



HAL
open science

Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz

Ali Abakar

► **To cite this version:**

Ali Abakar. Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2018. Français. NNT : 2018LORR0066 . tel-01920664

HAL Id: tel-01920664

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01920664v1>

Submitted on 15 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**



THESE DE DOCTORAT

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat de l'Université de Lorraine

Spécialité : Sciences du bois et des fibres

Présentée et soutenu publiquement par Abakar ALI

Le 28 juin 2018 à 10 h 30 min

Caractéristiques Mécaniques et Thermiques de l'Argile Stabilisée par la Gomme Arabique et Renforcée par la Paille de Riz

Membre de jury

M. Riad BENELMIR	Université de Lorraine	Directeur de thèse
M. Mohammed LACHI	Université de Reims	Rapporteur
M. Chadi MAALOUF	Université de Reims	Rapporteur
Mme. Mahdia HATTAB	Université de Lorraine	Examineur
Mme. Fadila MAROTEAUX	Université Paris Saclay	Examineur
M. Jean-Louis TANGUIER	Université de Lorraine	Invité
M. Abdoulaye Saleh TODJIBAL	ENSTP de Ndjamena	Invité

REMERCIEMENTS

Mes travaux de recherche se sont déroulés à l'Université de Lorraine à Nancy. A cette occasion Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Philippe GERARDIN, directeur du LERMAB, pour son accueil et ses conseils scientifiques.

J'exprime ma gratitude avec un grand plaisir au Professeur Riad BENELMIR, mon Directeur de thèse en France, pour son encadrement, son soutien et la confiance qu'il m'a témoigné pour la réalisation de ce travail de thèse. Je suis très reconnaissant.

Je remercie également Jean-Louis TANGUIER Maître de conférences, qui s'est donné de fond en comble, malgré ses occupations pour m'accompagner jusqu'à la fin de mes travaux. Mr Jean-Louis TANGUIER vous êtes exceptionnel, je vous dis grand merci.

Je remercie également Abdoulaye SALEH TODJIBAL, Maître de conférences, d'avoir accepté de me suivre dans mes travaux, et de m'avoir toujours facilité l'accès au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) de Ndjamenà pour les travaux expérimentaux. Je vous dis merci beaucoup.

Je remercie tous les enseignants chercheurs de LERMAB et en particulier Laurent CHRUSCIEL Maître de conférences, qui m'a aidé pour la caractérisation chimique de mes échantillons, et aussi pour ses orientations scientifiques dans le domaine de la chimie de bois.

Je remercie également André DONNOT pour ses aides précieuses en conseils et orientations et surtout pour le sens de l'humour qu'il a en vers les étudiants étrangers.

Je remercie également Béatrice GEORGE, Maître de conférences de m'avoir aidé pour le test de mes matériaux au bleu de méthylène.

Je remercie Laetitia MOURITANY comptable et Corinne COURTEHOUX secrétaire, toutes deux au laboratoire Lermab pour leur gentillesse et leur appui technique et administratif.

Je remercie également les techniciens de Lermab, qui sont Nicolas HOUSSEMENT et Emmanuel MARTIN pour leur disponibilité et leur appui technique de tous les jours.

Je remercie également les collègues thésards du Lermab et je leurs souhaite bonne chance.

Je remercie le Directeur Général de l'ENSTP de N'djaména, Professeur Koina RODOUMTA pour le financement de cette formation doctorale.

Je remercie aussi les collègues enseignants de l'ENSTP de Ndjamenà particulièrement Dr Hassan MAHAMAT HEMCHI, Hassan ABIAT, Batrane SIDICK pour les services rendus.

Je remercie également ma petite famille pour sa patience et son courage pendant ce long moment d'absence.

