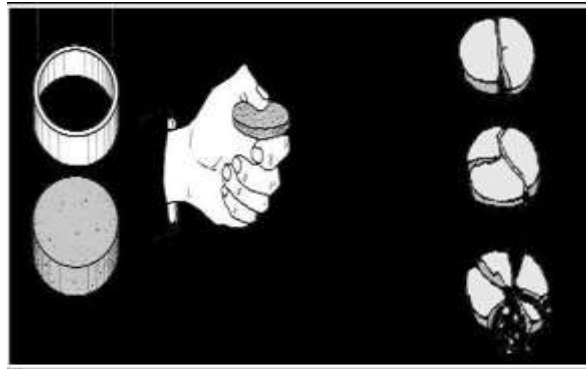


Figure 27. Procédure d'essai de la pastille [13].

#### 2.4.1.5. Essai de sédimentation

Ce test analyse le sol pour trouver le rapport entre le sable et l'argile et/ou avec le limon :

- Passer la terre dans un tamis de 6 mm,
- Verser suffisamment de terre dans une jarre à large ouverture pour remplir une profondeur de 15 cm,
- Remplir la jarre d'eau et la couvrir,
- Ajouter 2 cuillères à thé de sel pour aider les particules d'argile/limon à se fixer plus rapidement,
- Secouer vigoureusement la jarre pendant 2 minutes.
- Poser la jarre sur une surface horizontale.



**Figure 28.** Essai de sédimentation.

La terre doit reposer environ 1/2 heure. Le sable se déposera rapidement au fond. Les particules d'argile/limon se déposeront en dernier lieu. Mesurer les couches pour déterminer le rapport de sable et d'argile/limon.

Utiliser une terre qui contient au moins 1/3 de sable et entre 5 et 30% d'argile/limon. Si le sol disponible ne convient pas, on peut y ajouter du sable ou de l'argile. Retenir les pourcentages de sable et d'argile/limon dans la terre utilisée. Cela aidera à savoir quelle terre donne les meilleurs blocs.

#### **2.4.1.6. Essai de compactage**

Ce test indique la qualité de tassement de la terre, qui dépend du pourcentage d'argile de l'échantillon.

Prendre une poignée de terre sèche, tamiser la et l'humidifier jusqu'à ce qu'elle soit assez mouillée pour former une balle quand on la presse dans la main, mais ne pas la mouiller de telle façon qu'elle ne laisse plus qu'une légère trace d'eau sur la paume.

Lancer la balle d'une hauteur d'environ 90 cm sur un sol dur. Si la balle s'éclate en petits morceaux, la qualité de tassement varie entre bonne et assez bonne. Si elle se désintègre, la qualité est médiocre.

#### **2.4.1.7. Essai de la boîte**

Le test de la boîte est un guide pour mesurer la longueur de la masse de terre sèche et durcie comparée à la longueur de la boîte pour déduire le retrait linéaire du sol [7]. La boîte doit avoir les mesures intérieures suivantes : 4 cm x 4 cm x 60 cm (Figure 29).

- Huiler ou graisser complètement les surfaces intérieures de la boîte,

- Bien remplir la boîte de terre humide (préalablement passée au tamis à mailles de 6 à 10 mm), la terre doit être humidifiée pour bien se tasser, mais elle ne doit pas être boueuse,
- Tasser, particulièrement dans les coins,
- Aplatir la surface avec un bâton,
- Poser la boîte au soleil pendant 3 jours ou à l'ombre pendant 7 jours. Elle doit être à l'abri de la pluie.

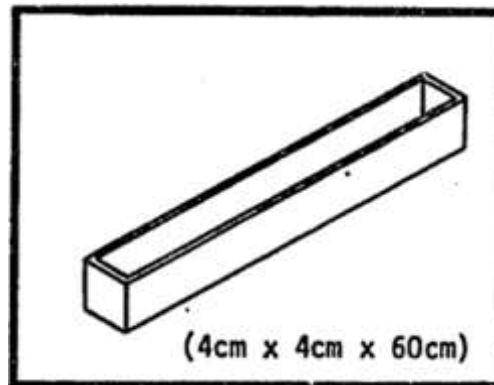


Figure 29. Essai de la boîte.

## 2.4.2. Principaux tests réalisés au laboratoire

### 2.4.2.1. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie :

Elle a pour cible d'établir la répartition de l'ensemble des constituants par types de particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification et elle s'effectue en deux opérations successives et complémentaires :

#### ➤ Analyse granulométrique par tamisage :

Cette analyse vise à isoler par tamisage les particules du sol d'un calibre dont le diamètre dépasse 80  $\mu\text{m}$ .

Selon les normes XP P 94-041 [71] et NFP 94-056 [72], l'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. Le classement des grains s'obtient par vibration des colonnes. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse. La masse de l'échantillon  $m$  (kg) est choisie entre 0.2 et 0.6 fois la taille du plus gros élément  $D$  (mm).  $0.2D < m < 0.6D$ . On note le poids du refus de chaque tamis sur une fiche granulométrique afin de pouvoir calculer les pourcentages des tamisats et tracer la courbe granulométrique.

➤ **Analyse granulométrique par sédimentométrie :**

L'analyse par sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage. Elle est menée selon la norme NF P94-057 [73]. Cette analyse donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80  $\mu\text{m}$ .

La granulométrie présente un intérêt majeur pour les sols argileux, car elle permet de déterminer le pourcentage de particules de diamètre  $< 2 \mu\text{m}$ , ce qui caractérise et différencie les éléments argileux des autres composants du sol. En effet, la sédimentométrie consiste à diluer le sol dans une éprouvette où on a mis, auparavant, de l'eau. La solution obtenue, doit reposer, le temps nécessaire au dépôt des particules par classe de grosseur, les grains les plus lourds vont se précipiter au fond du récipient. La vitesse de décantation dépend de la finesse des particules. Il est énoncé que, plus les particules, du sol en solution, sont fines plus la vitesse est lente (loi de Stokes). Les mesures de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permettent de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

**2.4.2.2. Analyses d'Atterberg (limites)**

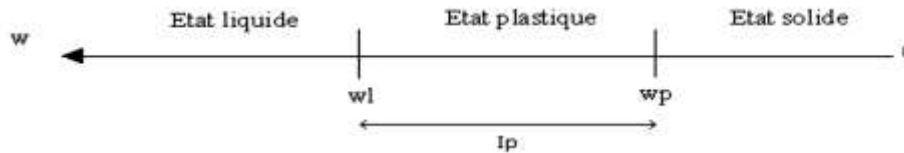
Les limites établies par Atterberg sont des teneurs en eau pondérables correspondant à des états particuliers d'un sol. Elles ont pour but d'étudier la variabilité de fermeté des terres fines au vu de leur teneur en eau. Selon la norme NFP 94-051 [74], ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé, c'est-à-dire la fraction de sol qui passe au tamisage d'un outil de 400  $\mu\text{m}$  de maille, trois grosseurs ont été définies :

- Limite liquidité  $\omega_L$  : qui sépare l'état liquide de l'état plastique.
- Limite plasticité  $\omega_P$  : qui sépare l'état plastique de l'état solide.
- La limite de retrait  $\omega_S$  : qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

La différence entre les limites de liquidité et de plasticité définit l'indice de plasticité  $I_p$ , cet indice définit l'étendue du domaine plastique. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

$$I_p = \omega_L - \omega_P \quad (3)$$

Avec :  $I_p$  est l'indice de plasticité.



**Figure 30.** Etat de consistance d'un sol.

L'indice de consistance ( $I_c$ ) est le rapport défini par la formule suivante :

$$I_c = \frac{(\omega_l - \omega)}{I_p} \quad (4)$$

Avec :

$\omega$  est la teneur en eau.

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. On applique à la coupelle des chocs semblables, en comptant le nombre de chocs ( $n$ ) nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm. On mesure, alors, la teneur en eau de la pâte avec la courbe représentative de la relation entre  $\log n$  et  $W$  qui représente une droite et on peut déterminer la limite de liquidité, c'est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs si  $15 < n < 35$ .

$$\omega_L = \omega \left( \frac{n}{25} \right)^{0.121} \quad (5)$$

Pour déterminer la limite de plasticité on forme une boulette à partir de la pâte préparée, puis on roule la boulette sur une plaque lisse, à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre et 10 cm de longueur, la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre lorsqu'il se fissure.



**Figure 31.** Appareil de Casagrande.

### 2.4.2.3. Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est réalisé selon la norme NF P 94-068 [75], sur la fraction <0.08 mm. Il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation, c'est-à-dire, la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Cependant, cet essai consiste à déterminer la quantité et l'activité des éléments argileux (Ca) contenue dans le sol d'une façon globale.

L'essai a pour but de mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/5 mm du sol.

La valeur du bleu de méthylène est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des matériaux argileux présents dans la fraction fine du sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'absorption après chaque ajout. Pour cela, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur le papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu claire persistante se produit à la périphérie de la tâche. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction [76].

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est récente. Ce paramètre, noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les faces intérieures et les faces intérieures des grains d'argile contenues au sein de la fraction du sol considéré ; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. La valeur du bleu du sol (VBS) est signifiée en g de bleu pour 100 g de terre, elle est donnée par la formule suivante : (La valeur du bleu du sol est (sans unité)).

$$\text{VBS} = \text{V.m} \quad (6)$$

Avec :

V : Volume de bleu ajouté en cm<sup>3</sup>,

m : la masse de l'échantillon en gramme.



Figure 32. Essai de mesure de Bleu de méthylène.

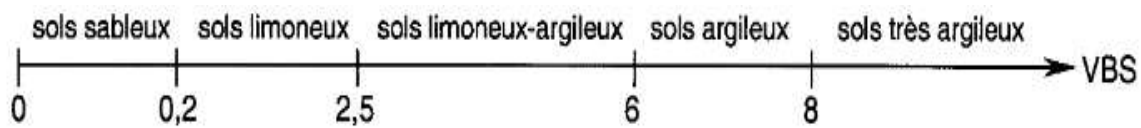


Figure 33. Ordres de grandeur.

- Le coefficient d'activité ( $C_a$ ) est par définition le rapport entre l'indice de plasticité  $I_p$  et la partie fine inférieure à  $2 \mu\text{m}$ .

$$C_a = \frac{I_p}{\text{fraction argileuse}} \quad (7)$$

Où la fraction argileuse désigne le pourcentage en masse des particules inférieures à  $2 \mu\text{m}$ . Les argiles qui ont un coefficient d'activité d'à peu près 1 ( $0.75 < C_a < 1.25$ ) sont considérées comme « normales » ; Si  $C_a < 0.75$ , les argiles sont dites inactives ; Si  $C_a > 1.25$ , elles sont dites actives. Le coefficient d'activité est utile dans certains systèmes de classification, ou encore pour établir certaines corrélations applicables dans le cas des argiles actives et des argiles inactives.

#### 2.4.2.4. Teneur en eau

Selon la norme NFP 94-050 [77], une masse ( $M$ ) de matériau est placée dans une coupelle ou un bac propre et sec de masse connue ( $M_1$ ). La prise d'essai et son contenant sont pesés immédiatement ( $M_2 = M + M_1$ ). Puis, ils sont introduits dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ . Deux pesées, séparées par un étuvage d'un intervalle de temps  $t$ , sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve, ou  $M_3$  est la masse du matériau plus le bac après passage à l'étuve.

L'intervalle  $t$  est au minimum de 4 h dans le cas d'un étuvage à  $105^\circ\text{C}$ .

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$\omega (\%) = 100 * M_{\omega} / M_d \quad (8)$$

Avec :  $M_{\omega} = M_2 - M_1$  et  $M_d = M_3 - M_1$ .

$\omega$  : la teneur en eau.

$M_{\omega}$  : Masse de l'eau.

$M_d$  : Masse de l'échantillon avant étuvage.

#### 2.4.2.5. Masse volumique

La masse volumique réelle ( $\gamma$ ) est définie comme le quotient de la masse ( $M$ ) de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides contenus dans les grains (volume réel  $V$ ). Les masses volumiques s'expriment en  $t/m^3$ , en  $kg/dm^3$ , ou en  $g/cm^3$ .

$$\gamma = M / V \quad (9)$$

La masse volumique d'un granulat est le quotient de sa masse par son volume. Pour un granulat donné, ce rapport est une constante qui est propre aux caractéristiques physiques du granulat. Elle permet, alors, de caractériser un granulat et d'établir un lien entre sa masse et son volume. Le volume des grains est appelé le volume absolu et le volume des grains avec l'air est appelé le volume apparent.

#### ➤ Masse volumique apparente :

C'est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

- On pèse la masse du récipient vide, noté  $M_0$ ,
- A l'aide d'un entonnoir, remplir le récipient de sol sec préparé,
- On arase le sol à ras bord avec la règle à araser,
- On pèse le récipient rempli de sol, noté  $M_t$ ,
- On va répéter cette opération trois fois, et chaque fois on calcule  $\gamma'$ , tel que :

$$\gamma' = (M_t - M_0) / V \quad (10)$$

D'où :  $M = M_t - M_0$ .

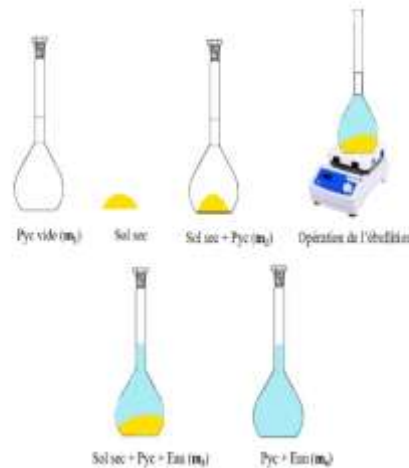
L'essai est répété 3 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

➤ **Masse volumique des particules solides d'un sol ( $\gamma_s$ ) :**

Elle est définie comme étant la masse/unité de volume du matériau constituant l'ensemble des grains du sol sans prendre en considération les espaces vides qui peuvent se trouver dans les grains ou entre ces derniers. Elle est définie comme le rapport entre la masse de ces particules solides ( $M_s$ ) et leur volume ( $V_s$ ), elle est définie comme suit :

$$\gamma_s = M_s / V_s \quad (11)$$

La masse des particules solides est obtenues par pesage. Le volume est mesuré au moyen d'un récipient à volume calibré, appelé pycnomètre. Cependant, la masse volumique des solides est mesurée conformément à la norme NF P 94-054 [78], ainsi elle est déterminée directement au pycnomètre, qui contient un volume prédéterminé de liquide, en étant rempli jusqu'à la marque supérieure du pycnomètre.



**Figure 34.** Principales étapes de l'essai au Pycnomètre.

En effet, la masse volumique des particules solides ( $\gamma_s$ ) est la moyenne arithmétique de deux mesures réalisées sur le même échantillon du sol. Elle est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{M_2 - M_1}{M_4 + M_2 - M_1 - M_2} * \gamma_w \quad (12)$$

Avec :

$M_1$  : masse du pycnomètre vide.

$M_2$  : masse de pycnomètre plus la masse du sol sec.

$M_3$  : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau.

$M_4$  : masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère.

$\gamma_w$  : masse volumique de l'eau.

#### **2.4.2.6. Essai Proctor**

L'essai Proctor est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés). Cet essai est mené selon la norme NF P 94-093 [79].

Le principe de l'essai consiste à damer un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant l'humidifier à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale ( $\omega_{opt}$ ) pour une masse volumique maximum ( $\gamma_{dopt}$ ). [79]

### **2.5. Production des BTC**

La production des BTC peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits par compactage, exception faite de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera différente, selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) au moyen de presses généralement manuelles ou semi-mécanisées, voire motorisées, ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles et industrielles selon les principes et modes d'organisation de l'industrie des briques cuites ou des produits silico-calcaires classiques. Les aires de production, de séchage et de stockage varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, technique et économique [80].

#### **2.5.1. Modes de compression**

L'amélioration de la densité, c'est-à-dire la diminution de la porosité de la terre est obtenue en comprimant la terre dans des presses. Cette densification s'obtient par la mise en œuvre de deux efforts de resserrement statique ou dynamique :

- **Pression statique** : Le compactage est assuré par le rapprochement relativement lent de deux surfaces entre lesquelles se trouve le produit à compacter, qui est retenue latéralement.

- **Pression dynamique** : Le compactage est obtenu par un pilonnage du produit dans un moule. La pression exercée sur la brique est difficilement contrôlable.

En effet le pressage consiste à resserrer les grains modifiant ainsi la structure de la terre. Notons qu'il existe quatre types de presses basées sur des principes physiques universels : les presses hydrauliques, les presses pneumatiques, les presses mécaniques et les presses manuelles.

## **2.5.2. Types de presses**

### **2.5.2.1. Définition de la presse**

La presse est un outil d'atelier ou de laboratoire qui s'utilise pour presser les matériaux pour un but reconnue. Elle est un transmetteur dans lequel une certaine, pression par centimètre carré, agissant sur une petite surface, est capable de développer la même pression par centimètre carré sur une grande surface, et multiplie par conséquent la pression primitive. La somme totale de toutes les forces utilisées dans la presse est exactement égale à la somme totale de toutes les forces qui lui ont été appliquées moins le frottement, ceci montre le principe de Pascal [81].

### **2.5.2.2. Presse hydraulique**

La presse hydraulique est une presse qui fonctionne par un fluide liquide la plupart des cas c'est l'huile. Une presse hydraulique est une machine avec un circuit hydraulique qui fournit une grande force de compression. Ce dernier nécessite un équipement, à titre d'exemple, une pompe avec un moteur pour monter un vérin au moyen d'un circuit hydraulique, constitué de tuyaux ou de flexibles capables de résister aux fortes pressions et enfin le fluide hydraulique qui transmettra l'énergie. Cette énergie est transmise au plateau de compactage par l'intermédiaire du système hydraulique.

Les avantages des presses hydrauliques par rapport aux presses mécaniques sont la simplicité de la conception et de la construction, la force de compression et la vitesse de compression variables du cylindre de compression, ajustement rapide de la position du vérin et protection plus efficace contre les surcharges.

### **2.5.2.3. Presse pneumatique**

La presse pneumatique est une machine avec un circuit pneumatique basé sur l'air comprimé pour la transmission de puissance vers un récepteur qui représente la plupart des

cas un vérin pneumatique, pour l'objectif d'écraser, déformé une pièce ou des matériaux. L'énergie du moteur est transmise à un pilon par l'intermédiaire d'un système pneumatique.

Ce type de presse utilise l'air comprimé ou du gaz comme fluide pour le transport de l'énergie et sa transformation en énergie mécanique.

De plus, une charge électrique met la machine en mouvement, introduisant de l'air comprimé ou du gaz dans des cylindres ou des tubes connectés au mécanisme de presse proprement dit.

Lorsque le gaz remplit les tubes, la pression résultante force le mouvement, généralement, vers le bas du mécanisme de la presse. L'air est aspiré puis compressé dans une cuve sous pression. De ce réservoir partent les canalisations pour la distribution. La pression d'air est exprimée en bar, elle est définie par la pression exercée par une force de 1 daN (déca newton) sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>.

L'avantage associé aux presses pneumatiques est leur utilisation. Un simple interrupteur marche / arrêt alimente la presse et vous permet de faire l'expérience de la puissance. La source d'énergie dédiée comme un compresseur d'air, la presse produit plus de livres par pouce carré (psi) que ce qui peut être généré à la main. Cela rend la plupart des tâches plus faciles à terminer en moins de temps.