Enfin, je remercie tous les parents qui ont contribué de loin ou de près à l'aboutissement de ce travail. Je remercie plus particulièrement mon grand frère Abdallah ALI, mes petits frères Adoum ALI, Oumar ALI et Mahamat HISSEN pour leurs soutiens multiformes.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
LISTE DES TABLEAUX.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1.1. Introduction	5
1.2. Techniques de construction en terre.....	5
1.3. Blocs de terre comprimée (BTC)	6
1.4. Diverses variétés de blocs de terre comprimée	7
1.5. La construction en bloc de terre comprimée dans le monde	8
1.6. L'utilisation de la terre dans la construction	9
1.6.1. Définition	9
1.6.2. La composition.....	9
1.6.3. Quelques rappels sur le matériau argileux	10
1.6.3.1. Structure.....	10
1.6.3.2. Les différentes catégories d'argiles.....	11
1.6.3.3. Les différents types d'argiles	12
1.6.3.3.1. La kaolinite	13
1.6.3.3.2. La montmorillonite	14
1.6.3.3.3. L'illite	16
1.7. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre	17
1.7.1. La cohésion	17
1.7.2. La stabilisation	17
1.7.2.1. Les différents objectifs de stabilisation	17
1.7.2.2. Les principaux procédés de stabilisation	18
1.7.2.3. Influence de la teneur en eau sur la densité	18
1.7.2.4. Influence de l'énergie de compactage.....	19
1.7.2.5. Effet de la granulométrie du sol.....	20
1.7.3. Stabilisation au ciment	22
1.7.3.1. Généralités	22
1.7.3.2. Mécanisme de stabilisation.....	23
1.7.3.3. Efficacité et dosage	24
1.7.3.4. Effets sur les propriétés du matériau stabilisé.....	25

1.7.3.4.1.	Effet sur la densité	25
1.7.3.4.2.	Effet sur la résistance mécanique	25
1.7.3.4.3.	Effet sur l'absorption totale	27
1.7.4.	Stabilisation à la chaux.....	28
1.7.4.1.	Généralité	28
1.7.4.2.	Le mécanisme	28
1.7.4.2.1.	L'échange cationique.....	29
1.7.4.2.2.	La floculation et l'agglomération	30
1.7.4.2.3.	La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques	31
1.7.4.3.	Efficacité et dosage	32
1.7.4.4.	Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	32
1.7.5.	Stabilisation mixte chaux-ciment	35
1.7.6.	Stabilisation par les fibres	35
1.7.6.1.	Différents types de fibres	36
1.7.6.1.1.	Les fibres naturelles.....	36
1.7.6.1.2.	Les fibres synthétiques	37
1.7.6.1.3.	Les fibres artificielles	38
1.7.6.2.	Caractéristiques essentielles des fibres lignocellulosiques.....	38
1.7.6.2.1.	Les constituants chimiques de la biomasse	38
1.7.6.2.2.	Propriétés des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales.....	41
1.7.6.2.3.	L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols.....	43
1.7.6.2.4.	Fibres brutes de palmier dattier	44
1.7.6.2.5.	Les fibres de polypropylène	44
1.7.6.2.6.	Propriétés des adobes renforcés par des fibres naturelles.....	46
1.7.6.2.7.	Propriétés de bloc de terre comprimés renforcés par des fibres	47
1.7.6.2.8.	Influence des fibres sur les résistances mécaniques	48
1.7.6.2.9.	Effet des fibres sur les propriétés thermiques.....	53
1.7.6.2.10.	Avantages d'isolation thermiques	53
1.7.6.2.11.	Classification des matériaux isolants.....	53
1.7.6.2.12.	Effet des fibres sur l'absorption d'eau.....	58
1.7.6.2.13.	Effet du traitement des fibres végétales sur les propriétés des composites.....	58
1.7.6.2.14.	Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin.....	63

1.8.	Conclusion.....	65
1.9.	Références bibliographiques	67
CHAPITRE 2 : ZONE D'ETUDE ET SES POTENTIALITES AGRICOLES.....		78
2.1	Présentation du Tchad	79
2.2	Données climatiques du Tchad	80
2.3	Agriculture au Tchad.....	81
2.3.1.	Culture de riz	83
2.3.2.	Production de riz dans le monde	84
2.3.2.1.	Elevage.....	85
2.3.2.2.	Litière.....	85
2.3.2.3.	Biocombustion	85
2.3.2.4.	Bioconstruction	85
2.3.3.	Production de riz au Tchad.....	86
2.4.	Choix du liant.....	88
2.4.1.	Différents liants couramment utilisés.....	88
2.4.1.1.	Problème environnemental causé par la fabrication du ciment	89
2.4.2.	La gomme arabique.....	90
2.4.2.1.	Provenance de la gomme arabique.....	91
2.4.2.2.	Les propriétés de la gomme arabique	91
2.4.2.2.1.	Solubilité et viscosité.....	92
2.4.2.2.2.	Toxicité.....	93
2.4.2.3.	Utilisation de la gomme arabique	93
2.4.2.4.	La Production et le commerce de la gomme arabique.....	94
2.5.	Conclusion.....	95
2.6.	References bibliographies	96
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES MATERIAUX D'ETUDE.....		98
3.1.	Introduction	99
3.2.	Matériaux utilisés	99
3.2.1.	Les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux d'étude.....	99
3.2.1.1.	Caractéristiques physiques de la terre argileuse	99
3.2.1.1.1.	Essai de la teneur en eau.....	101
3.2.1.1.1.1.	Principe.....	101
3.2.1.1.2.	Masse volumique des grains solides.....	101

3.2.1.1.2.1. Procédure d'essai au pycnomètre	101
3.2.1.1.3. La granulométrie.....	102
3.2.1.1.3.1. Analyse granulométrique par tamisage	103
- Le principe de la méthode	103
3.2.1.1.3.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie	103
3.2.1.1.4. Limite d'Atterberg	104
3.2.1.1.4.1. Définition des différents états.....	104
3.2.1.1.4.2. Limite de liquidité	105
3.2.1.1.4.2.1. Exécution de l'essai	105
3.2.1.1.4.3. La limite de plasticité	108
3.2.1.1.4.3.1. Principe de la méthode	108
3.2.1.1.5. Classification de la terre argileuse.....	109
3.2.1.2. Caractéristiques physiques de sable.....	112
3.2.1.2.1. La granulométrie.....	112
3.2.1.2.2. La masse volumique des grains solides	112
3.2.1.2.3. La masse volumique apparente du sable	113
3.2.1.3. La paille de riz.....	113
3.2.1.3.1. Caractéristiques expérimentales	113
3.2.1.3.1.1. Caractéristiques physiques de paille de riz.....	113
3.2.1.3.1.1.1. Masse volumique	113
3.2.1.3.1.1.2. Absorption d'eau	115
3.2.1.3.1.2. Composition chimique.....	117
3.2.1.3.1.2.1. Taux de cendres	117
3.2.1.3.1.2.2. Extractibles	117
3.2.1.3.1.2.3. Lignine organosolv	119
3.2.1.3.1.2.4. Lignine de Klason.....	120
3.2.1.3.1.2.5. Quantification des sucres simples.....	121
3.2.2. Résultats et discussions	123
3.2.3. Conclusion.....	124
3.2.4. Les liants	124
3.2.4.1. La gomme arabique.....	124
3.2.4.1.1. Les propriétés de la gomme arabique	125
3.3. Caractéristiques thermiques	126

3.3.1.	Propriétés thermiques	127
3.3.1.1.	La conductivité thermique	127
3.3.1.2.	La capacité calorifique	127
3.3.1.3.	La diffusivité thermique.....	128
3.3.1.4.	Effusivité.....	128
3.3.2.	Les propriétés thermiques de quelques matériaux	128
3.3.3.	Classification des méthodes de caractérisation thermique.....	129
3.3.3.1.	Le régime	129
3.3.3.2.	La géométrie	130
3.3.3.3.	Le type de mesure	130
3.3.4.	Synthèse des différentes méthodes :.....	130
3.3.4.1.	En régime permanent	130
3.3.4.2.	Les méthodes en régime transitoire	131
3.3.4.3.	Le hot disc	132
3.3.4.4.	La méthode de flash	132
3.3.5.	Conclusion.....	132
3.3.6.	Conductivité thermique d'une paroi cylindrique	134
3.3.6.1.	Fabrication des éprouvettes.....	135
3.3.6.2.	La masse volumique	136
3.3.6.3.	Dispositif expérimental.....	137
3.3.6.4.	Etalonnage de la cartouche chauffante.....	140
3.4.	Caractéristiques mécaniques	145
3.4.1.	Les formulations des matériaux	145
3.4.2.	La teneur en eau optimale (TEO).....	145
3.4.3.	La préparation des mélanges	146
3.4.4.	Préparation des briques en BTC.....	148
3.4.5.	Préparation des éprouvettes.....	149
3.4.6.	Les essais mécaniques	151
3.4.6.1.	Essai de flexion 03 points des briques en BTC.....	151
3.4.6.2.	Essais de compression uni-axiale des briques en BTC.....	151
3.4.6.3.	Caractéristiques mécaniques des éprouvettes	156
3.5.	Test de durabilité à l'eau	158
3.6.	Conclusion.....	160