#### **2.5.2.4. Presse mécanique**

La presse mécanique fonctionne selon le principe du mouvement alternatif et les composants principaux pour la transmission de puissance. Le compactage se fait par un système de levier ou de pilonnage qui est actionné mécaniquement par un moteur à essence, diesel ou électrique. Le système de guidage le plus employé sur les presses mécaniques est basé sur un mécanisme de glissière qui transforme le mouvement de rotation en mouvement de translation de va et vient. Ce mouvement alternatif impose à un piston vertical une longueur de frappe constante.

Les avantages de la presse mécanique, par rapport aux autres types de presse, sont comme suit :

- Elle est facile à réaliser.
- Leurs composants sont moins chers comparés aux composants des autres types de presses. Si on prend à titre d'exemple, une presse hydraulique ou pneumatique, elle coûte très chère puisque elle nécessite un circuit hydraulique ou pneumatique qui

fonctionne par une pompe plus un vérin concernant la première et un compresseur pour la deuxième.

#### 2.5.2.5. Presse manuelle

La presse est entièrement en acier, comporte une boîte moule dans laquelle un piston mû à la main comprime un mélange légèrement humidifié de terre. La presse manuelle se diffère des autres types de presses (mécaniques, hydrauliques et pneumatiques) par leur source d'énergie et leur mode de compression : pour ce type de presse, le compactage est assuré par une ou plusieurs personnes au moyen d'un système de levier et par le rapprochement relativement lent de deux surfaces entre lesquelles se trouve la terre qui est retenue latéralement. On s'intéresse, à titre d'exemple, aux blocs de terre faits à la presse manuelle ont de nombreux avantages sur les autres matériaux de construction :

- Ils sont plus faciles à fabriquer que les blocs de béton : on peut les enlever immédiatement de la presse et les entasser pour les durcir sans utiliser de paille.
- Le coût du matériel de construction n'est pas très élevé car la plupart des matières premières peuvent être trouvées sur place.
- On évite les coûts de transport car la machine est portable et les blocs sont faits près du lieu de construction.
- Selon la qualité du matériel utilisé, les blocs peuvent être meilleurs que l'adobe et la terre battue.
- Les blocs sont très maniables.
- Les blocs n'ont pas besoin d'être cuits car le processus de durcissement est entièrement naturel.
- On peut fabriquer, avec la presse manuelle, divers blocs adaptés aux différentes phases de la construction.

## 2.6. Avantages des blocs de terre comprimée (BTC)

### ➤ 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 CO<sub>2</sub>, sachant que environ 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment.
- Réduction importante d'énergie consommée pour le transport des matériaux de construction.
- La terre utilise peu d'eau en phase de transformation.
- La terre à des vertus thérapeutiques, soigne les affections de la peau, détruit les bactéries et les acariens.
- La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie employée dans une construction en béton.
- **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. [32, 82]

## **2.7. Conclusion**

L'analyse bibliographique, nous a donné l'occasion d'étudier tous les types de blocs de terre comprimée existants dans le domaine de construction à savoir : blocs plein, blocs creux, blocs alvéolaires, blocs à emboitements, blocs parasismiques et blocs spéciaux.

Nous avons, aussi, étudié leurs développements dans l'histoire de la construction, sans oublier de mettre en évidence les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques de cette technique par rapport aux propriétés des autres techniques (pisé, adobe, brique cuite et bloc en béton).

De plus, nous nous sommes intéressés à connaître les différents modes de compression qui ont un effet important sur la résistance à cette compression.

Dans la synthèse des travaux antérieurs, nous avons constaté que la Construction en blocs de terre comprimée (BTC) comporte une palette très large d'avantages : propriété

mécanique, propriété thermique avec une excellente isolation, hygiénique, respect de l'environnement.

A la vue de ces caractéristiques, il est logique de se demander pourquoi le matériau terre n'est pas plus utilisé dans le monde entier. En générale, la construction d'habitations en terre souffre aujourd'hui de préjugés car la terre est mal connue des gens, ils ignorent ses propriétés intéressantes. La terre est associée dans les esprits, à un matériau fragile et peu évolué technologiquement.

Notre travail de recherche consiste à valoriser, intégrer et utiliser les matériaux locaux (terre, fibres, etc.) d'une même région pour la confection des blocs de terre comprimée, tout en mettant au premier plan, qu'il y a intérêt à s'intéresser au volet expérimental concernant l'influence de l'utilisation des fibres et/ou des liants (ciment ou chaux) sur les caractéristiques mécanique, thermique et de durabilité des BTC; ainsi que l'influence du mode de compactage de sur ces propriétés.

*Études expérimentales*

## ***Partie 2. Études fondée sur des expériences***

---

### **Chapitre 3. Matériaux et procédures expérimentales**

#### **3.1. Introduction**

D'après l'analyse bibliographique, les blocs de terre comprimée stabilisée par un liant (ciment et/ou chaux) et renforcée par des fibres (Palmier Nain) font partie de l'intérêt de ce travail. L'objectif visé, d'une part, la caractérisation intrinsèque des matériaux qui servent à la confection des BTC. Ce sont les propriétés chimique, physique et minéralogique ; en plus des modes de compression employés dans la fabrication des BTC. D'autre part, ce travail vise à obtenir des résultats efficaces, afin d'améliorer les paramètres mécaniques, de durabilité et thermiques des BTC.

Dans ce chapitre, nous développons des caractéristiques des matières premières, les procédés de fabrication des blocs de terre comprimée (BTC) et les techniques expérimentales employées.

#### **3.2. Caractérisation des matières premières utilisés dans la confection des BTC**

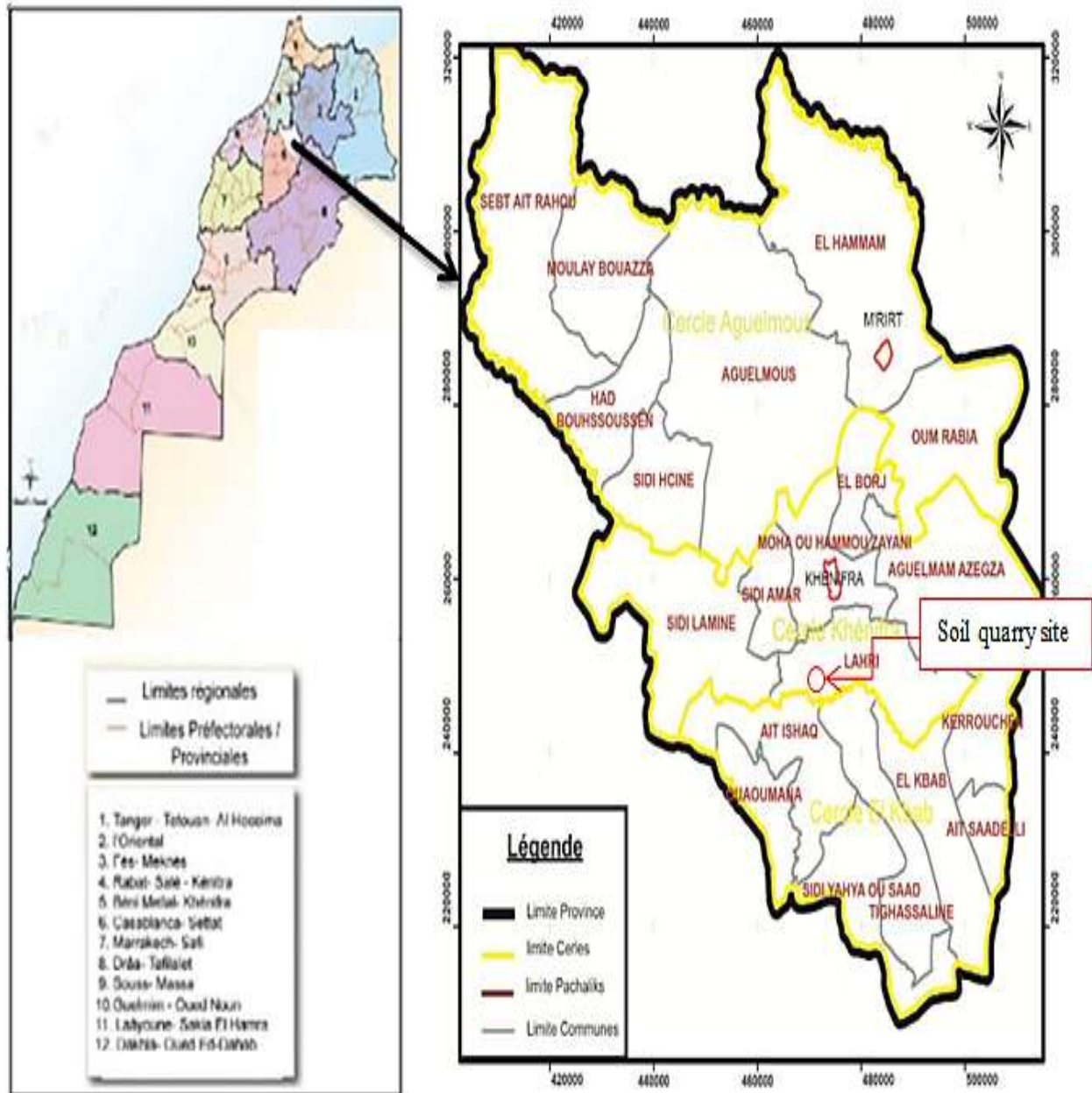
##### **3.2.1. Sol**

##### **3.2.1.1. Localisation de site de prélèvement de l'échantillon**

Le sol utilisé dans ce travail trouve son appartenance dans la province de Khénifra (cet endroit se trouve situé à environ 20 km au sud de la ville de Khénifra dont les coordonnées sont 32°49'19.0"Nord et 5°37'19.8"Ouest (Figure 35). La province de Khénifra, créée en 1973, relève de la région de Béni Mellal-Khénifra, suite au découpage régional de 2015. Elle est délimitée comme suit :

- Nord : Province de Khémisset et province d'El Hajeb ;
- Sud : Province de Midelt ;
- Est par la Province d'Ifrane ;
- Ouest par les Provinces de Beni Mellal et Khouribga.

Le climat de la Province de Khénifra est de type méditerranéen continental de montagne. Il se caractérise par un hiver pluvieux et froid avec des périodes d'enneigement dans les hautes montagnes, et un été sec et chaud avec des périodes d'orage [83].



La terre étant un matériau très hétérogène, elle a un comportement complexe. C'est pourquoi le matériau terre doit être bien identifié avant toute prise de décision en vue de son utilisation éventuelle en construction. Pour employer des matériaux locaux dans le bâti, il est indispensable, au tout début, de prendre connaissance de toutes leurs qualités. En effet, des caractérisations physique, chimique et minéralogique ont été effectuées sur le sol.

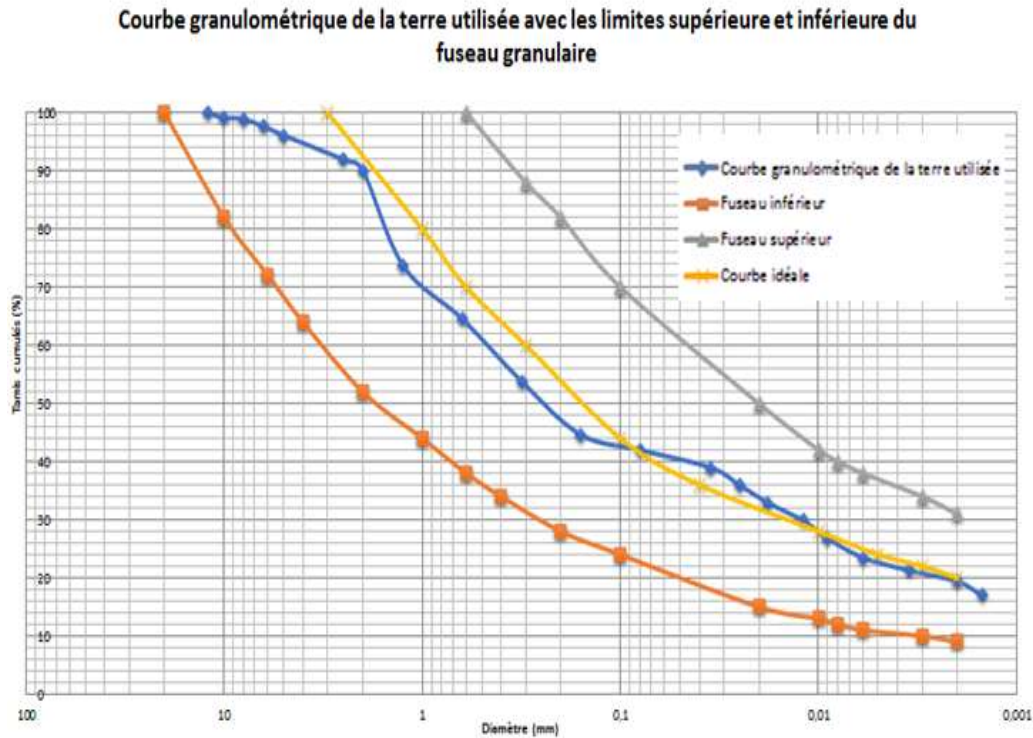
### 3.2.1.2. Caractéristiques physiques et géotechniques du sol

La distribution granulométrique a été déterminée par deux méthodes complémentaires : le tamisage par voie humide et la sédimentation, respectivement selon les normes XP P94-041 [71], NFP 94-056 [72] et NF P 94-057 [73]. Les limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène du sol ont été respectivement déterminées suivant les normes NFP 94-051 [74] et NF P94-068 [75]. Tandis que, La masse volumique des particules solides ( $\gamma_s$ ) a été mesurée en utilisant un pycnomètre NF P 94-054 [78], la teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ ) et la masse volumique sèche optimale ( $\gamma_{dopt}$ ) ont été déterminées par l'essai Proctor normal selon la norme NF P94-093[79]. Le tableau 8 résume les propriétés géotechniques de cette terre :

**Tableau 8.** Propriétés géotechniques du sol utilisé.

Propriétés géotechniques
<p><b>Distributions de la taille des particules (%) :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* argile (%) <math>&lt; 2\mu\text{m}</math> : 17.00 %</li> <li>* limon (%) <math>2\mu\text{m} - 80\mu\text{m}</math> : 24.00 %</li> <li>* sable (%) <math>80\mu\text{m} - 2\text{mm}</math> : 50.00 %</li> <li>* gravier (%) <math>&gt; 2\text{mm}</math> : 9.00 %</li> </ul>
<p><b>Plasticité du matériau de base :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Limite liquidité (<math>\omega_L</math>) : 33.60 %</li> <li>* Limite plasticité (<math>\omega_P</math>) : 20.10 %</li> <li>* Indice plasticité (<math>I_P</math>) : 13.50 %</li> <li>* Activités argiles (Ca) : 0.79</li> </ul>
<p><b>Essai au bleu de méthylène :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Valeur au Bleu de méthylène : 1.39</li> </ul>
<p><b>Essai au pycnomètre :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* La masse volumique des particules solides (<math>\gamma_s</math>) : <math>2.635 \text{ g/cm}^3</math></li> </ul>
<p><b>Essai Proctor normal</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Teneur en eau optimale (<math>W_{opt}</math>) : 11.5 %</li> <li>* La masse volumique sèche optimale (<math>\gamma_{dopt}</math>) : <math>1.910 \text{ g/cm}^3</math></li> </ul>

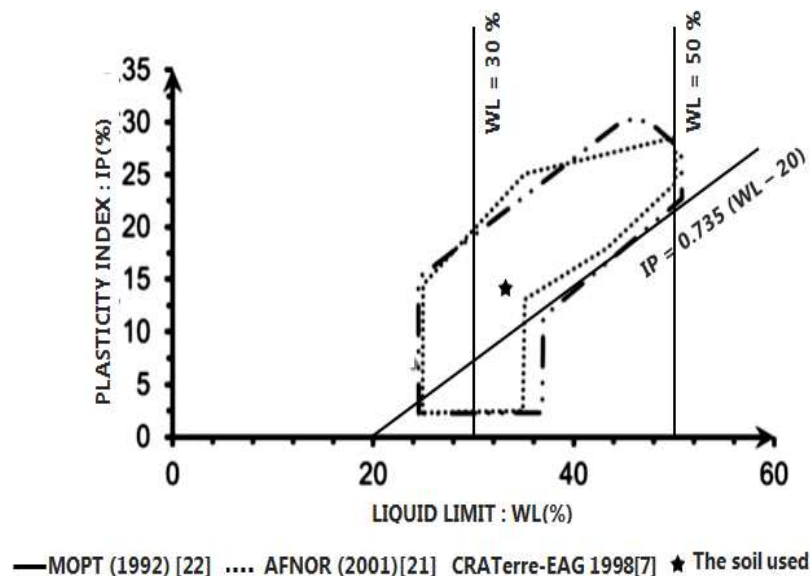
La Figure 36 donne la courbe granulométrique du sol utilisé comparée aux fuseaux limites (inférieure et supérieure) et à la courbe idéale donnée par CRA Terre [17].



**Figure 36.** Courbe granulométrique de la terre utilisée, courbe idéale et les fuseaux limites (Inférieur et Supérieur).

D'après l'analyse de la courbe granulométrique, la terre utilisée pour cette étude est composée d'environ 9% de gravier, 50 % de sable, 24 % de limon et 17 % d'argile. Au regard de la Figure 36, la terre se situe approximativement parallèle à la courbe idéale ainsi qu'aux courbes des fuseaux limites. De Plus, cette courbe granulométrique est inscrite dans la zone granulaire recommandée pour les matériaux utilisables dans la confection des BTC [8, 17]. Cependant, les propriétés de plasticité exposées dans le Tableau 1, décrivent que la partie argileuse de notre sol est classée comme argile inorganique de plasticité moyenne [36]. Ces résultats répondent également aux recommandations pour les blocs de terre comprimée [15, 83].

La Figure 37 expose l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité en vue des recommandations qu'y définissent des cartes de plasticité et domaines de validité des sols en vue d'une utilisation comme matériau de construction [36, 84, 85].



**Figure 37.** Carte de plasticité et la valeur expérimentale.

D'après l'analyse de la partie argileuse de notre sol, on en déduit sa classification comme argile inorganique de plasticité moyenne selon le système de classification unifiée des sols [17]. Ce sol se situe bien dans la zone des matériaux les plus efficaces pour la confection des BTC [36] (Figure 37). De plus, le sol a un indice d'activité de l'argile (Ca) égal à 0.79 qui permet de classer la fraction argileuse de ce matériau comme normalement active [63]. L'illite étant le composé majoritaire dans l'argile, la montmorillonite est minoritaire. Ce type d'argile (illitique) présente un faible gonflement en présence d'eau. En outre, ce type de sol est préférable de l'utiliser dans les constructions en terre crue, puisque des liaisons fortes se créent entre les grains sans avoir recours à des ajouts lorsqu'il est exposé à l'eau [86].

### 3.2.1.3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques du sol

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de la diffraction des rayons X, qui permet d'identifier les différentes phases minérales cristallisées présentes dans le sol. Tandis que, la composition chimique est déterminée par la technique de la spectrométrie de fluorescence X qui donne une analyse globale élémentaire utilisée pour identifier et quantifier des éléments chimiques dans un sol [8, 87]. Ces deux dernières analyses ont été effectuées aux laboratoires de la faculté des sciences de Rabat.

La composition chimique et minéralogique de cette argile sont données respectivement dans les tableaux 9 et 10.