3.7. Références bibliographiques	161
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DUSCUSSIONS	164
4.1. Introduction	165
4.1.1. Conductivité thermique	165
4.1.1.1. L'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique.....	165
4.1.1.2. L'influence de la paille de riz sur la conductivité thermique.....	166
4.1.2. Résistance mécanique	167
4.1.2.1. Influence de la gomme arabique dans le mélange.	168
4.1.2.2. Influence de la contrainte de compactage sur la résistance en compression.....	172
4.1.2.3. Influence de la paille de riz dans la résistance en compression.....	172
4.2. Conclusion.....	174
4.3. CONCLUSION GENERALE	176
4.4. En perspectives.....	178
4.5. References bibliographiques	179
RESUME.....	181
ABSTRACT	183

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : : Différentes techniques de construction en terre	6
Figure 1-2 : Différents produits de bloc de terre comprimée	8
Figure 1-3 : Maison Palmier à Marrakech (Maroc)	8
Figure 1-4 : Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau (France)	9
Figure 1-5 : Atelier électronique, Ecole en Auroville (Inde)	9
Figure 1-6 : Une structure d'un feuillet de phyllosilicate 2 : 1	11
Figure 1-7 : : Structure schématique de la kaolinite.....	13
Figure 1-8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	14
Figure 1-9 : Schéma de la structure de la montmorillonite	15
Figure 1-10 : Schéma de la structure de la montmorillonite	15
Figure 1-11 : Schéma de la structure de l'illite.....	16
Figure 1-12 : Rapport entre le teneur en eau et la densité sèche	19
Figure 1-13 : Effets de l'énergie de compactage sur la structure du sol.....	19
Figure 1-14 : Résistance des matériaux en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage.....	20
Figure 1-15 : la contrainte de compactage et le taux de ciment sur la résistance en compression	20
Figure 1-16 : la relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol.....	21
Figure 1-17 : Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en argile	22
Figure 1-18 : Effets de contrainte de compactage (10 MPa) et de taux de sable sur la rece en compression d'un matériau stabilisé à 5% de ciment	22
Figure 1-19 : Influence de la teneur en argile sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisée au ciment	25
Figure 1-20 : Influence du ciment sur la résistance à la traction par fendage et à la compression de bloc de terre comprimée	26
Figure 1-21 : Evolution de la résistance en compression pour 3 types de sols australiennes en fonction de taux en ciment	26
Figure 1-22 : Evolution de la résistance mécanique de blocs de terre en fonction du taux de ciment.	27
Figure 1-23 : Taux d'absorption d'eau dans le temps du matériau en terre stabilisée par différents pourcentages en ciment	27

Figure 1-24 : variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids	29
Figure 1-25 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux	31
Figure 1-26 : Allure de la résistance à la compression par rapport à la teneur de chaux pour 3 types de sols australienne	33
Figure 1-27 : La résistance à la compression d'adobe en fonction de la teneur en chaux.....	33
Figure 1-28 : La résistance à la compression des matériaux en fonction de l'âge de teneur en chaux	34
Figure 1-29 : La force de compactage et le pourcentage en chaux sur les résistances mécaniques	34
Figure 1-30 : Classification des fibres naturelles en fonctions de leur origine	37
Figure 1-31 : Structure de la cellulose	39
Figure 1-32 : Unité de base de la lignine	40
Figure 1-33 : Monomères des hémicelluloses du bois	41
Figure 1-34 : Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment	42
Figure 1-35 : Comportement d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un mélange ciment/fibre de chanvre (2) en flexion 03 points.....	42
Figure 1-36 : Influence de taux de fibre de palmier dattier sur la resistance à la compression	44
Figure 1-37 : Influence des teneurs en fibre des échantillons écrasés.....	45
Figure 1-38 : Impactes de taux de fibre de polypropylène sur le gonflement des éprouvettes en terre stabilisée à la chaux après 7 jours de séchage.....	46
Figure 1-39 : Influence de 4% de fibre sur la relation contrainte-déformation du sol).....	47
Figure 1-40 : Influence du taux et de la longueur des fibres sur la résistance à la compression [.....	49
Figure 1-41 : Influence du taux et de la longueur des fibres sur la résistance à la flexion	49
Figure 1-42 : Influence de taux de fibre de sisal sur la résistance à la compression.....	50
Figure 1-43 :Influence de taux de fibre de sisal sur la résistance à la flexion.....	50
Figure 1-44 : Impact de taux de fibres sur la résistance à la compression	51
Figure 1-45 : Evolution de la résistance à la compression des échantillons renforcés par la paille d'orge hachée.	52
Figure 1-46 : contribution des fibres en acier des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment sur la résistance à la traction.....	52

Figure 1-47 : Résistance à la compression en fonction de la concentration de laine de bois pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35, 46, 58%, respectivement	55
Figure 1-48 : Résistance en compression en fonction de la masse volumique de composite...55	
Figure 1-49 : Conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en eau pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35, 46, 58%, respectivement.....	56
Figure 1-50 : Conductivité thermique en fonction de dosage en bois selon	56
Figure 1-51 : La conductivité thermique de bloc de terre comprimé renforcée à différents taux et de longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus.....	57
Figure 1-52 : Essais d'absorption des fibres de sparte (<i>lygeum spartum</i>) enrobées d'huile de lin ou bitume.....	61
Figure 1-53 : Essais d'absorption en phase vapeur des fibres de sparte (<i>lygeum spartum</i>) avec ou sans traitements	62
Figure 1-54 : Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin	65
Figure 2-1 : Zones géo-climatiques du Tchad.....	80
Figure 2-2 : La moyenne des précipitations et des températures de la station de N'Djamena.	81
Figure 2-3 : Culture de riz	84
Figure 2-4 : gomme arabique	91
Figure 2-5 : Exportation de Gomme arabique brute d'Afrique.....	94
Figure 2-6 : Importation de gomme arabique par pays	95
Figure 3-1 : Masses et volumes des constituants d'un sol	100
Figure 3-2 : Pycnomètre à eau vide.....	102
Figure 3-3: Serie de tamis	103
Figure 3-4 : Courbe granulométrique de matériau d'étude.....	104
Figure 3-5 : Etat d'un matériau argileux en fonction de sa teneur en eau.....	105
Figure 3-6 : Coupelle de Casagrande	105
Figure 3-7: Une rainure pratiquée sur le matériau	106
Figure 3-8 : Les lèvres se referment après quelques chocs pratiqués sur le matériau à l'aide de la coupelle	106
Figure 3-9 : Diagramme pour la détermination de la limite de liquidité.....	107
Figure 3-10 : Préparation d'un rouleau pour l'essai de plasticité.....	108
Figure 3-11: Diagramme de Casagrande.....	109

Figure 3-12 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% de matériau supérieur à 2 mm de diamètre).....	110
Figure 3-13 : Courbe granulométrique du sable.....	112
Figure 3-14 : Paille de riz imprégnée dans l'huile de paraffine	114
Figure 3-15 : Dispositif des pesées hydrostatiques	114
Figure 3-16 : Dispositif d'extraction à l'aide d'un SOXHLET	119
Figure 3-17 : (a : Reacteur à Batch, b : Opération de filtration, c : Centrifugeuse).....	120
Figure 3-18 : Chromatographie ionique Dionex ICS-3000.....	122
Figure 3-19 : Chromatogramme obtenu par Chromatographie ionique Dionex ICS-3000....	123
Figure 3-20 : Cinétique de séchage des blocs de terre comprimés	126
Figure 3-21: Fabrication des éprouvettes	136
Figure 3-22 : Dispositif expérimental	138
Figure 3-23 : Position des thermocouples	139
Figure 3-24 : Photographie du dispositif expérimental	139
Figure 3-25 : puissance en fonction de la tension du courant	141
Figure 3-26 : courbe de température	143
Figure 3-27 : Valeurs des conductivités thermiques des formulations	144
Figure 3-28 : courbe de teneur en eau optimale (TEO).....	146
Figure 3-29 : Paille de riz imprégnée dans l'eau.....	147
Figure 3-30 : Procédure de préparation des briques en BTC	149
Figure 3-31 : fabrication par extrusion des éprouvettes (4 x 4 x 16 cm)	150
Figure 3-32 : A partir d'un essai flexion 3 points, on obtient deux demi-blocs qui seront testés en compression uni-axiale (XP 13-901).....	152
Figure 3-33 : Dispositif de caractérisation (a : essai de traction ; b : essai compression uni-axiale).	152
Figure 3-34 : Valeurs de résistance en compression des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile, de sable et de gomme arabique	153
Figure 3-35 : Résistance en compression des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile de gomme arabique et de paille de riz.....	154
Figure 3-36 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile, de gomme arabique et de sable	155
Figure 3-37 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile de gomme arabique et de paille de riz.....	155