**Tableau 9.** Compositions chimiques élémentaires du sol utilisé dans la fabrication des BTC (%).

Constituants	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P.F
Pourcentage (%)	43,38	19,66	9,12	6,68	1,33	1,58	0,53	1,12	16,60

Divers travaux réalisés sur différents sols par des auteurs tels que Doumbia et al. (2002) [90] et Veyret et Vigneau (2002) [91] ont montré que la qualité et l'abondance des différents éléments du sol dépendent, pour une part importante, de la nature chimique des minéraux constitutifs de ce dernier. La présence de Potasse (K<sub>2</sub>O) et de L'oxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O) peut être attribuée à l'existence de la minérale illite dans l'argile. La teneur élevée en CaO suggèrerait la présence de calcite CaCO<sub>3</sub> ainsi que la dolomie MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> vue la teneur non négligeable en magnésie MgO, le sol contient une importante quantité de silice, provenant principalement du quartz. Le quartz n'est pas un liant et il constitue une partie de la fraction de sable fin de l'agrégat [87].

**Tableau 10.** Compositions minéralogiques du sol utilisé dans la fabrication des BTC (%).

Minéraux	Quartz	illite	Calcite	Muscovite Dolomie	Minéraux micacés
Teneurs (%)	42	28	25	1,22	3,78

La fraction argileuse de notre matériau est constituée de la calcite, de l'illite, et du quartz comme composants majoritaires. Les autres composants minoritaires sont la muscovite et la dolomie, cela confirme les résultats de l'analyse chimique.

#### 3.2.1.4. Mesure du PH du sol

Le résultat de l'essai pH à l'aide d'un pH-mètre a montré que le sol étudié a un pH basique égal à 8.1. Les soles qui s'appêtent à être stabilisés doivent avoir un pH de valeur supérieur à 6, ainsi, plus la valeur du pH d'un échantillon est élevée plus sa résistance est meilleure [63], c'est le cas de notre sol.



**Figure 38.** Mesure du PH à l'aide d'un PH-mètre.

### 3.2.2. Fibres de Palmier Nain/Doum

Le Palmier Doum (ou palmier Nain) a été recueilli dans une zone rurale de la région de Beni Mellal-Khénifra au Maroc. Il est également très abondant sur de larges étendus du territoire Marocain en particulier et sur les deux rives de la méditerrané de manière général (du Maroc jusqu'en Libye et de l'Espagne jusqu'en Italie). S.Sghaier et al. [88] ont montré que le palmier est riche en fibres longues qui se trouvent dans les différentes parties de l'arbre. Les propriétés physiques mécaniques et chimiques des fibres sont résumées respectivement dans les tableaux 11 et 12.



**Figure 39.** Palmier Nain de la région de Béni Mellal-Khénifra.

Juste après leurs récoltes, les feuilles de Palmier Nain sont séchées pendant 2 semaines à l'abri de la lumière. Après séchage, les feuilles ont été broyées pour obtenir les fibres utilisées dans cette étude. Une fois extraites et lavées, les fibres sont étuvées pendant 72 heures à une température de 38°C. Enfin, les fibres sont découpées en morceaux d'une longueur qui varie entre 10 mm et 40 mm.

**Tableau 11.** Caractérisations physiques et mécaniques des fibres de Palmier Nain.

Masse volumique ( $\text{g/m}^3$ )	0.57
Module d'Young E (GPa)	$6,09 \pm 1,38$
Contrainte de traction à la rupture $\sigma_r$ (Mpa)	$175,14 \pm 12,90$
Allongement à la rupture (A %)	$2,76 \pm 0,41$
Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	135

**Tableau 12.** Composition chimique des fibres (%).

Cellulose (%)	43,1
Hémicellulose (%)	35,8
Lignine (%)	18
Autres (%)	12,1

Par ailleurs, pour étudier les effets de la taille des fibres sur les propriétés mécaniques et thermiques BTC, nous avons choisi d'utiliser trois types de fibres de Palmier Nain :

- Fibres en poudre d'une longueur moyenne de 0.1 cm.
- Mélange de fibres de longueur moyenne 1 cm.
- Fibres longues d'une longueur moyenne de 3 cm.

### 3.2.3. Chaux

L'action de la chaux sur les minéraux argileux se fait, surtout, par l'intermédiaire des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{OH}^-$  en solution, c'est pour cela que recommandable de ne renforcer à la chaux que les sols qui ont une portion argileuse inférieure à 20% [4].

Le tableau 13 donne les compositions chimiques de la chaux éteinte qu'on a utilisée dans la fabrication des BTC.

**Tableau 13.** Les propriétés physiques et chimiques de la chaux utilisée dans la fabrication des BTC (%).

Composition chimique	Constituants	Pourcentage (%)
	$\text{SiO}_2$	0.71
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.86
	MgO	26.90
	CaO	45.97
	$\text{CO}_2$	25.57
Masse volumique apparente en $\text{g/cm}^3$	0,910	
Masse volumique absolue en $\text{g/cm}^3$	2,230	

L'analyse montre que la chaux contient principalement de CaO et de MgO. D'autres oxydes ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) ont été relevés dans l'analyse chimique. La masse volumique apparente de la chaux est égale à  $0.91\text{g/cm}^3$  et la masse volumique absolue est égale à  $2.23\text{g/cm}^3$ .

### 3.2.4. Le ciment

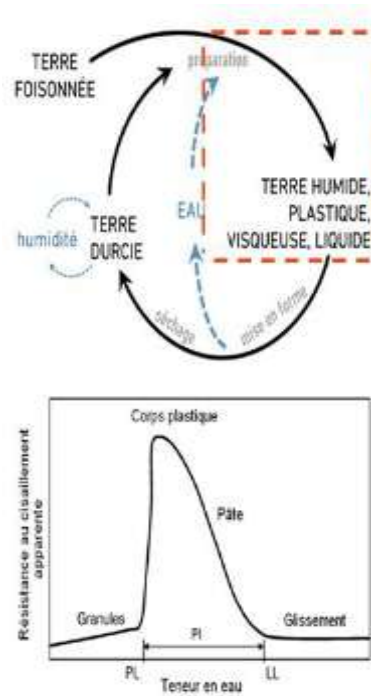
Dans cette étude, on a utilisé le ciment dit CPJ45, avec des dosages associés aux blocs de 0%, 5%, 10% et 12%. Ce type de ciment est un Ciment Portland avec ajouts. Il contient un pourcentage minimum en Clinker de 65%, le reste étant constitué d'ajouts (calcaire, cendres volantes, pouzzolanes). Parmi les principales caractéristiques garanties par la norme NF EN 197-1, la résistance à la compression 28 jrs (Rc28 du CPJ45) doit être supérieure à la valeur 32,5 MPa, la masse volumique apparente du ciment varie entre 0,9 à 1,2 g/cm<sup>3</sup> et sa masse volumique absolue varie de 2,8 à 3,2 g/cm<sup>3</sup>. Les compositions chimiques sont représentées sur le Tableau 14.

**Tableau 14.** Compositions chimiques du ciment (en pourcentage).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
22,17	4,53	5,04	64,55	1,02	1,34	0,00	0,42	0,21

### 3.2.5. Eau de gâchage

Sous l'influence de l'eau et en fonction des quantités ajoutées à la terre, cette dernière change de consistance et passe de l'état solide à l'état boueux et en fin elle atteint l'état liquide. Quand le sol est sec, il est dépourvu de toute cohésion. En revanche, lorsque le matériau est imbibé d'eau, elle peut être remodelée sous plusieurs aspects : mottes, patte, brique comprimée etc. Un excès d'eau fait perdre à la terre la qualité d'être remodelée, elle perd sa consistance et devient difficile à travailler. En effet, à l'état visqueux, le sol manifeste moins de résistance. Quand la terre dépasse la limite liquide ( $\omega_L$ ), elle devient coulant et ne prend plus de forme. Les aspects, sous lesquels le matériau sol peut se présenter, ont des limites : limite de plasticité ( $\omega_P$ ) et limite de liquidité ( $\omega_L$ ). Ces limites sont variables et fonction de la nature de la terre. Quand l'écart des valeurs de ces 2 limites est grand, l'indice de plasticité de la terre examinée est élevé ( $I_P = \omega_L - \omega_P$ ).



**Figure 40.** Eau utilisée pour les préparations.

La préparation de tout mélange rend indispensable l'ajout d'une quantité d'eau bien dosée, notamment pour mélanger la terre le ciment et/ou la chaux et des fibres. La quantité d'eau à ajouter est relative à la nature du sol et de l'usage prévu du produit fini.

Dans notre étude, l'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil à la Faculté des Sciences de Rabat.

### **3.3. Méthodes de caractérisation des blocs de terre comprimée (BTC) :**

#### **3.3.1. Essais de résistance à la compression $R_c$**

La propriété mécanique la plus déterminante pour le choix des matériaux constituant les murs d'un bâtiment [89]. Cette résistance à l'état sec amène définir une résistance dite nominale avec une pression simple de bloc de terre crue conformément à la norme NF EN14617-15. Il s'agit du paramètre mécanique le plus important, il va déterminer l'architecture et le dimensionnement des constructions [90].

La Résistance maximale à la compression est déterminée par l'équation (13).

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (13)$$

$R_C$  : Résistance à la compression du bloc (MPa) ;

$F$  : Charge normale maximale du bloc (KN) ;

$S$  : Surface moyenne des faces du test ( $\text{cm}^2$ ).

- La résistance en compression à l'état sec ( $R_{CS}$ ) sert à définir la résistance nominale en compression simple des blocs (en terre crue) compressée selon la norme XPP 13-901 [36] : l'opération consiste à superposer deux demi blocs joints par un mortier de ciment puis exercer une compression simple sur le présent échantillon jusqu'à sa rupture.
- Les blocs humides ont des propriétés mécaniques faibles en comparaison avec leur état sec. Pour savoir les caractéristiques minimales des blocs humides on doit les tester dans leur état le moins favorable. L'essai de la résistance à la compression humide ( $R_{CH}$ ) est semblable à celui de la résistance la  $R_{CS}$ , seulement, l'échantillon doit être immergé, complètement, dans de l'eau pendant 2 heures.

➤ **But :**

Le test de l'écrasement permet d'évaluer la résistance à la compression des blocs. Les blocs sont écrasés à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la construction. La machine d'essai universelle disponible au niveau de l'université : laboratoire de mécanique au Centre de Recherche Forestière (CRF) a été utilisée pour cet essai d'écrasement.



**Figure 41.** Appareil pour la réalisation des essais mécanique.

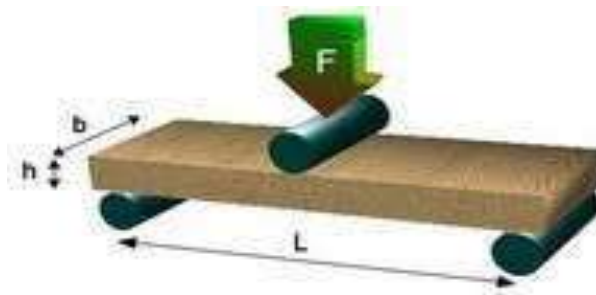
➤ **Principe :**

Le test consiste à exercer sur un échantillon de bloc une compression jusqu'à la rupture. L'objectif est de définir la Résistance Nominale en Compression sèche et humide des BTC.

➤ **Mode opératoire :**

Poser l'échantillon de BTC entre les plateaux de la presse. Appliquer la charge d'une manière continue jusqu'à la rupture complète de l'échantillon. Relever la charge maximale supportée par l'échantillon au cours de l'essai.

### 3.3.2. **Essais de la résistance à la traction $R_T$ due à la flexion en trois points**



**Figure 42.** Essai de flexion en trois points.

L'essai de flexion en trois points permet de contrôler la qualité in situ des blocs de terre comprimée. L'importance de cet essai in situ n'est pas à démontrer, quand on sait que souvent il n'y a que ce contrôle de fait [90].

La contrainte maximale de traction due à la flexion est déterminée par la formule empirique suivante :

$$R_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{L-100}{b \cdot h^2} \cdot F \quad (14)$$

Où :

- $R_t$  (en MPa) : La Résistance à la Traction par Flexion à 3 pts,
- $F$  (en N) : La force de rupture,
- $L$  (en mm) : Distance séparant les deux appuis,
- $h$  (en mm) : L'épaisseur du BTC
- $b$  (en mm) la largeur du BTC.

➤ **But :**

L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

➤ **Principe :**

Le BTC testé est posé (sur une de ces grandes faces) sur deux appuis espacés d'une distance  $L$  et perpendiculairement à la longueur du bloc. Dans l'axe au-dessus du bloc, parallèle au petit côté, on pose un autre appui surmonté d'un plateau sur lequel sera exercée une force croissante jusqu'à la rupture du bloc testé. On obtient une valeur de rupture en flexion.

### **3.3.3. Essai d'humidification - séchage ou cycle de mouillage séchage alterné**

Le but de l'essai est l'évaluation de la résistance à l'état humide du matériau terre stabilisée lorsqu'il est soumis à une succession de période pluviales (gorger d'eau en saison d'hiver, sécher en saison d'été). L'essai est réalisé sur les blocs de terre comprimée qui sont soumis à cinq cycles de mouillage-séchage. Cependant, pour un cycle, les blocs de terre comprimée doivent être immergés pendant 5 heures dans l'eau puis séchées à l'étuve pendant 24 heures sous une température de 105 °C.

Notre étude s'appuie sur l'essai d'absorption totale en fonction du mode d'humidification – séchage réalisés sur les blocs de terre comprimé.

## **1.4.1. Propriétés thermiques**

### **3.3.4.1. Transfert de chaleur thermique**

On peut définir le transfert thermique (nom commun : chaleur) comme étant le déplacement d'une énergie microscopique désordonné. Il s'agit, en réalité, d'un déplacement d'agitation thermique entre particules, ce qui conduit à des chocs invisibles à l'œil nu, entre ces dernières [91 ; 92].

Communément, on peut citer l'exemple d'échange de chaleur entre 2 corps à différentes températures. Il y a transfert thermique entre les deux corps. Il arrive que des transferts

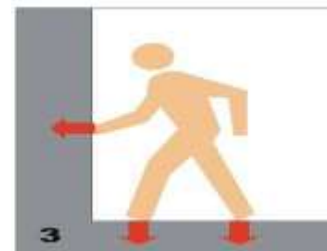
thermiques se réalisent un système de température invariable lorsqu'il change d'état physique (exemple : la fusion de la glace à 0°C sous la pression atmosphérique).

L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline thermodynamique en s'appuyant sur les trois modes (conduction, convection et rayonnement).

### 3.3.4.2. Modes de transfert de chaleur

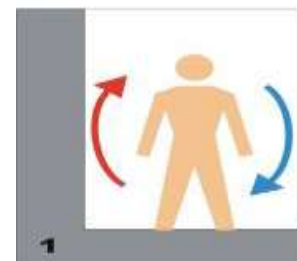
#### ➤ La Conduction

C'est le transfert de chaleur suite au toucher du corps à des surfaces ayant une température différente (sol, parois, mobiliers, etc.). On cite à titre d'exemple, lorsqu'un matériau quelconque est froid, au contact de la peau, il s'échauffe en recevant de la chaleur du corps humain et lui donne une sensation de se refroidir



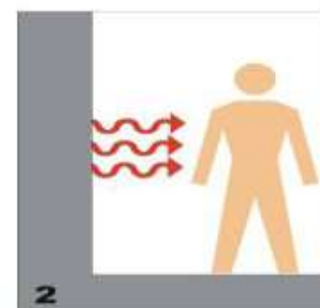
#### ➤ La Convection :

C'est la transmission de quantité de chaleur de la peau vers l'air environnant. Elle est fonction de la température de l'air environnant et de la température des parties du corps à son contact (peau ou vêtement). Le transfert de chaleur se fait dans le sens du plus chaud vers le plus froid et on dit que la peau se refroidit ou se réchauffe.



#### ➤ Le Rayonnement :

C'est le transfert de quantité de chaleur à distance par ondes électromagnétiques. L'échange de chaleur est perçu au niveau de la peau et passe par rayonnement entre la surface du corps humain et l'air qui l'entoure. Ainsi, le froid est ressenti près d'objets froids (mur, fenêtre, etc).



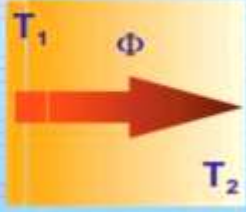
### 3.3.4.3. Performances thermiques des matériaux :

#### ➤ La conductivité thermique :

La chaleur se propage dans un solide par conduction. La conductivité thermique est la quantité d'énergie traversant un mètre carré de matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence d'un degré de température. Elle s'exprime en Watt par mètre par Kelvin ( $W/(m.K)$ ). Elle représente la faculté d'un matériau qui est prédisposé à être transpercé par la chaleur. Le coefficient lambda ( $\lambda$ ) d'un matériau est une caractéristique de son pouvoir à transférer de la chaleur par conduction, on dit donc, que plus ce coefficient est élevé plus le matériau est conducteur de chaleur et inversement, plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant thermique. Lorsque la conductivité d'un matériau est au-dessous de  $0,065 W/(m.K)$ , il est désigné comme isolant thermique. La conductivité de différents matériaux et les agents qui l'influencent sont illustrés par la figure 43. On peut citer : le poids volumique, la teneur en eau, la porosité, la nature du matériau.

Pour des matériaux du bâti, leur porosité interne ajoutée à leur exposition à l'eau peut modifier considérablement leur conductivité thermique que ce soit en condition sèche ou humide. Pour les matériaux isolants (conductivité  $< 0,065 W/(m.K)$ ), la conductivité n'est considérée qu'en condition sèche car il n'est pas conseillé de les utiliser en milieu humide (condensation, vapeur d'eau, etc.) [93].

	sec	hum.		Conductivité thermique $\lambda$ des matériaux en $W/m.K$
	0,028		polyuréthane	
Matériaux isolants	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 $kg/m^3$	
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 $kg/m^3$	
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 $kg/m^3$	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	cuivre	



**Figure 43.** Valeurs de la conductivité thermique de certains matériaux du bâti [103].

Les méthodes de son identification sont très variées. Elles peuvent être regroupées en deux classes [94] :

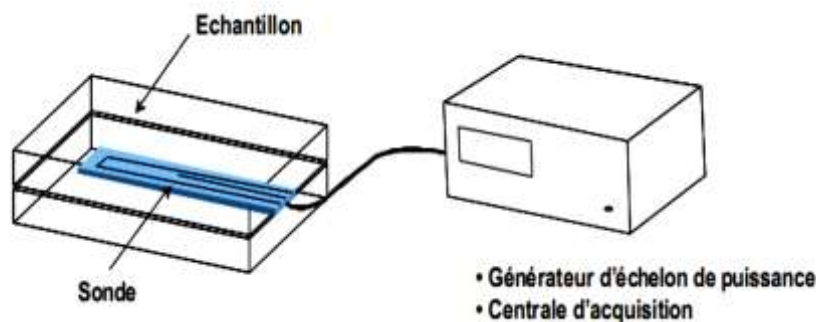
- Les méthodes en régime stationnaire :

- Méthode de la plaque chaude gardée ;
  - Méthode du flux radial ou méthode du cylindre ;
  - Méthode des boîtes.
- Les méthodes en régime instationnaires :
- Méthode du fil chaud ;
  - Méthode Hot Disk ;
  - Méthode Flash ;
  - Méthode du plan chaud semi-infini ;
  - Méthode du ruban chaud.

Nous avons utilisé La méthode du fil chaud pour notre programme expérimental.

Dans les années 30, Stalhane et PVK 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 [95]. C'est la méthode utilisée pour notre programme expérimental.



**Figure 44.** Principe de mesure à l'aide d'un fil chaud [95].

La conductivité s'obtient par la résolution de l'équation (19) de la chaleur en géométrie cylindrique infinie :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (19)$$

De plus, pour compléter l'étude des propriétés des blocs de terre comprimée, nous nous sommes intéressés à leurs propriétés thermiques, ce sont des grandeurs qui caractérisent le

comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de température et plus particulièrement à leur pouvoir isolant au travers de la mesure de leur conductivité thermique. Dans notre cas, nous avons déterminé les propriétés thermo-physiques à l'aide de l'appareil CT-mètre.

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[46]. Les grandeurs déterminées sont : La conductivité thermique  $\lambda$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) et la Résistance thermique  $R_{th}$  ( $\text{m}^2.\text{K. W}^{-1}$ ).



**Figure 45.** Appareils CT-mètre utilisé.

➤ **Résistance Thermique :**

Pour une paroi construite en matériaux isolants, on parle de capacité isolante qu'on définit par le coefficient  $R_{th}$  et qu'on appelle résistance thermique, elle est exprimée en  $\text{m}^2.\text{k/W}$ . Les matériaux définis comme isolants thermiques sont utilisés partout dans une paroi, sauf s'il y a influence sur leurs propriétés.  $R_{th}$  est défini comme l'inverse de la  $Q$  traversant  $1 \text{ m}^2$  d'une paroi pour un amortissement de température de  $1 \text{ }^\circ\text{K}$  entre la face extérieure et la face intérieure de la paroi.

- Lorsqu'une paroi est construite avec des matériaux qui ont, approximativement, les mêmes conductivités thermiques, on considérant qu'un flux de chaleur vient traverser, perpendiculairement, les faces de la paroi, on aura :

$$R_{th} = e/\lambda \quad (20)$$

Avec :

$e$  : Epaisseur de la couche (m) ;

$\lambda$  : Conductivité thermique (W/(m.K)).

- Quand une enveloppe est construite de matériaux qui ont des différentes valeurs de conductivités thermiques, on suppose qu'un flux de chaleur vient transpercer, perpendiculairement, les faces de cette enveloppe, on aura :

$$R_{th} = 1/U = R_{si} + R_{se} \quad (21)$$

Avec :

$U$  : Coefficient de transmission surfacique de la couche ;

$R_{si}$  : Résistance superficielle vis-à-vis de l'intérieur ;

$R_{se}$  : Résistance superficielle vis-à-vis de l'extérieur [93].

### **3.4. Processus de production des blocs de terre comprimée (BTC) :**

#### **3.4.1. Décapage**

La couche supérieure organique de la terre n'est pas intéressante pour le BTC. Ainsi on procède au décapage de cette couche avant l'exploitation de la carrière. Alors, à l'endroit choisi pour creuser, dégager la surface du sol de toute végétation. Si la végétation est soigneusement enlevée et mise en réserve, elle pourra être utilisée plus tard pour une plantation autour de la maison terminée ou pour une nouvelle plantation à l'endroit où l'on a retiré la terre.

#### **3.4.2. Extraction**

La terre provient de la désagrégation de la roche mère qui à travers le temps a subi des transformations occasionnées par :

- Des érosions mécaniques ;
- Des conditions climatiques extrêmes ;
- Des transformations chimiques ;

- Des migrations verticales des composantes vers le bas sous l'effet de la pluie et vers le haut par l'effet de l'évaporation.

En effet, la quantité de terre qui doit être retirée pour empêcher qu'il n'y ait des matières organiques dans le mélange varie selon les endroits. Cela peut aller jusqu'à une profondeur de plus d'un mètre où qu'il ne soit pas nécessaire d'enlever quoique ce soit. Normalement, 15 à 30 cm de profondeur suffisent. Par ailleurs, l'opération d'extraction fait appel à l'emploi d'un outillage manuel simple, le plus souvent, hérité des travaux agricoles ou des travaux manuels routiers ou miniers : Pics, pioches, bèches, pelles, barre à mine, râtaux... L'extraction manuelle de la terre exige beaucoup de main d'œuvre. Divers engins mécaniques peuvent être employés.

### **3.4.3. Stockage et Séchage**

Le matériau doit être bien stocké dans un endroit bien aéré et suffisamment vaste permettant l'épandage en couche mince ou cyclone à air chaud pour le séchage. Cet endroit doit être aussi éloigné de tout débris végétaux pouvant rendre le matériau inutilisable.

### **3.4.4. Tamisage**

Le tamisage est indispensable lorsqu'on sent la présence de défauts de texture comme les gros grains et les matières organiques. Le diamètre des grains dépend de la technique employée et de la spécificité du projet. On tamise le plus souvent entre 5 et 10 mm. Dans le cas présent on a adopté le tamis fixe de 5 mm pour le tamisage. Il s'agit d'un treillis métallique fixé sur un cadre rigide en bois. Ce cadre est maintenu obliquement par des appuis rigides suspendus verticalement. On fait passer la terre dans un tamis de mailles de dimensions égale à 5 mm qui retiennent les constituants grossiers et indésirables. Le chargement se fait manuellement à l'aide des pelles par des manœuvres.

### **3.4.5. Mélange, compactage et cure des blocs de terre comprimée**

Actuellement on cherche à perfectionner les résistances de tous les matériaux disponibles localement et utilisés dans les constructions, plusieurs traitements ont vu le jour. Il s'agit, par exemple, des traitements du sol par le ciment, par la chaux ou par les fibres. Ces techniques d'amélioration de la résistance des matériaux locaux font appel à la technique de mélange afin d'homogénéiser et de bien répartir le traitement dans l'ensemble du matériau.

➤ **La Codification des Mélanges :**

Dans cette étude, nous avons pensé à codifier tous les mélanges utilisés dans nos analyses, pour rendre la lecture aisée et facile. Les codes adoptés et appliqués se composent d'un ensemble de lettres majuscules.

- Pour la production des blocs de terre on mélange de la chaux, de la terre et des fibres de longueurs différentes, leur code en guise d'exemple est le BTCCF qui signifie : Bloc de terre comprimée stabilisé en chaux et renforcé en fibres. Tous les codes des mélanges utilisés et étudiés sont regroupés dans le Tableau 15.

**Tableau 15.** Codes des mélanges des BTC stabilisés et / ou renforcés

Codification	Composants		
	Sol + eau (%)	Chaux (%)	Fibres de Palmier Nain (%)
BTC0F0	100	0	0
BTCC5F0	95	5	0
BTCC10F0	90	10	0
BTCC12F0	88	12	0
BTCC0F1	99	0	1
BTCC5F1	94	5	1
BTCC10F1	89	10	1
BTCC12F1	87	12	1
BTCC0F1.5	98.5	0	1.5
BTCC5F1.5	93.5	5	1.5
BTCC10F1.5	88.5	10	1.5
BTCC12F1.5	86.5	12	1.5
BTCC0F2	98	0	2
BTCC5F2	91	5	2
BTCC10F2	88	10	2
BTCC12F2	86	12	2
BTCC0F2.5	97.5	12	2.5
BTCC5F2.5	92.5	0	2.5
BTCC10F2.5	87.5	5	2.5
BTCC12F2.5	85.5	10	2.5

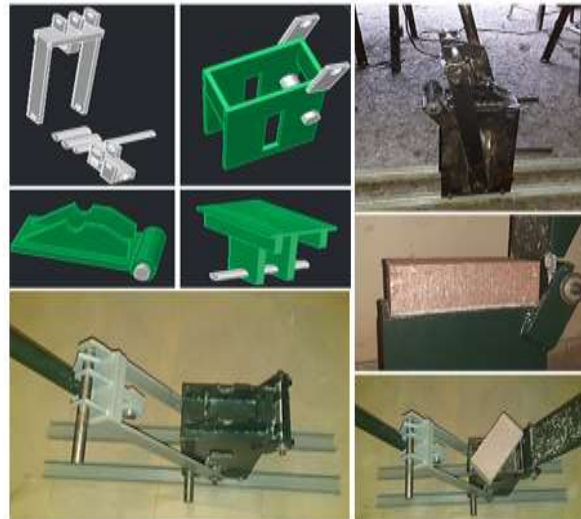
- Pour les blocs de terre confectionnés de terre, de chaux et de fibres de longueurs fixes, à titre d'exemple, SCLF désigne un bloc constitué de sol, de ciment ou de chaux et de fibres:

- S : Sol ;
- C : ciment  $C_T$  : teneur de ciment T% ( $C_0 = 0\%$ ,  $C_5 = 5\%$ ,  $C_{10} = 10\%$ ,  $C_{12} = 12\%$ ) ;
- F : fibres de Palmier Nain  $F_T^Y$  : teneur de fibres T% et Y est longueur de fibres en cm (( $F_0^{0.1} = 0\%$ ,  $F_1^{0.1} = 1\%$ ,  $F_{1.5}^{0.1} = 1.5\%$ ,  $F_2^{0.1} = 2\%$ ,  $F_{2.5}^{0.1} = 2.5\%$ ) ; ( $F_0^1 = 0\%$ ,  $F_1^1 = 1\%$ ,  $F_{1.5}^1 = 1.5\%$ ,  $F_2^1 = 2\%$ ,  $F_{2.5}^1 = 2.5\%$ ) ; ( $F_0^3 = 0\%$ ,  $F_1^3 = 1\%$ ,  $F_{1.5}^3 = 1.5\%$ ,  $F_2^3 = 2\%$ ,  $F_{2.5}^3 = 2.5\%$ )) ;
- L : chaux  $L_T$  : teneur de chaux T% ( $L_0 = 0\%$ ,  $L_5 = 5\%$ ,  $L_{10} = 10\%$ ,  $L_{12} = 12\%$ ).

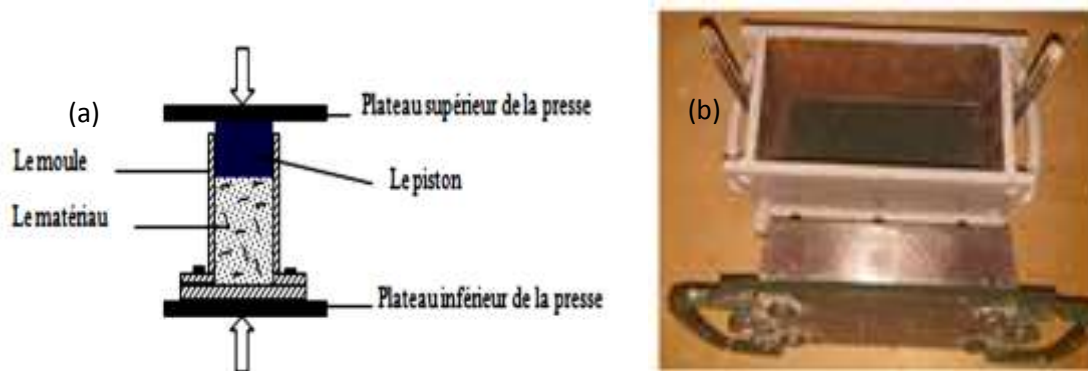
➤ **Préparation des mélanges et élaboration des éprouvettes :**

Après avoir criblé le matériau, on passe au malaxage. Il est particulièrement important pour la qualité du BTC. Un mélange homogène est indispensable, avec ou sans stabilisant. Cependant, le sol sec est d'abord concassé grossièrement pour obtenir des particules de dimension inférieure à 5 mm. La préparation des mélanges s'effectue manuellement en ajoutant la chaux et/ou des fibres de Palmier Nain en différentes fractions au sol pendant 2 minutes. L'eau est ensuite versée, suivis d'un malaxage, pendant une dizaine de minutes, jusqu'à ce que le mélange devienne relativement homogène. Ensuite, les blocs de terre comprimée sont confectionnés avec une presse manuelle d'un moule de volume 10 cm x 20 cm x 10 cm. Cette presse que nous avons dessinée, a été réalisée par un forgeron traditionnel dans un quartier populaire à El Karia à Salé (Figure 46). Pour fabriquer les blocs de terre comprimée par la méthode statique, nous utilisons la même procédure que celle de la méthode manuelle sauf que le moule utilisé est fabriqué en acier, Il est constitué de cinq pièces, qui une fois assemblées, permettent un moulage d'un volume de : 10 cm x 10 cm x 20 cm (Figure 47). Durant toutes les étapes de cette étude, on a soumis les mélanges à une contrainte de compactage de 5 MPa.

La mesure de la teneur en eau optimale d'un BTC, par l'essai Proctor, ne peut être prise en considération, car dans le cas du compactage dynamique, l'énergie dégagée ne peut être la même que celle du compactage statique. Par conséquent, nous avons été amenés à utiliser une presse à compactage statique, en adoptant, la méthode élaborée par le CDE [96].



**Figure 46.** Différentes étapes de la fabrication de la presse manuelle pour la confection de BTC.



**Figure 47.** (a) Schéma du moule pour confectionner des BTC (b) Moule pour la méthode statique

➤ **Cure des blocs de terre comprimée :**

Lorsqu'on démoule le bloc, il est récupéré avec les mains en tout prudence pour éviter tout incident qui peut affecter le bloc frais et fragile. Les conditions de conservation des BTC jouent un rôle primordial dans le processus de leur stabilisation et dans l'évolution de leur résistance. Le séchage trop rapide peut endommager les blocs car ils vont perdre leur teneur en eau optimale. Pour éviter cela, les blocs de terre doivent, non seulement, être abrités du soleil, mais aussi être maintenus en ambiance humide : risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissures de retrait.

Pour notre cas, les blocs de terre comprimée (BTC) ont été recouverts de sacs plastiques humides pendant 7 jours au laboratoire. Tous les essais de caractérisations sont faits après 28

jours de cure. Pour les blocs utilisés dans nos essais, nous les avons, auparavant, desséchés à l'étuve pour atteindre une masse constante.



**Figure 48.** Eprouvettes confectionnées.

### **3.5. Conclusion**

À travers ce chapitre, Nous avons présenté les différentes caractéristiques de tous les matériaux utilisés pour la fabrication des BTC. Il s'agit de la terre stabilisée par des liants (ciment ou chaux) et/ou renforcée par des fibres de Palmier Nain.

Dans ce chapitre, nous avons évoqué l'ensemble des données recueillies de la bibliographie ainsi que les données obtenues des essais de caractérisations effectués lors de notre étude. Les différentes techniques de caractérisations physique, chimique, durabilité, structurale, thermique et mécanique ont été également décrites.

De plus, dans le présent chapitre, nous avons fait le point sur tous les mélanges employés et leurs compositions pour confectionner les BTC. Cette richesse de données nous a aidés à bien analyser les résultats obtenus et d'avoir une bonne visibilité concernant les effets des différents facteurs étudiés sur les propriétés des BTC.

## **Chapitre 4. Interprétation des résultats et discussion**

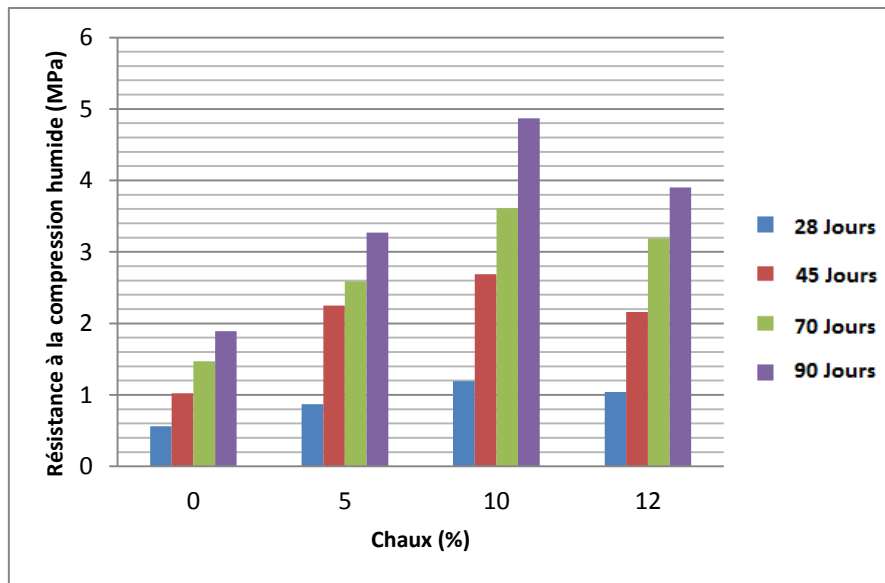
### **4.1. Introduction**

Ce chapitre a pour objet de présenter et interpréter l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol provenant du territoire de la province de Khénifra. Cependant, la maîtrise des données relatives à la résistance aux compressions de compactage est très intéressante dans notre processus expérimental. Ça nous donne la possibilité de bien étudier le comportement du bloc de terre comprimée à s'adapter à supporter les poids (charges normales) lorsqu'il est utilisé dans la construction des murs qualifiés de porteurs. Dans ce sens, nous allons chercher à établir : l'effet de la longueur et du taux des fibres de Palmier Nain, ainsi que l'ajout des liants (ciment et/ou chaux) sur les caractéristiques mécaniques, thermique et sur la longévité des BTC. En plus, on doit noter que nous avons examiné l'influence du temps de cure sur les caractéristiques mécaniques des BTC avec ajout de chaux, dans le but de se décider sur la meilleure méthode de cure et sa durée, pour la suite de notre travail, tout en mettant en évidence l'effet de mode de compactage sur la résistance mécanique des blocs de terre comprimée. Dans un premier temps, et par rapport au poids sec du mélange, nous avons utilisé 3 pourcentages de chaux (0%, 5%, 10% et 20%) et 4 pourcentages de fibres de Palmier Nain (0, 1%, 1.5%, 2% et 2.5% ; d'une longueur de 10 mm et 40 mm), pour étudier l'influence de leurs teneurs sur caractéristiques mécaniques et sur la durabilité du BTC. Dans le deuxième temps, l'étude sera consacrée aux matériaux qui sont confectionnés à base de sol et de méthode de compactage statique comparée à la méthode manuelle. Les BTC ont été stabilisés avec l'ajout de fibres de Palmier Nain (à des teneurs en masse allant jusqu'à 2.5% avec un pas de 0.5% et des longueurs moyennes de 0.1 cm, 1cm et 3 cm) et/ou d'un liant (ciment dont les teneurs en pourcentage sont 0%-5%-10%-12% ou de même pour la chaux).

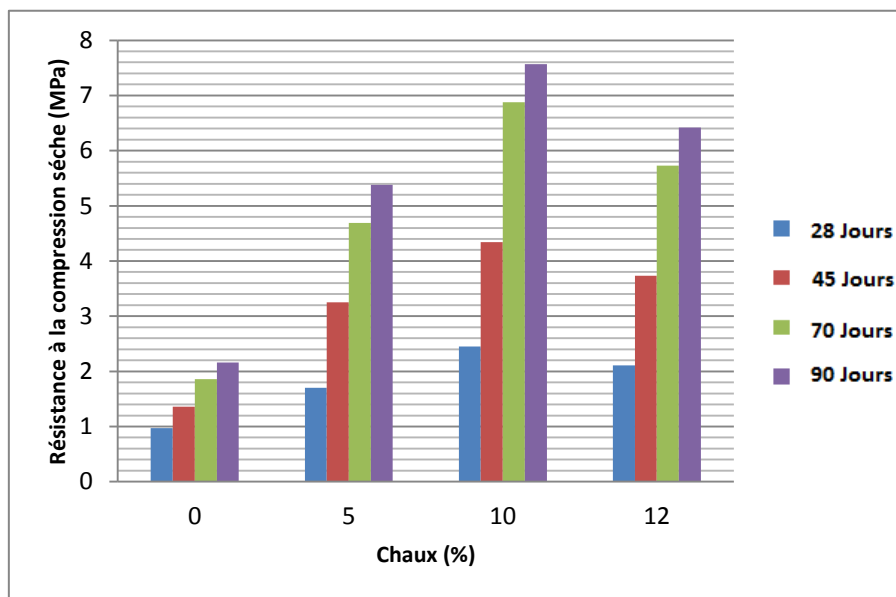
### **4.2. Interprétation des résultats**

#### **4.2.1. Effet du temps de cure sur les résistances mécaniques des BTCS**

L'évolution des résistances mécaniques sèches et humides des blocs selon la durée de cure et des différentes teneurs en chaux (5%, 10% et 12%) est présentée respectivement dans les figures 49 et 50.



**Figure 49.** Histogramme de la résistance à la compression humide des blocs avec ajout de chaux en fonction de la durée de cure.

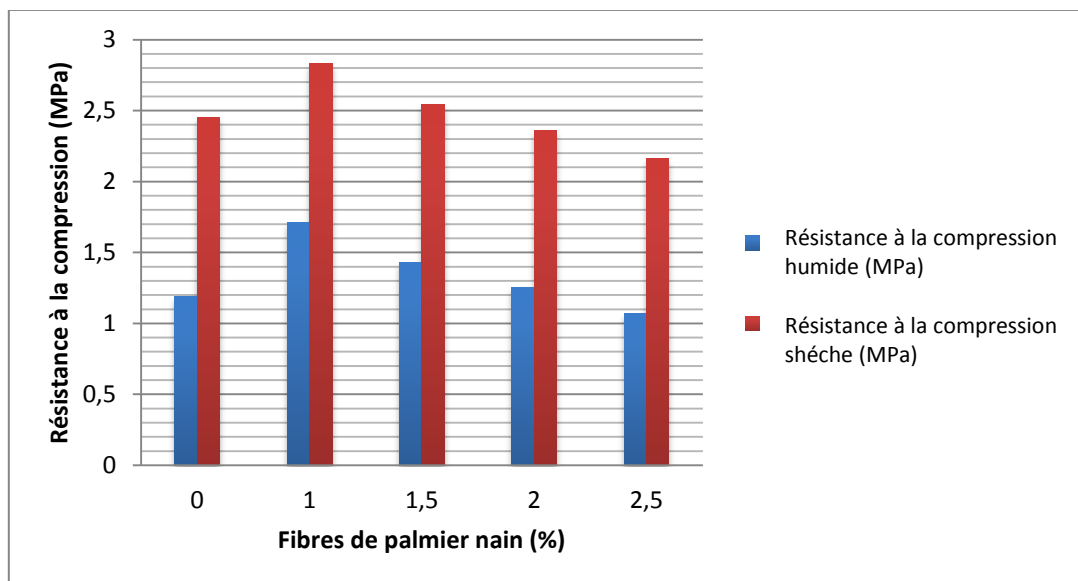


**Figure 50.** Histogramme de la résistance à la compression sèche des blocs avec ajout de chaux en fonction de la durée de cure

Les résultats d'écrasement des BTCS observés dans les Figures 49 et 50 de 28 à 90 jours de cure ont confirmé que la chaux éteinte est un bon stabilisant pour les BTCS. À travers les figures ci-dessus on enregistre que la résistance à la compression sèche s'accroît en fonction de l'élévation du taux de chaux avec un seuil de 10% pour des valeurs de 2.75 MPa (28 jours), 4.37 MPa (45 jours), 6.88 MPa (70 jours), 7.57 MPa (90 jours), et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à une teneur en chaux de 12 %. En ce qui concerne les

résistances à la compression humides, elles ont été au moins égale à la moitié de la résistance à la compression sèche. Nous sommes arrivés à montrer que toutes les formulations ont abouti à une stabilisation efficace ( $R_c > 4$  MPa). La valeur optimale de compression est obtenue avec un dosage de 10 % de chaux éteinte. Au vue de cela nous pouvons donc conclure que l'augmentation des résistances au compactage est relative à la durée de cure et du taux de dosage. Ces résultats sont confirmés par l'étude d'Al-Mukhtar et al. [64] qui a confirmé, ainsi, que la résistance à la compression confinée s'élève avec le taux de chaux et avec la durée de cure 50°C. Tandis que, Venkatarama [97] a constaté que les blocs de terre avec ajout de chaux déposés dans une ambiance de 20 à 30°C, demandent un temps de cure plus long d'un mois pour avoir une évolution acceptable de la résistance. Des résultats similaires sont obtenus par (Jamil, 2021) [12].

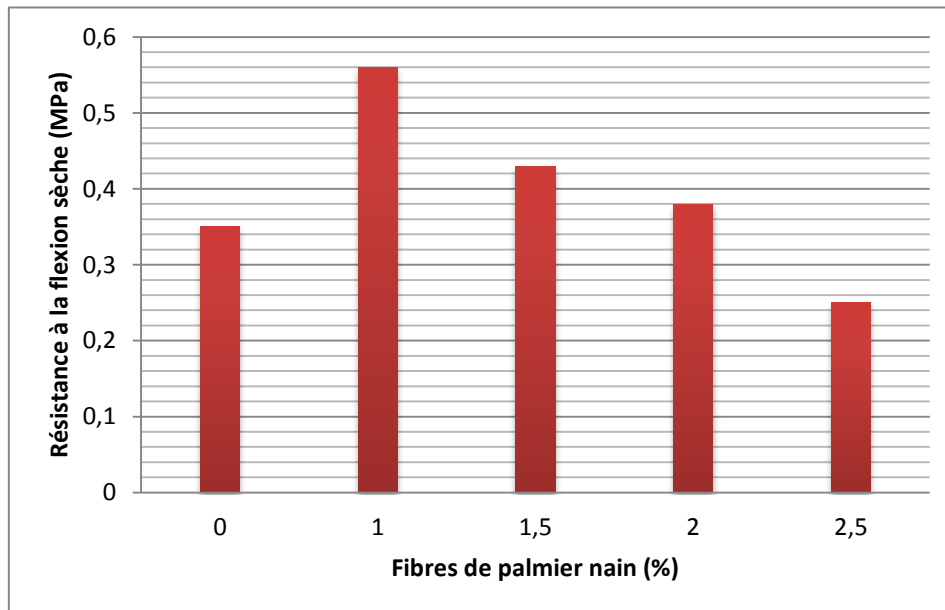
#### 4.2.2. Effet du taux de fibres sur les résistances mécaniques des BTCS



**Figure 51.** Histogramme de la résistance à la compression sèche et humide des blocs de terre avec ajout de 10% de chaux et de fibres à 28 jours de cure au laboratoire.

Les données évoquées dans l'histogramme ci-dessus démontrent que la résistance à la compression sèche et humide à vingt-huit jours avec un taux de 10% en chaux augmente selon l'augmentation du dosage en fibres de palmier Nain jusqu'à 1 % et au-delà de ce seuil on observe une diminution jusqu'à 2.5 %. La Croissance est d'autant importante en allant d'une teneur en fibres de 0 à 1% et la décroissance est d'autant importante en allant d'une teneur de 1 à 2.5 %.

Dans notre cas, lorsqu'on associe aux fibres un ajout de 10% de chaux, la fonction est croissante jusqu'à 1 % de teneur en fibre (optimum) et au-delà devient décroissante.

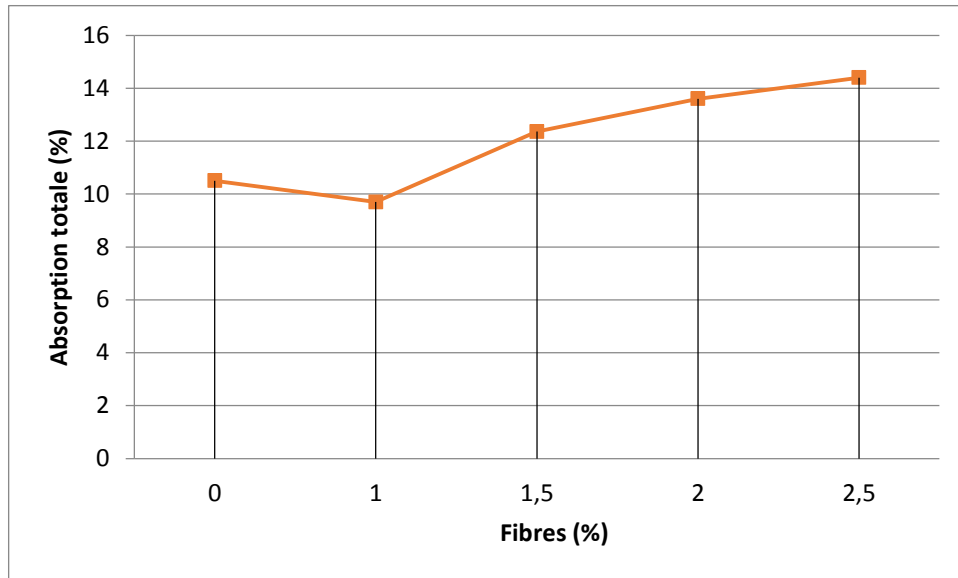


**Figure 52.** Résistance sèche à la flexion en trois points des blocs en sol plus 10% de chaux et de fibres à 28 jours de cure au laboratoire.

On observe dans la Figure 52, une croissance progressive de la résistance à la flexion à base de 10% de chaux et d'un taux variable 0 à 2.5% de fibres. La résistance moyenne maximale est atteinte avec une teneur de 1% de fibres et 10% de chaux avec une valeur de résistance moyenne de 0.56 MPa, 0.43 MPa Pour un dosage de 1.5 %, 0.38 MPa pour un dosage 2% et 0.25 MPa pour un dosage de 2.5%. Ces valeurs sont, en effet, plus grandes que la valeur des blocs non stabilisées (ni à la chaux ni aux fibres) qui est de 0,25 MPa. Si l'on retient cette dernière valeur comme valeur de référence, on peut affirmer que la résistance à la flexion des blocs de terre comprimée augmente relativement au dosage. Cela est confirmé par Ziegler et al. [10] qui montrent que l'utilisation de fibres naturelles dans la confection des blocs a diminué les dimensions des fentes de rétrécissement et a rendu meilleur la longévité et la RT. De même, MILLOGO et al. [14] ont montré que les valeurs de la RF des blocs renforcés en fibres plus importante que celle des blocs non fibrés. Ils ont concluent cette amélioration et relative, essentiellement, au caractère résistant des fibres à la traction.

#### **4.2.3. Influence de la teneur en fibres sur l'absorption totale (ATE)**

Pour comprendre l'attitude des BTCS au contact de l'eau et dans le temps L'ATE des tests pour 5 cycles de mouillage-séchage. La figure 53 présente l'absorption totale des BTC comprimée le pourcentage en fibres, pour 10% de chaux à 28 jours de cure au laboratoire.

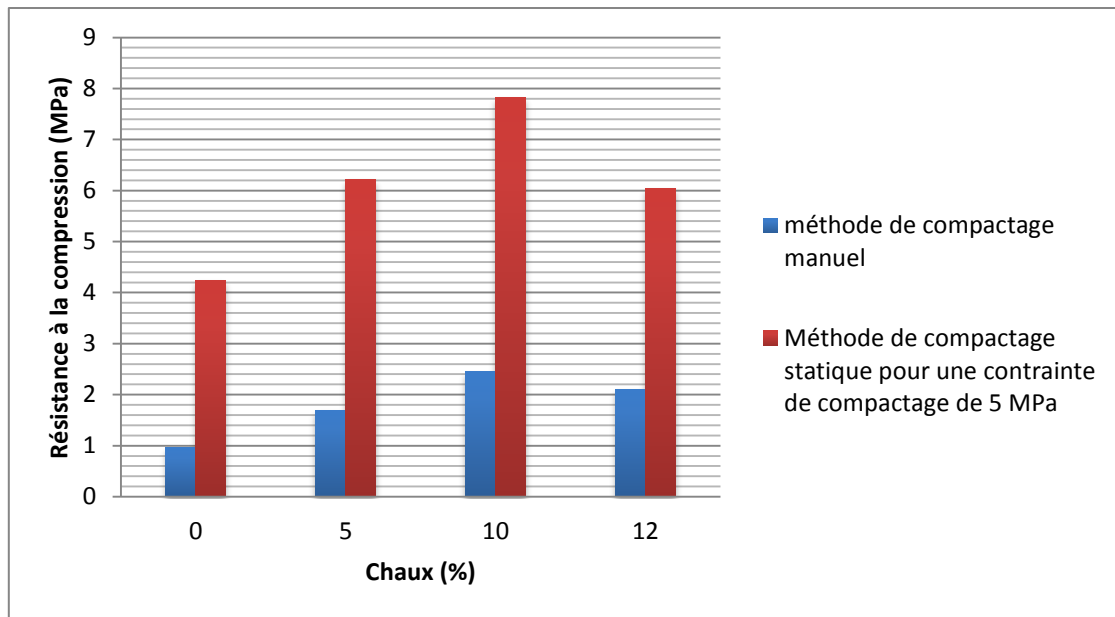


**Figure 53.** Variation de l'adsorption totale des blocs en terre avec ajout de 10% de chaux et fibre à 28 jours de cure au laboratoire.

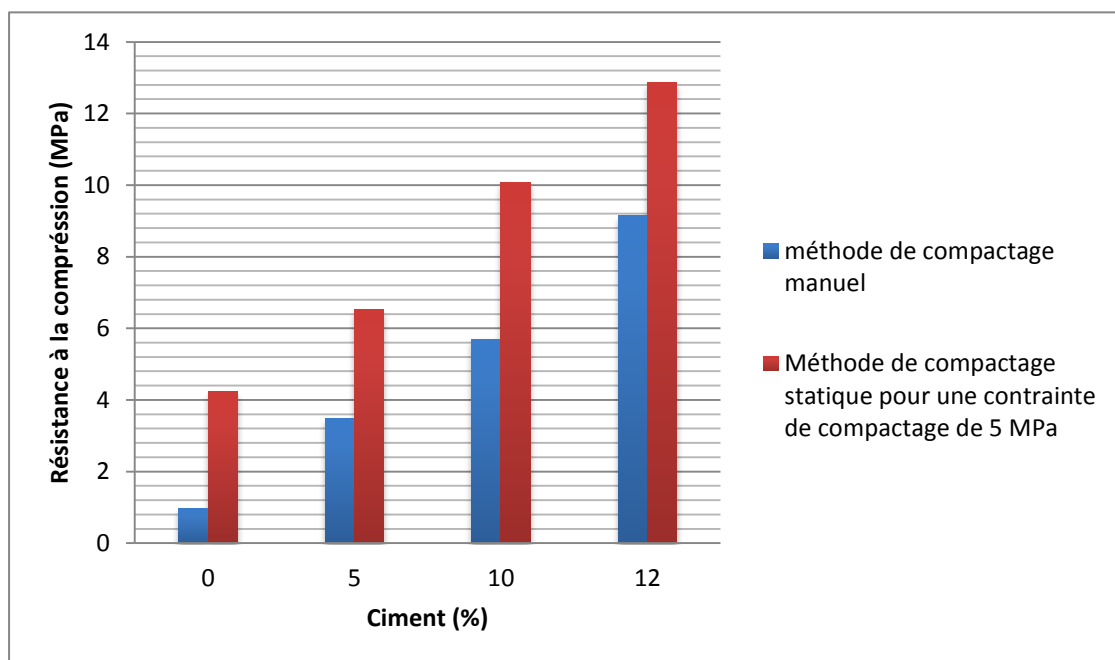
La Figure 53 montre que, pour la teneur en chaux de 10%, quand le pourcentage de fibres passe de 0 % à 1 %, l'absorption totale diminue, faiblement, mais pour un dosage en fibre de 1 %, on constate une augmentation significative d'absorption totale. De plus, On peut dire que l'absorption totale s'accroît avec l'élévation du taux en fibres. Ce résultat peut être argumenté en considérant que les fibres du palmier Nain ont une caractéristique hydrophile et l'introduction de cette des fibres crée plus des vides. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenues par de Salehan et Yaacob [98], ils ont confirmé que l'élévation de l'ATE avec l'accroissement du taux de fibres est prouvé.

#### **4.2.4. Effet de la méthode de compactage sur la RC simple de BTCS**

Les Figures 54 et 55 schématisent les changements de la RC des BTCS selon la méthode de compactage (statique ou manuelle).



**Figure 54.** Résistance de compression à 28 jrs de cure en rapport avec le taux de chaux et des méthodes de compactage (statique ou manuel).



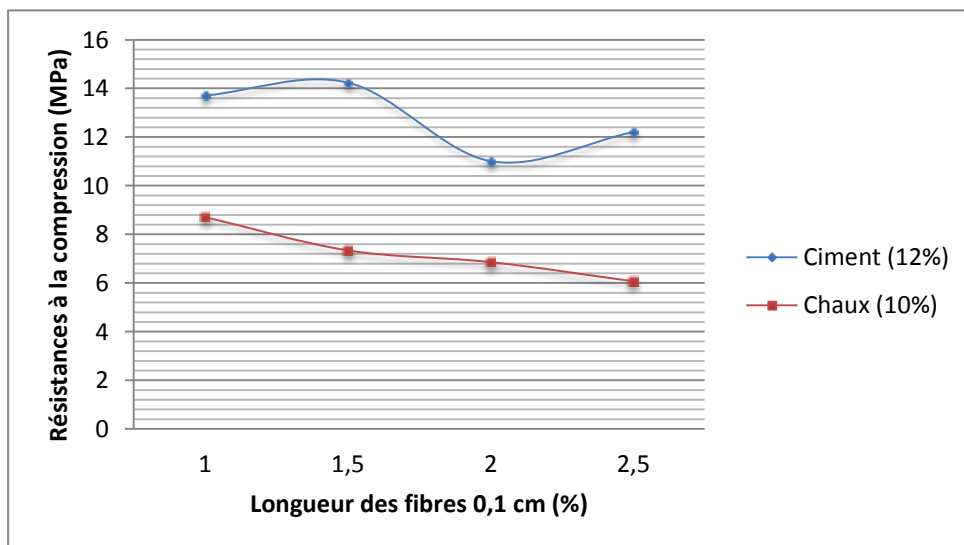
**Figure 55.** Résistance à la compression à 28 jrs de cure en rapport avec le taux de ciment et des méthodes de compactage (statique ou manuel).

- L'analyse des résultats des figures 54 et 55, indiquent, clairement, que les résistances mécaniques pour les blocs de terre comprimée compactés à la méthode statique, sont supérieurs aux résultats obtenus par compactage manuel et en fonction des différents teneurs en liants. On peut avancer que la compression statique est plus appropriée aux matériaux argileux.

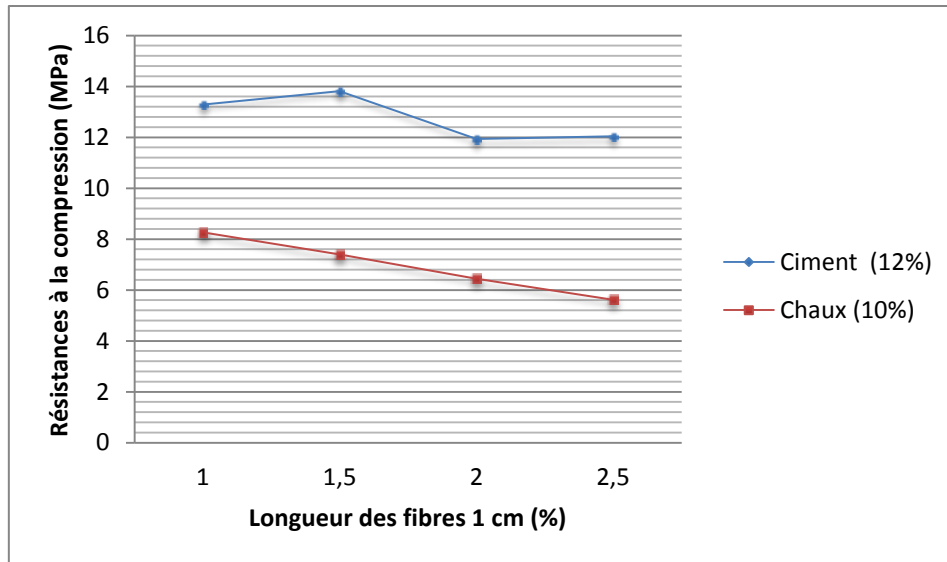
- Les résistances (traction, compression), des blocs de terre comprimée, augmentent d'une manière significative après une cure à l'atmosphère humide de 28 jours et une teneur en chaux variant de 5% à 10%. Cet accroissement est le résultat de l'élévation du potentiel des cations échangeables calcium provoqué par la chaux. Au-delà de 10% de chaux, on assiste à une diminution de la résistance.
- Pour l'ajout du matériau ciment, la RC s'élève avec le taux du ciment (variation de 0% à 12%). La résistance varie de 4.24 MPa à 12.87 MPa en passant par 6.53 MPa pour 5% de ciment et 10.08 MPa pour 10% de ciment, donc la résistance mécanique croît en fonction du dosage en ciment.

#### 4.2.5. Effet de la longueur des fibres sur la résistance mécanique des BTCS

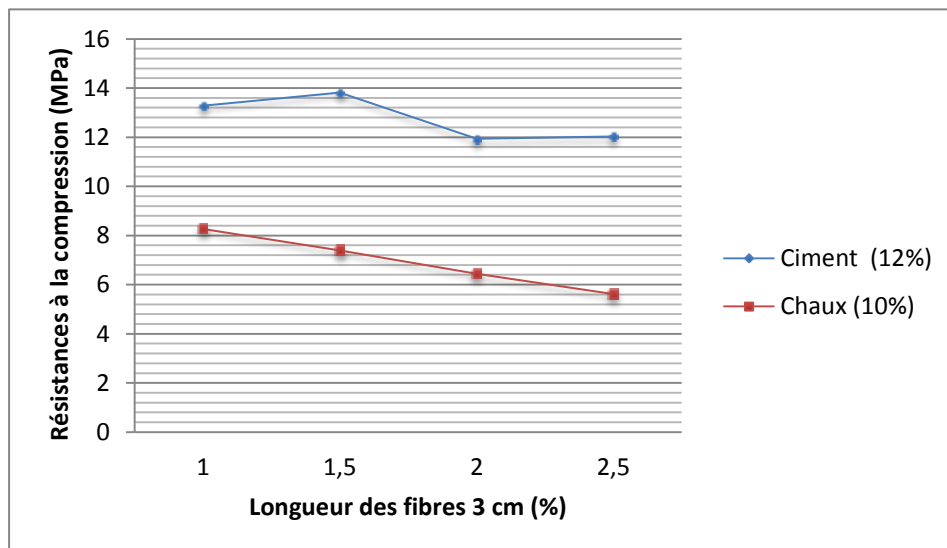
Les Figures de 56 à 64 présentent les variations des résistances mécaniques (RC et résistance à la flexion (RF) en trois points) des BTC, en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.



**Figure 56.** Influence de la longueur 0.1 cm et le taux de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5 MPa).



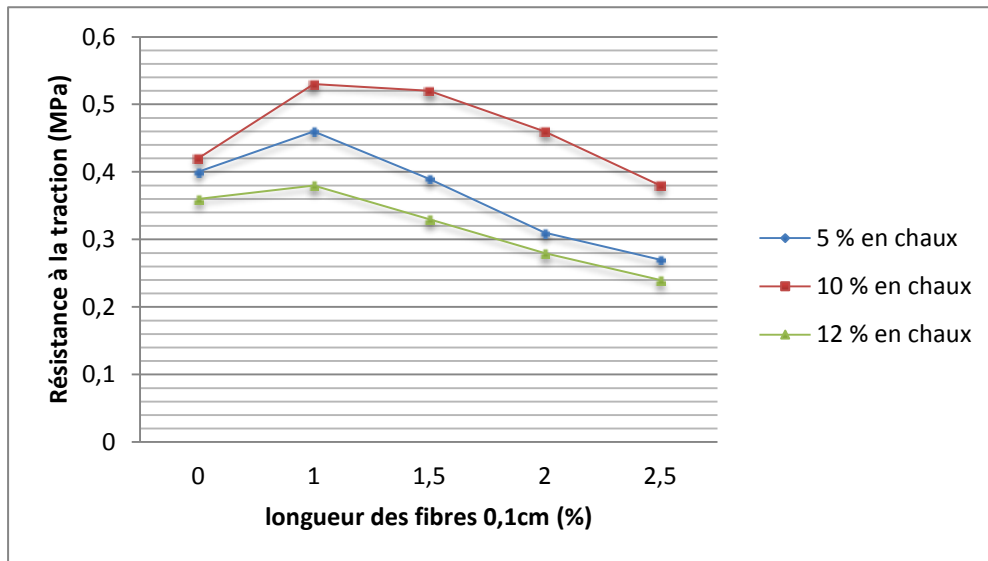
**Figure 57.** Influence de la longueur 1 cm et le taux de fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5 MPa).



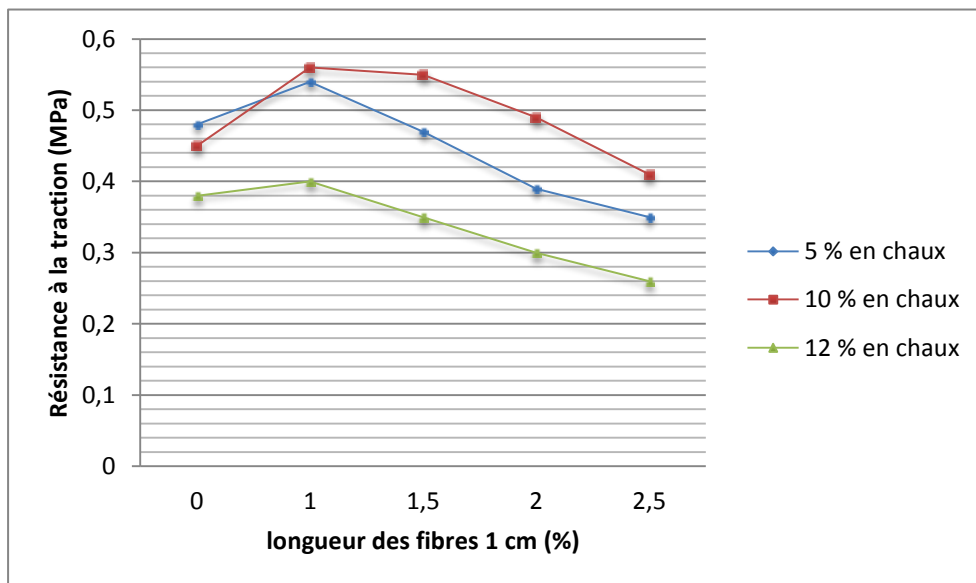
**Figure 58.** Influence de la longueur 3 cm et la taux en fibres sur la résistance à la compression à 28 jours en considérant le taux de liants (avec une contrainte de compression de 5MPa).

Les données décrites dans les Figures 56, 57 et 58 démontrent que la résistance maximale à la compression a été obtenue en étudiant trois catégories de fibres d'un pourcentage de 1% et une teneur en chaux de 10%. La résistance maximale à la compression a été obtenue pour ces trois types de fibres pour un pourcentage de 1.5 % et une teneur en chaux de 12%. Il faut noter que l'ajout de fibres augmente le taux de porosité entraînant un abaissement de la RC. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus par S. Nasla [89].

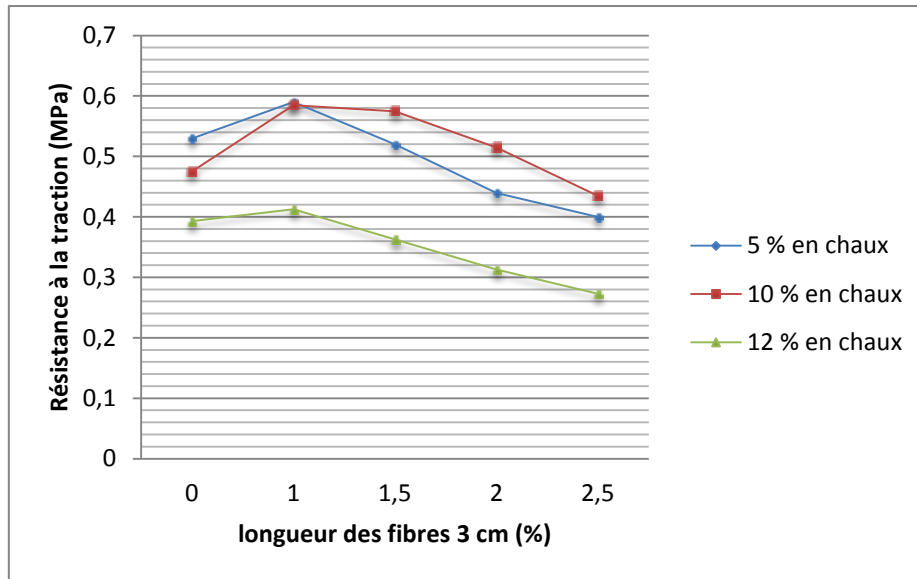
On remarque que les valeurs obtenues sont, en effet, plus grandes que la valeur obtenue pour les blocs non stabilisés (ni aux liants « ciment ou chaux » ni aux fibres) qui est de 4.24 MPa. Des études ont été faites sur des BTC renforcés avec des taux de fibres entre 0,2 à 0,8 % en poids et 2 dimensions de 30 mm et 60 mm. On peut confirmer, à travers, les résultats obtenus que l'addition des fibres d'Hibiscus Cannabinus, a rendu plus performantes les propriétés physiques et mécaniques des blocs. La performance la plus élevée a été enregistrée avec 30 mm de longueur de la fibre [14].



**Figure 59.** Influence de la longueur 0.1 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).

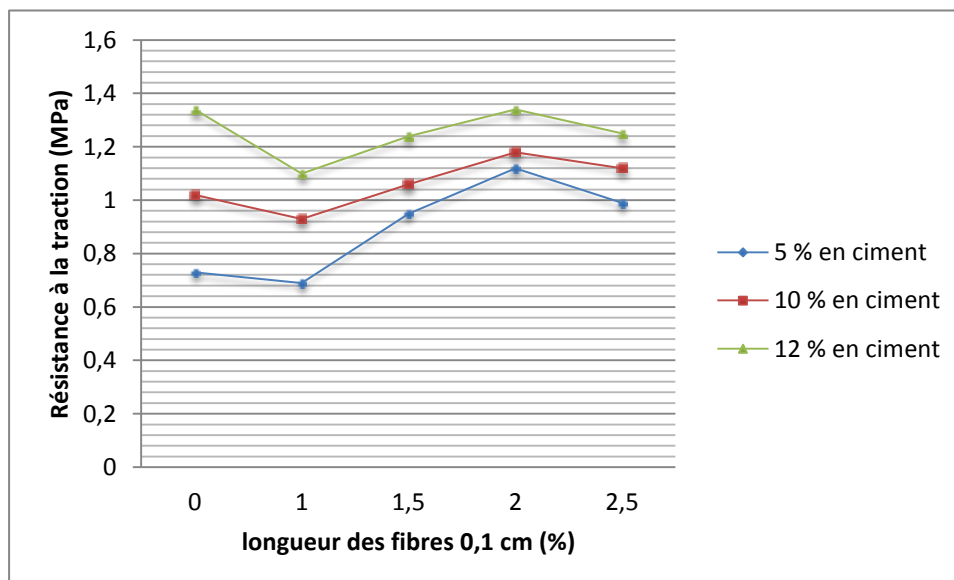


**Figure 60.** Influence de la longueur 1 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).

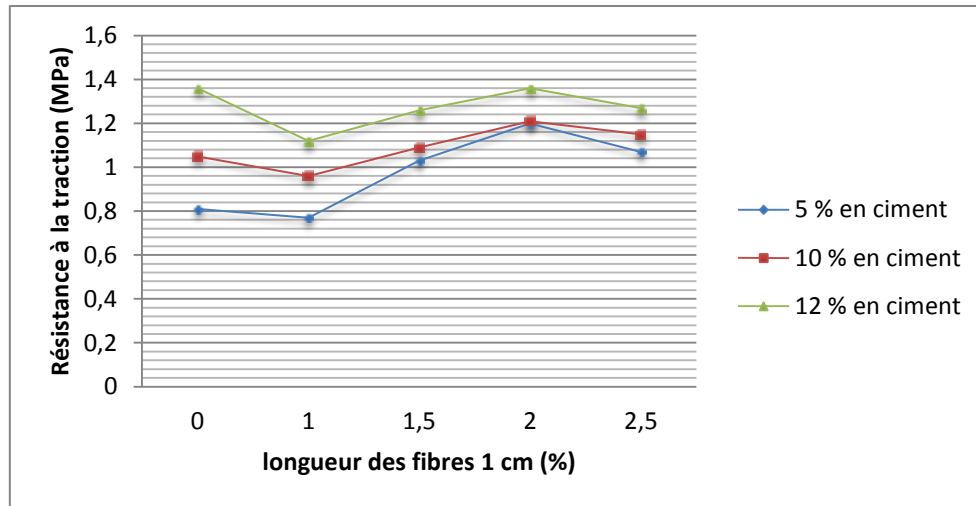


**Figure 61.** Influence de la longueur 3 cm et du pourcentage en fibres sur la résistance à la traction à 28 jours et selon la teneur en chaux (à un compactage de 5 MPa).

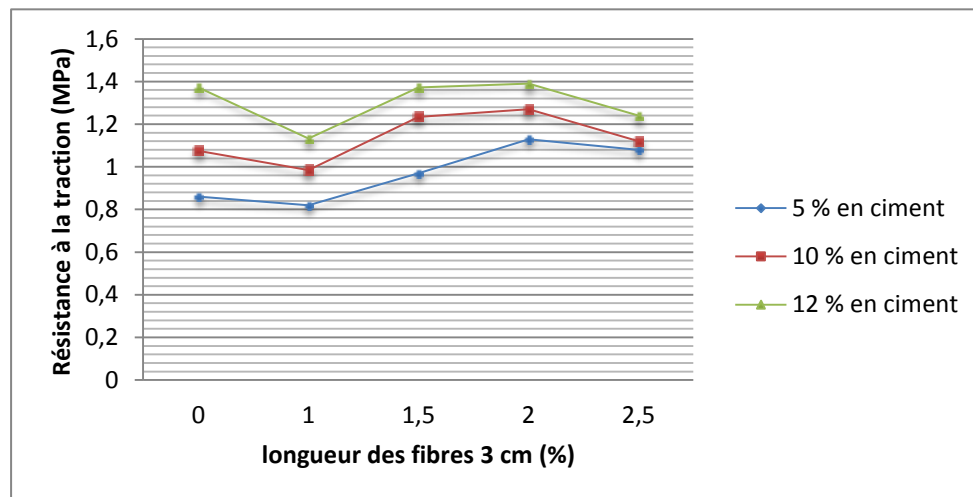
Les résultats des Figures 59, 60 et 61 montrent qu'il y a accroissement de la résistance à la traction avec la progression du taux en fibre à concurrence de 1%, pour différentes longueurs et pour différentes teneurs en chaux. Ainsi, on peut confirmer qu'il y a une augmentation de la résistance à la traction pour une quantité en chaux ne dépassant pas 10%. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus pour la RC.



**Figure 62.** Influence de la longueur 0.1 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).



**Figure 63.** Influence de la longueur 1 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).

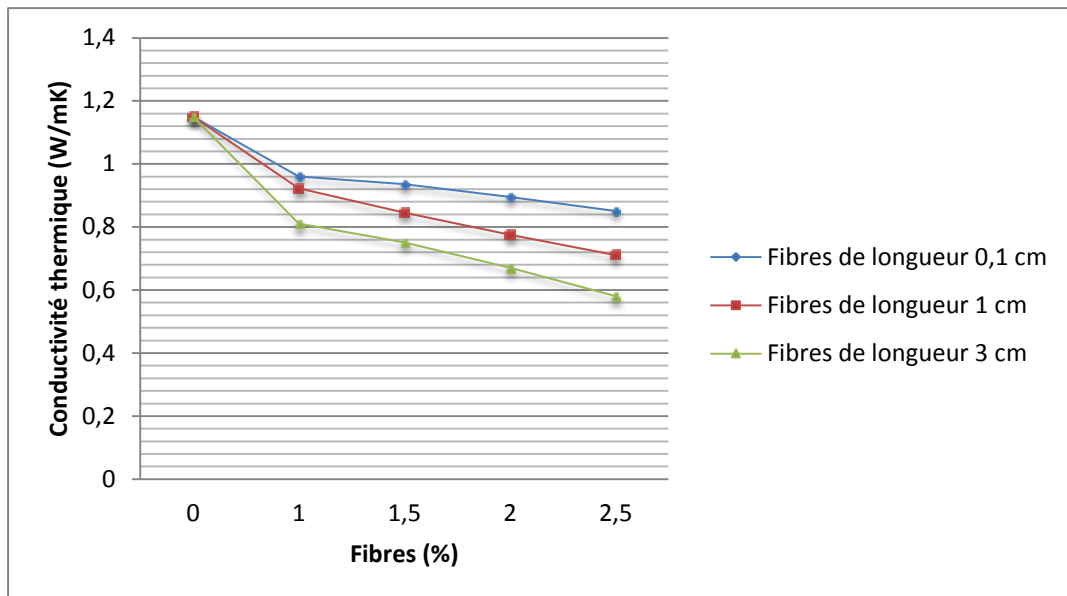


**Figure 64.** Influence de la longueur 3 cm et de la teneur en matière fibreuse la résistance à la traction vingt-huit jours et selon le taux de ciment (pour une compression de 5MPa).

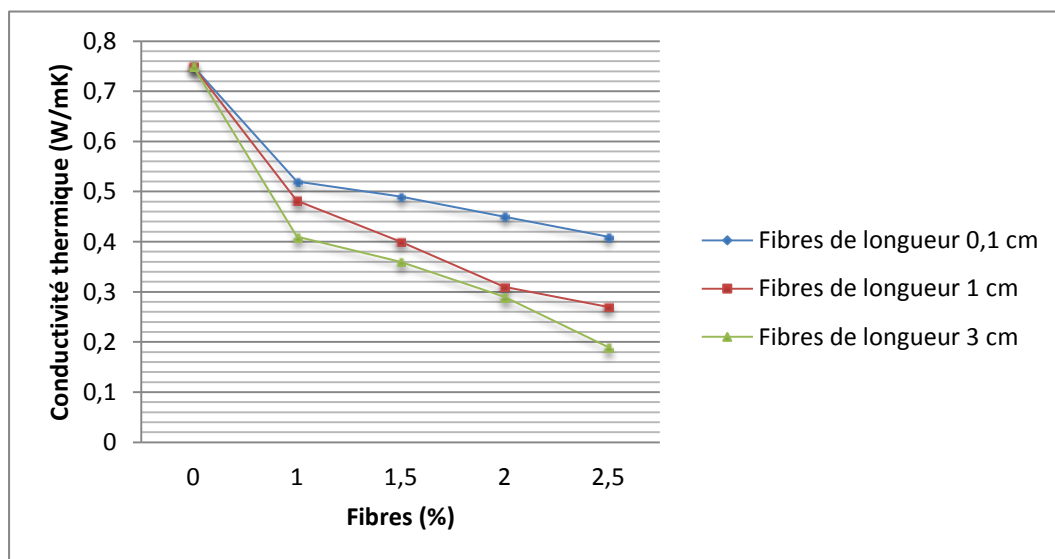
On observe dans les Figures 62, 63 et 64, une croissance progressive de la résistance à la traction concernant des BTC en ajoutant des fibres et de différents teneurs en ciment. La résistance maximale est atteinte avec une teneur de 12% de ciment et une teneur de 2% en fibre de longueur de 3 cm, à ces taux, la résistance moyenne est de 1.37 MPa. Par contre, on observe une décroissance plus importante quand on augmente la teneur en fibre au-delà de 2% pour tous les types de fibres. Les valeurs de la résistance à la traction pour des blocs en terre comprimée stabilisés par le ciment et renforcés par différentes teneurs en fibres sont, en effet, plus grandes que la valeur obtenue pour des blocs non stabilisés (ni au ciment ni aux fibres) qui est de 0.39 MPa. Si l'on retient cette dernière valeur comme valeur de référence, on peut

affirmer que la résistance à la traction des BTC augmente relativement au dosage. Cela est confirmé par Ziegler et al. [10] qui montrent que l'incorporation des fibres dans la production des Blocs rabaisse les dimensions des fissures de retrait et augmente la longévité et la résistance à la traction.

#### 4.2.6. Effet de la longueur des fibres sur la conductivité thermique de BTCS



**Figure 65.** Influence de la longueur et de la teneur en fibres sur la conductivité thermique à 28 jours en fonction de 12 % de ciment (pour une contrainte de compactage de 5 MPa).



**Figure 66.** Influence de la longueur et de la teneur en fibres sur la conductivité thermique à 28 jours en fonction de 10% de chaux (a) (pour une contrainte de compactage de 5 MPa).

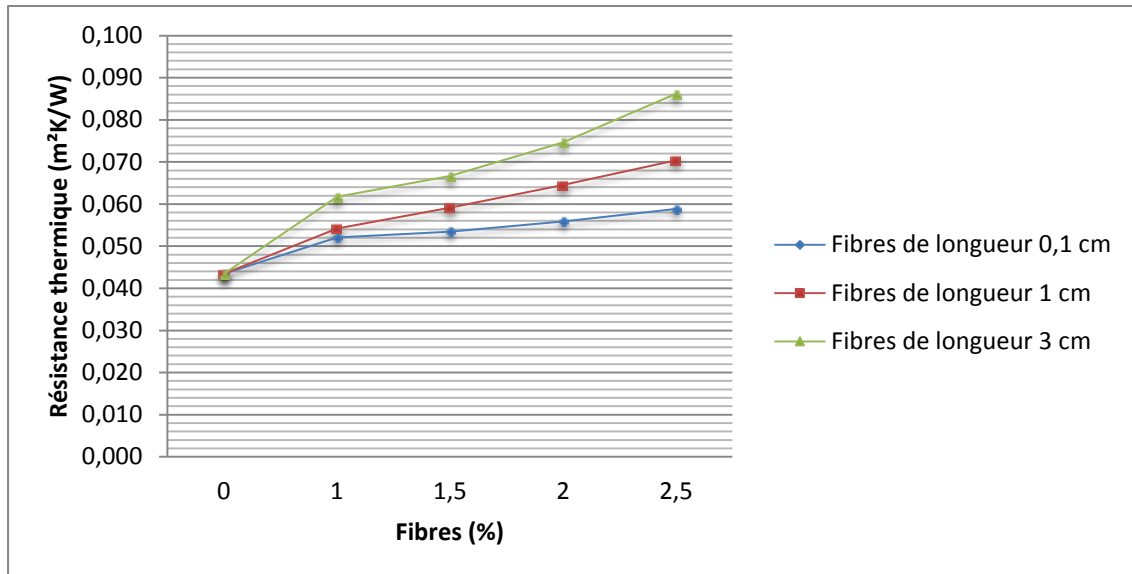
D'après la Figure 65 et en retenant les deux meilleurs résultats concernant la résistance mécanique nous remarquons que pour le dosage de 12 % de ciment sans ajout de fibres, la valeur de la conductivité est de 1.15 W/m K et vu la Figure 66, pour le dosage de 10% en chaux sans ajout de fibres, la valeur de la conductivité est de 0.75 W/m K. On remarque que la valeur de la conductivité du ciment est supérieure à celle de la chaux.

Cependant, d'après les Figures 65 et 66, on peut observer que la conductivité thermique et inversement proportionnelle au pourcentage de fibre. On remarque une diminution de la conductivité thermique selon l'augmentation du pourcentage de fibre, cette diminution est due au fait de la présence de fibres dans la matrice qui augmente la porosité et les poches d'air au niveau des interstices. Ce résultat confirme les travaux d'autres auteurs [14, 99]. De plus, à partir de la valeur de 1.15 W/m K pour les BTC confectionnés avec un dosage de 12% de ciment ou de la valeur de 0.75 W/m K pour les BTC confectionnés avec un dosage 10% de chaux sans ajout des fibres, on remarque une décroissance de la conductivité thermique. Nous citons à titre d'exemple :

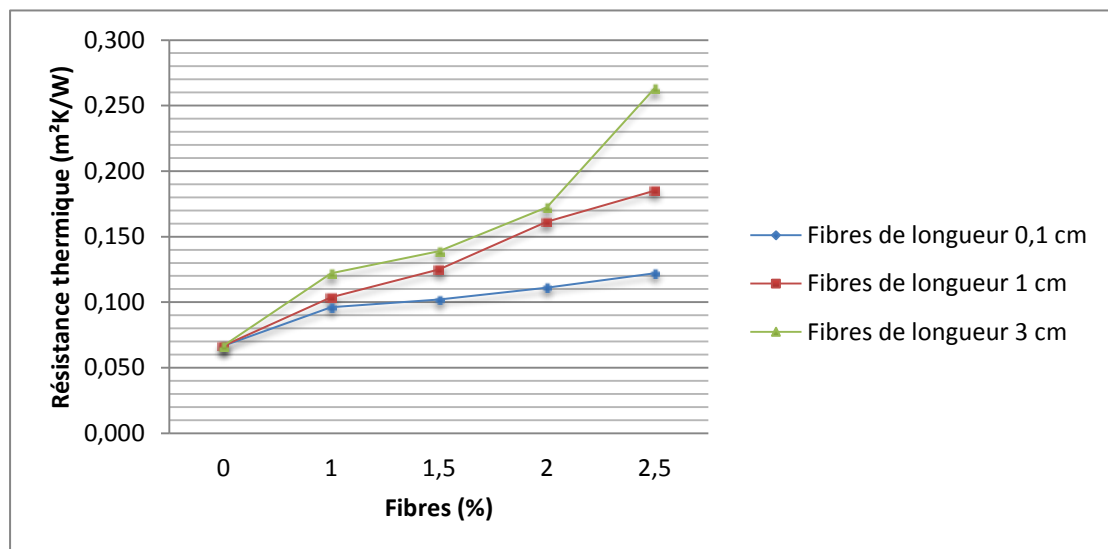
- Pour l'ajout de 1% de fibres de longueur respectives 0.1 cm, 1 cm et 3 cm nous obtenons les valeurs de 0,96 W/m K, 0,92 W/m K et 0,81 W/m K pour la teneur de 12% en ciment.
- Pour l'ajout de 1% de fibres de longueur respectives 0.1cm, 1 cm et 3 cm nous obtenons les valeurs de 0.52 W/m K, 0.48W/m K et 0.41 W/m K pour la teneur de 10% de chaux.

Nos résultats sont similaires à des résultats obtenus par Ben Mansour [100].

#### 4.2.7. Effet de la longueur des fibres sur la résistance thermique des BTCS



**Figure 67.** Influence de la longueur et la teneur de fibres sur la résistance thermique à 28 jours en fonction de 12% de ciment (pour une contrainte de compactage de 5 MPa).



**Figure 68.** Influence de la longueur et la teneur de fibres sur la résistance thermique à 28 jours en fonction de 10% de chaux (pour une contrainte de compactage de 5 MPa).

D'après données des Figures (67 et 68), nous pouvons observer que la résistance thermique va augmenter avec l'augmentation de la teneur en fibres avec différentes longueurs. La résistance thermique est, alors, inversement proportionnelle à la conductivité thermique

$R_{th} = e / \lambda$ . On constate, aussi, que la résistance thermique des blocs stabilisés à la chaux est meilleure que celle des blocs stabilisés au ciment.

### 4.3. Conclusion

Cette partie de notre étude a été consacrée à rechercher les possibilités qui améliorent les caractéristiques mécaniques et la capacité à être plus insensible à l'eau du BTC en utilisant des dosages croissants de fibres de Palmier Nain avec différentes longueurs. Il s'agit d'atteindre la plus importante stabilisation des BTC. Nous avons employé des matériaux chimiques tels que la chaux et le ciment. Sachant que la chaux a des propriétés pouzzollanique dont la réaction est lente, Nous nous sommes penchés sur l'analyse de la durée de cure dans le but de diminuer la période de stockage des BTC, ainsi que l'influence des types de compactages sur ses propriétés mécaniques.

Les expériences que nous avons menées, nous ont conduits à tirer les conclusions suivantes :

- L'ajout de fibres de Palmier Nain a conduit à une amélioration de la résistance à la compression sèche ( $R_{sc}$ ) enregistrée pour les blocs renforcés avec 1% de fibres (valeur maximum de la  $R_{cs}$  en fonction des % de fibres), stabilisés avec de la chaux ou du ciment et à des compactages de 5MPa par rapport aux BTC non renforcés (0% de fibres).
- Les résultats montrent que 10% en dosage de chaux avec la terre et 1% en dosage de fibres de Palmier Nain présentent la meilleure RC sèche, alors que la résistance à la compression humide est faible par rapport à la résistance à la compression sèche.

Le facteur, temps de cure, progressif (28, 45, 78 et 90 jours) a une influence positive sur la résistance mécanique des BTC.

- L'incorporation de matière fibreuse Doum/Nain a abouti à augmenter la résistance à la flexion enregistrée pour les blocs renforcés avec 1% de fibres (valeur maximum de la  $R_f$  en fonction des % de fibres), stabilisés avec la chaux ou le ciment et compactés à une contrainte de 5 MPa par rapport aux BTC non renforcés (0% de fibres).
- La teneur en eau joue un rôle important sur la stabilité et sur la durabilité des blocs de terre comprimée. De plus, L'absorption d'eau ATE des BTCs stabilisés à 10% en matériau chaux s'accroît avec l'élévation du dosage en fibres de palmier Nain, ce qui s'expliquent, notamment, par le fait que les fibres d'origines végétales sont hydrophiles et ont un caractère poreux, donc elles absorbent de l'eau.

- La conductivité thermique diminue avec la teneur en fibres. Plus on ajoute de fibres, plus la conductivité baisse.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

---

Le matériau terre a marqué l'histoire des peuples, le vécu de l'homme a été, toujours, lié étroitement à l'existence à proximité de cette matière, que ce soit dans les domaines agricole ou industriel.

De prestigieux édifices ont parcouru le temps pour se dresser haut et témoigner du génie architectural de nos ancêtres. La terre crue offre un grand intérêt socio-économique, si on prend en compte son abondance et son exploitation facile. Alors que la modernisation commençait à s'installer, cette matière est repoussée au second rang par les assoiffés aux matériaux industriels (acier, ciment, béton, etc.). De nos jours et avec le changement du climat, la recherche tend à redonner au sol son rôle d'intervenant sauveur dans le bâti à l'échelle mondiale. Le bloc de terre comprimée est l'une des solutions mise en œuvre.

Le travail qu'on a effectué consiste à contribuer dans la revalorisation du sol comme matière de construction dans la région de Béni Mellal-Khénifra et de réintégrer d'une façon rationnelle dans le domaine de construction, en substituant l'utilisation des briques en ciment comme murs extérieurs par celles en terre.

L'étude bibliographique, tirée d'un nombre important de références bibliographiques et qui est basée sur une synthèse de résultats expérimentaux, montre que :

- La composition et la formulation des blocs de terres sont très variées ;
- Le traitement des terres naturelles contribue, efficacement, à l'amélioration des caractéristiques mécaniques, telles que la résistance à la compression et la résistance à la flexion ;
- Les propriétés physiques des blocs de terres sont affectées par l'ajout d'autres produits.

La première étape de notre travail expérimental consiste à faire tout d'abord une caractérisation générale des matériaux utilisés et elle a montré que :

- La terre utilisée pour cette étude est composée approximativement de 9% de gravier, 50 % de sable, 24 et 17 % d'argile, d'un indice de plasticité de 13.50%, d'une masse volumique des particules solides ( $\gamma_s$ ) de 2.635 g/cm<sup>3</sup>, la partie argileuse de notre sol est classée comme argile inorganique de plasticité moyenne.

- Le ciment utilisé est de type CPJ 42.5, la masse volumique absolue du ciment varie entre 2,8 à 3,2 g/cm<sup>3</sup>
- La chaux utilisée est une chaux éteinte produite au Maroc. La masse volumique apparente de la chaux est égale à 0.91g/cm<sup>3</sup> et la masse volumique absolue est égale à 2.23 g/cm<sup>3</sup>.
- Les fibres utilisées sont des fibres de Palmier Nain, le Palmier Nain a été recueilli dans une zone rurale de la région de Beni Mellal-Khènifra au Maroc.

Dans la deuxième étape, on a étudié l'effet de la stabilisation du sol par le ciment ou par la chaux ainsi que l'effet de l'addition des fibres sur les caractéristiques mécaniques, sur les propriétés thermomécanique et sur la sensibilité des blocs de terre à l'eau. De plus, on a étudié, l'influence des types de compactages et du temps de cure sur ces blocs.

D'après les résultats expérimentaux, on peut avancer les points suivants :

- L'étude expérimentale entreprise a des résultats qui prouvent l'amélioration de la RC sèche, de la résistance à la compression humide et de la résistance à la flexion des blocs avec 1% en fibres et 10 % de chaux.
- La  $R_{CS}$  des blocs de terre comprimée, stabilisés à la chaux s'accroît avec la durée de cure à l'étuve.
- Les résultats montrent, aussi, une baisse générale de l'absorption totale d'eau des blocs avec l'augmentation de la teneur en fibres de Palmier Nain jusqu'à 1% et 10 % en chaux.
- La méthode de compactage statique est mieux adaptée pour la fabrication des blocs de terre comprimée.
- Nous avons constaté à travers les différents essais que l'addition de ciment au sol, améliore la résistance mécanique mais influe sur la résistance thermique. Par ailleurs, l'addition de chaux au sol améliore la résistance thermique mais réduit sensiblement les propriétés mécaniques.
- Nous notons que l'ajout de chaux ou de ciment contribue à l'amélioration des résistances mécaniques par rapport aux blocs sans ajouts.
- Quand il s'agit de l'utilisation de fibres dans la construction, nous notons qu'elles sont d'un réel intérêt dans l'isolation thermique et limitent, aussi, les retraits et les fissures. Par contre, les fibres ont des résultats négatifs sur la résistance mécanique qui conduit à la fragilité de la matrice. Or, les fibres sont recommandées pour leurs meilleurs

résultats mécaniques en traction. Nous avons, aussi, observé que la conductivité thermique est abaissée avec l'augmentation des dosages en fibres de différentes longueurs.

- Le rabaissement de la conductivité thermique est favorable pour les bâtiments parce qu'elle réduit la transmission de la chaleur du milieu extérieur vers l'intérieur et régule la température à l'intérieur des bâtiments.

➤ **Perspectives :**

Selon les résultats obtenus et compte tenu de l'utilisation future effective de ces matériaux de construction, nous pouvons compléter la recherche sur les points suivants :

- Pour améliorer la résistance mécanique et l'isolation thermique des blocs de terre comprimée, nous pouvons ajouter des matériaux locaux présentant de bonnes résistances mécanique et thermique ou bien le changement de processus de la fabrication.
- Pour mieux caractériser les blocs de terre compactées, nous préconisons d'effectuer d'autres tests, à savoir : retrait, gonflement, résistance aux chocs, érosion, durabilité ainsi que les inerties thermique et hydrique.
- Essayer de construire des maisons en blocs de terre comprimée exposées aux conditions réelles du climat, qui devra être suivie sur un long terme, pour les évaluer et les comparer avec les matériaux de construction actuels.
- Encourager l'idée de construire avec des matériaux locaux en s'appuyant sur la stratégie de conception bioclimatique.
- réaliser des normes par les autorités compétentes permet d'encadrer la construction en terre au Maroc.

# *Bibliographie*

## *Bibliographie*

---

- [1] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, A. Kriker, “Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers”, *Constr. Build. Mater.*, 59, 161–168, 2014.
- [2] J.C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero & P.Walker, “Building houses local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, *Building and Environment*”, 36, 1119-1126, 2001.
- [3] R. Bahar, “Innovation et valorisation en génie civil & matériaux de construction”, Séminaire International, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 23-25 Novembre (2011). [admin. asso-web.com](http://admin.asso-web.com), consulté le 29/05/2015.
- [4] J.E. Oti, J.M. Kinuthia, J. Bai, “Engineering properties of unfired clay masonry bricks”, *Engineering Geology*, 107, 130–139, 2009.
- [5] Pittet D., Kotak T., “Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India”. *Ecomateriales 4, Paths towards, Sustainability conference*, November 2009, Bayamo, Cuba.
- [6] Martin S., Mazarron F. R., Canas I., “Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia”. *Construction and Building Materials* 24, 666-676, 2010.
- [7] J.M. Cherraj, “Valorisation des matériaux locaux: Un modèle numérique d’évaluation des caractéristiques mécaniques du BTC et du mortier en fonction de la stabilisation en compactage et/ou en ciment”, thèse de doctorat, Université Mohamed V – Agdal, Rabat, 2008.
- [8] Y. Jamil, S. Nasla, K. Bougtaib, K. Gueraoui & M. Cherraj, “The influence of compaction stress and alfa fiber content on the physico-chemical characterization of compressed earth blocks (CEB)”, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 24, 265-282. 10.17654/0973576321004, 2021.
- [9] S. Nasla, K. Gueraoui, M. Cherraj, Y. Jamil, K. Bougtaib, “Technical Studies of Adobe Bricks Stabilize with Lime from the Quarry of the Commune of Had Laghoualem in Morocco”. *International Journal of Engineering Applications (IREA)*. 9. 1. 10.15866/irea.v9i1.18791, 2021.
- [10] S. Ziegler, D. Leshchinsky, H.L. Ling & E.B. Perry, “Effect of short polymeric fibres on crack development in clays”, *Soils Found*, 38(1):247–53, 1998.
- [11] J. Khedari, S. Charoenvai and J. Hirunlabh, “New insulating particleboards from durian peel and coconut coir”, *Buil Environ*, 38(3): 245-254, 2003.
- [12] A. Jamil, N. Nasla, K. Bougtaib, K. Gueraoui & M. Cherraj, “ The effect of the sisal fiber content of agave and/or lime on the mechanical and thermal characterizations of soil-based compressed earth blocks from the province of rehamna in morocco”, *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 24, 207-226, 10.17654/0973576321001, 2021.

- [13] V. Rigassi, “Blocs de terre comprimée”, Volume I, Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1995.
- [14] Y. Millogo, J.C. Morel, J.E. Aubert & G. Khosrow “ Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers”, *Constr. Build., Mater*, 52, 71-78, 2014.
- [15] M. Bouhicha, F. Aouissi & S. Kenai, “Performance of composite soil reinforced with barely straw”, Accepted for publication in the international journal of Cement and Concrete Composites”, Special theme issue, Natural fiber reinforced cement composites, 2005
- [16] J.M. Gresillon, “Etude de l’aptitude des sols à la stabilisation au ciment application à la construction”, *Annales de l’ITBTP*, N° 361, Paris, mai 1978.
- [17] H. Houben, V Rigassi et P. Garnier, “Blocs de terre comprimée : équipements de production”, CRATerre, Bruxelles, Belgique, 1996.
- [18] D. Miraucourt, “Stabilisation du matériau terre cure pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso”, 103, (2017), Retrieved from <https://matheo.ulg.ac.be/bitstream/2268.2/2539/1/TFE Miraucourt David final 2.pdf>
- [19] H. Houben et H. Guillaud, “Traité de construction en terre”, CRATerre, Editions parenthèses, (France, Ed.) (Edition Pa), 2006.
- [20] R. Anger et L. Fontaine, “Bâtir en terre. Du grain de sable à l’architecture”, Paris : Belin, Cité des sciences et de l’industrie, 2009.
- [21] V. Villain, “Sociologie du champ de la construction en terre crue en France (1970-2020)”, thèse de doctorat, École doctorale Sciences sociales (Lyon), France, 2020.
- [22] BB. Armelle, “Etude expérimentale et modélisation de stabilité des phyllosilicates soumis à un fort gradient thermique”, Test dans le contexte du site géothermique de Soultz-Sous-Forêts, Thèse de Doctorat, Centre de Géochimie de la surface (UMR 7517), Université Louis Pasteur de Strasbourg, 2003.
- [23] A. Michot, “Caractéristiques thermo-physiques 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.
- [24] K. L. Konan, “Interaction entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium”, Université de Limoges, Thèse, 2006.
- [25] O. Izemmouren, “Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée”, Université Mohamed Khider – Biskra, thèse, 2016.
- [26] G. Pedro, “Les minéraux argileux”, 47-64, dans *pédologie, 2-Constituants et propriétés du sol*, Eds. Du chaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris, France, 665p, 1994.
- [27] G. Alipandi, “Matériaux réfractaires et céramiques techniques”, Tome 1, *Eléments de céramurgie et de technologie*, Editions Septina, 1996.
- [28] N. K. Lecomte, Gisèle Laure, “Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite-muscovite”, Université de Limoges, France, Thèse N° 53 – 2004.

- [29] G. PEDRO, “Les minéraux argileux”, dans Pédologie, 2-Constituants et propriétés du sol, Eds., Du chaufour Ph et Southier B.Masson, Paris, 47, 1995.
- [30] TW. Lambe, “The Structure of Inorganic Soil, Proceeding”, ASCE, Vol. 79, Separate No.315, 49 p, 1953.
- [31] N. Saiyouri, “Approche microstructurale et modélisation des transferts d’eau et du gonflement dans les argiles non saturées”, Thèse doctorat, Ecole Centrale Paris, 228 pp, 1996.
- [32] H. Houben et H. Guillaud, “Earth construction—a comprehensive guide”, London: Intermediate Technology, 1994.
- [33] P. Walker, “Specifications for Stabilised Pressed Earth Blocks”, Masonry International, 10, (1), pp. 1-6, 1996.
- [34] F. Bultel, “Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels”, Thèse de Doctorat de l’école nationale des ponts et chaussées (France), 2001.
- [35] VS. Burrough, “Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction”, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, 2001.
- [36] AFNOR. XP P13-901, “Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception”, Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNOR, 2001.
- [37] AFNOR, NF EN 197-1, “Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants”, Ciment - Partie 1, 2012.
- [38] B. Taallah, “Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres”, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2014.
- [39] F. Michaud, “Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage”, thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [40] G. CARMA, “des matériaux composites renforcés des fibres d’origine renouvelable”, centre d’animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.
- [41] C. Baley, “Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites”, Les techniques de l’ingénieur, AM 5 130, 2004.
- [42] G.B. Mitra & P.S. Mukherjee, “X-Ray diffraction study of fibrous polymers / Degree of paracrystallinity a new parameter for characterizing fibrous polymers”, Polymer, Vol. 21, pp. 1403-1409, 1980.
- [43] S. Thiebaud, “Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux”, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Sciences des Agroressources, 1995.
- [44] P. Boustingorry “Élaboration d’un matériau composite à matrice gypse renforcé par bois fragmenté -amélioration de la résistance au visage de produits préfabriqué en gypse”, thèse de doctorat de l’école Nationale Supérieure des Mine de Saint Etienne, Génie des procédés, 2002.

- [45] P. J. Herrera-franco & A. valadez-gonzalez. “A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites”, *Composites Part B: Engineering*, Volume 36, Issue 8, Pages 597-608, December 2005.
- [46] H. Houben & H. Guillaud, “*Traité de construction en terre*. Marseille: Parenthèses”. (2<sup>ème</sup> éd. 1995 ; 3<sup>ème</sup> éd. 2006), 1989.
- [47] A. Guettala, H. Houari , B. Mezghiche, R. Chebili, “Durability of lime stabilized earth blocks”, *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [48] GATE, “*Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks)*”, Eschborn: German Appropriate Technology Exchange, 1994.
- [49] O. Izemmouren, A. Guettala, “Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra”, *Matec web of conférence*, vol 11 02001, 2014.
- [50] M. Abtahi, N. Okhovat, M. Hejazi, “Using textile fibers as soil stabilizers-new achievements”, In: 1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran, 2009.
- [51] J. Rao, “Jute geotextile for improving the performance of highway embankment on soft marine soil”, In: *Proc nat sem jute based geotextiles*, New Delhi, India, 1996.
- [52] R. Stulz & K. Mukerji, “*Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions*”, Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.
- [53] I. Salehan & Z. Yaacob, “Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers”, *Pertanika J Sci Technol*, 19 (1): 33–43, 2011.
- [54] U. Ravishankar, S. Raghavan, “Coir stabilised lateritic soil for pavements”, In: *Indian geotech conf*, Ahmedabad, India, 2004.
- [55] J. Khedari, P. Watsanasathaporn & J. Hirunlabh, “Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity”, *Cem Concr Compos*, 27(1):111–116, 2005.
- [56] EG. Akpokodje, “The stabilization of some arid zone soils with cement and lime”, *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [57] F. Ghoumari, “*Matériau en Terre Cure Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau*”, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.
- [58] P. Walker and T. Stace, “Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars”, *Materials and Structures Vol 30*, pp 545 – 551, 1997.
- [59] R. Bahar, M. Benazzoug, S. Kenai, “Performance of compacted cement stabilised soil”, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.
- [60] Agridoc, “*Fabrication de blocs stabilisés : Synthèse technique*”, Paris: Agridoc, 2004.
- [61] JF. Jarrige, “Chronology of the Earlier Periods of the Greater Indus as seen from Mehrgrah”, Pakistan, pp. 21-28 in *South Asian Archaeology*, ed. B. Alichin, Cambridge University Press, 1989.

- [62] H. Guillaud & H. Houben, “Traité de construction en terre”, (2ème édition), Marseille, Editions Parenthèses, 1995.
- [63] A. Guettala, “Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau”, Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2003.
- [64] M. Al-Mukhtar, A. Lasledj & JF. Alcover, “Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C”, *Applied Clay Science* 50, 199–203, 2010.
- [65] B.V. Venkatamara & S.R. Hubli, “Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry”, *materials and structures*, 35, pp 293-300, 2002.
- [66] A. Krami & S. reggadi, “Thème Étude des briques de terre gypso-calcaire stabilisée par le ciment ou par la chaux Génie Civil et aux ingénieurs de laboratoire de génie civil sans acception”, 2011.
- [67] CRATerre, GATE, “Bloc de terre comprimée”, *Eléments de base*, Eschborn, Allemagne, 1991.
- [68] CRATerre et Urbaplan, “République Démocratique du Congo, projet d'appui au redressement du secteur de l'éducation (PARSE)”, *Stratégie nationale pour la réhabilitation et la construction des écoles de qualité au moindre coût*. Villefontaine: CRATerre éditions, 2010.
- [69] Prix-construction, “Générateur de prix de la construction”. <http://generateur-de-prix.cype.fr/>, Consulté le 13 avril 2019.
- [70] L. Guérin, “Construction à faible coût dans les programmes spéciaux de travaux publics : Principes directeurs pour l'emploi de la terre cure”, Première édition, 1985.
- [71] XP P 94-041, “Reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide”, AFNOR, 1995.
- [72] NF P 94-056, “Analyse granulométrique par tamisage”, paris, 1996.
- [73] NF P 94-057, “Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation”, AFNOR, 1992.
- [74] NFP94-051, “Détermination des limites d'Atterberg”, AFNOR, Mars 1993.
- [75] NFP94-068, “Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai a la tâche”, AFNOR, Novembre 1993.
- [76] A. D. O. Osula, “Lime modification of problem laterite”, *Eng. Geol.*, 30, 141-154, 1991.
- [77] N FP 94-050, “Détermination de la teneur en eau pondérable des matériaux”, paris, 1995.
- [78] NF P 94-054, “Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique des particules solide des sols - Méthodes du pycnomètre à l'eau”, AFNOR, 1991.
- [79] AFNOR, NF P 94-093, “ Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié”, 1999.
- [80] H. Houben et P. Verney, E. Olvirer, M. Mesbah, et P.H. Michel, “Construction en Terre Cure : les matériels français”, Edition Grenoble CRATerre, 1987.

- [81] Brunet Pierre. Georges Leboucq, André Vésale ; Robert Depau, Simon Slevin ; Lucien Godeaux, Esquisse d'une histoire des mathématiques en Belgique ; E. Dupréel, Adolphe Ouételet, pages choisies et commentées ; Jean Pelseneer, Zénobe Gramme ; Marcel Florquin, Léon Frédéricq et les débuts de la physiologie en Belgique ; Raymond Lebègue, "Les correspondants de Peiresc dans les anciens Pays-Bas", In : Revue d'histoire des sciences et de leurs applications, tome 1, n°1, 1947. pp. 82-86.
- [82] P. Giovanni, "La brique fabrication et tradition constructives", Edition EYROLLES, 2005.
- [83] M. Marou, "Dynamique de l'espace urbain de Khénifra entre fragilité du milieu physique et logique de planification urbaine", Géographie, Université Ibn Tofaïl (Maroc), Français, 2021.
- [84] CRATerre-EAG, CDI, "Compressed earth blocks: Standards – Technology series No.11", Brussels: CDI, 1998.
- [85] MOPT, "Bases Para el Diseño y Construcción con Tapial. Madrid, Spain: Centro de Publicaciones", Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1992.
- [86] K. Dierks & C. Ziegert, "Neue Untersuchungen zum Materialverhalten von Stampflehm", In Steingass, P. : Moderner Lehm-bau 2002, Tagungsband, Fraunhofer IRB.
- [87] A. Ammari et al., "Promotion de la technique du bloc de terre comprimée dans le secteur de la construction par l'amélioration de son comportement mécanique", JMESCEN, J. Mater, Environ. Sci. 7 (10), 3532-3537, 2016.
- [88] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo et A. Messan, "Caractérisation mécanique et thermo-physique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment", Journal of Materials and Engineering Structures, 2, 68 – 76, 2015.
- [89] S. Nasla, K. Gueraoui, M. Cherraj & S. Abderrahim, "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, 23. 35-56. 10.17654/HM023010035, 2021.
- [90] J.C. Morel, A. P'kla et H. Di Benedetto, "Essai in situ sur blocs de terre comprimée Interprétation en compression ou traction de l'essai de flexion en trois points", Revue française de génie civil. Volume 7 - n° 2/2003, pages 221 à 237.
- [91] A. BOUVENOT, "Transferts de chaleur " ; Edition Masson, 1980.
- [92] CHOUDINJ, C. MORICE et N. KECHICH, "Ambiance Thermique" Université de la méditer année, 2003/2004.
- [93] A. Liébard, A. De Herde, "Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable", Éd. Le Moniteur, Paris, 2005.
- [94] S. Gaye, "Caractérisation des propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques de matériaux locaux de construction", Thèse d'Etat en thermique, FST/UCAD Sénégal, 2001.
- [95] J. MICHEL, "Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments", Edition Eyrolles, 1977.

- [96] Centre pour le développement de l'entreprise (CDE), “Blocs de terre comprimée : procédures d'essais”, Coédition CDE, ENTPE et CRATerre, Bruxelles, Belgique, p 1-121, 2000.
- [97] R.B.V. Venkatarama et S.R. Hubli, “Properties of lime stabilised steam-cured blocks for masonry”. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 35, pp 293-300, 2002.
- [98] I. Salehan & Z. Yaacob, “Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers”, *Pertanika J Sci Technol*, 19(1):33–43, 2011.
- [99] J. Khedari, P. Watsanasathaporn & J. Hirunlabh, “Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity”, *Cem Concr Compos*, 27(1):111–116, 2005.
- [100] M. Ben Mansour, A. Jelidi, A. Soukaina Cherif & S. Ben Jabrallah, “Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)”, *Construction and Building Materials*, 10, 444–51, 2016.

## Résumé

On distingue de nombreuses techniques de construction en matériaux locaux (sol) : Briques moulées à la main (adobe), mur massif damé dans un gabarit en bois (pisé), mur à armature en bois dont les espaces sont comblés d'un mélange de fibres, sable, argile et eau (torchis), briques en sol compactées manuellement ou mécaniquement (BTC) etc. Les matériaux de construction se différencient selon les caractéristiques suivantes : Physiques, énergétique, écologique et socio-économiques. Notre travail vise à mettre en valeur des matériaux locaux. Nous cherchons à contribuer dans l'abaissement des prix de revient des édifices et dans la réduction de consommation énergétique (Ex. chauffage et climatisation). En effet, plusieurs sites patrimoniaux remarquables témoignent de cet usage. Les matériaux utilisés proviennent du territoire de la province de Khénifra. Dans cette recherche, nous avons procédé, entre autres, à la comparaison entre deux méthodes de compactage : méthode statique et méthode manuelle. Les compactages ont porté sur des blocs en terre comprimée stabilisés avec l'ajout de fibres de Palmier Nain et/ou d'un liant (ciment ou chaux). De plus, Etudier les conséquences de l'utilisation d'ajouts sur la durabilité, sur les propriétés thermiques et sur la consistance des blocs de terre comprimée (BTC). Dans un premier temps, Nous avons étudié des dosages pour la fabrication de blocs de terre comprimée (BTC) à l'aide d'une presse manuelle qui a été fabriquée par un forgeron dans un quartier populaire à Salé (El Karia), à savoir : Les pourcentages en chaux respectivement incorporés au sol sont 0%, 5%, 10% et 12% ; Les dosages, successifs, en fibres de Palmier Nain sont 0%, 1%, 1.5%, 2% et 2.5%, avec des longueurs de 10 mm à 40 mm. Nous avons déduis des résultats obtenus que le fait de résister à la compression des BTC, s'améliore selon le dosage du sol avec la chaux et/ou les fibres. En effet, dans le mélange, le contenu en eau est important sur l'influence sur la stabilité et sur la durabilité des blocs de terre comprimée. Cette étude a montré, aussi, que le temps de cure conduit à l'efficacité de la résistance des BTC. Dans le deuxième temps, nous avons procédé à la stabilisation des BTC avec l'ajout de fibres de Palmier Nain (à des teneurs en masse allant jusqu'à 2.5% avec un pas de 0.5% et des longueurs moyennes de 0.1 cm, 1cm et 3 cm) et/ou d'un liant ciment ou chaux (à des teneurs en pourcentage de 0%, 5%, 10% et 12%). Nous avons étudié les propriétés mécaniques de ces mélanges en mesurant la  $R_c$  et la  $R_t$  d'une première série d'échantillons élaborés au laboratoire. D'autre part on a, aussi, étudié les propriétés thermiques. Avant l'analyse de l'effet des ajouts sur les caractéristiques thermomécaniques des blocs de terre comprimée, les caractéristiques minéralogiques et physicochimiques des matériaux de bases ont été étudiées.

**MOTS CLÉS :** Terre, fibres, chaux, ciment, matériaux locaux, propriétés mécaniques, durabilité, propriétés thermiques, compactage, statique et manuel.

## Abstract

Our research tends to enhance local materials and help reduce construction costs and save energy (heating/air conditioning). From here, the idea of designing eco-building materials based on local materials that have proven their use for millennia, through remarkable heritage sites was born. These materials (blocks of compressed earth) are made from soil that we have brought back from the province of Khenifra and static compaction method compared by manual method, we stabilized them with the addition of doum palm fibers and/or a binder (cement or lime). The main objective of this work is to study the effect of the use of additions on the mechanical properties and durability (alternate wetting/drying cycle method) of compressed earth blocks, as well as thermal properties. First, three lime contents (0%, 5%, 10% and 12%) of the dry mixture weight, and four fiber contents of the doum palm (0, 1%, 1.5%, 2% and 2.5%; 10 mm and 40 mm long) are used for the production of compressed earth blocks (BTC) using a manual press that was made by a blacksmith in a working-class neighborhood (Sale El Karia). The results obtained have shown that there is an improvement in the resistance to dry compression of the compressed earth blocks as a function of the dosage of the earth with lime and/or fibers. The results show that 10% in the dosage of lime with earth and 1% palm fiber dosage has the best resistance to dry compression, while the wet compressive strength is low compared to the dry compressive strength; it means that the water content plays an important role in the stability and durability of the compressed earth blocks. This study also showed that the flood time leads to an improvement in the resistance of compressed earth blocks. In the second step, We stabilized them with the addition of fibers of palm doum (at mass contents up to 2.5% with a pitch of 0.5% whose average lengths are 0.1cm, 1cm and 3cm) and/or of a binder (cement whose percentage contents are 0%-5%-10%-12% or the same for lime). The mechanical properties of these mixtures were studied by measuring the compressive and tensile strengths of a first series of samples developed in the laboratory. On the other hand, the thermal properties were also carried out. Prior to the analysis of the effect of the addition on the thermo-mechanical characteristics of the compressed earth blocks, physic-chemical mineralogical characterizations of the base materials were proposed.

**KEYWORDS:** Earth, fibers, lime, cement, local materials, mechanical properties, durability, thermal properties, compaction, static and manual.