Figure 3-38 : (a-essai de traction ; b – essai de compression ; c – logiciel qui récupère les résultats)	156
Figure 3-39 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes.....	157
Figure 3-40 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d’argile et gomme arabique	157
Figure 3-41 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d’argile, du sable et de gomme arabique.	158
Figure 3-42 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d’argile et de paille de riz	158
Figure 3-43 : Eprouvettes exposées sous pluie (a : sans stabilisant ; b : avec stabilisant par gomme arabique).....	159
Figure 3-44 : mur en brique de terre moulée (adobe)	159
Figure 3-45 : Eprouvettes cylindriques en mélange d’argile - gomme arabique immergées dans	160
Figure 4-1 : les valeurs de conductivité thermique en fonction des masses volumiques.....	166
Figure 4-2 : Conductivité thermique des éprouvettes renforcées par la paille de riz.....	167
Figure 4-3 : Influence de la gomme arabique sur la resistance en compression des briques en BTC	171
Figure 4-4 : Influence du sable sur la resistance en compression des briques en BTC	171
Figure 4-5 : Influence des contraintes de compactage sur la résistance des briques en BTC et celle des éprouvettes.....	172
Figure 4-6 : Resistance à la compression des blocs de terre comprimés, stabilisés par la chaux et renforcés par des fibres de palmier dattier	173
Figure 4-7 : Influence de la paille de riz dans les matériaux de construction	174

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0-1: Liste des symboles	14
Tableau 1-1 : : Classification des phyllosilicates, d'après (Caillère, 1959)[13], complétée par (Mitchell, 1993).....	12
Tableau 1-2 : composition chimique de quelques fibres naturelles	39
Tableau 2-1 : Moyennes mensuelles des températures et des précipitations	81
Tableau 2-2 : Les campagnes agricoles de la production céréalière	82
Tableau 2-3 : Production de graines, de paille, les superficies et rendement de riz	83
Tableau 2-4 : Culture irriguée de riz au Tchad	87
Tableau 2-5 : Production du riz de 2010/2011 à 2015/2016 au Tchad	87
Tableau 2-6 : Caractérisation de gomme arabique	92
Tableau 2-7 : Spécifications internationales de qualité de la gomme arabique	93
Tableau 3-1 : Teneur en eau naturelle	101
Tableau 3-2 : Masse volumique de l'argile	102
Tableau 3-3 : les résultats des essais de la limite de liquidité	107
Tableau 3-4 : les résultats pour déterminer la limite de plasticité.....	108
Tableau 3-5 : les résultats de limite d'Atterberg.....	109
Tableau 3-6 : Les classifications normalisées NF P 11-300 de septembre 1992	111
Tableau 3-7 : Caractéristiques physiques du sable.....	113
Tableau 3-8 : Résultats de masses volumiques de paille de riz	115
Tableau 3-9 : La densité du bois	115
Tableau 3-10 : Taux d'absorption de paille de riz.....	116
Tableau 3-11 : Compositions chimiques de paille de riz	120
Tableau 3-12 : Composition de biomasse lignocellulosique.....	121
Tableau 3-13 : Sucre simple de paille de riz et les acides glucuroniques	122
Tableau 3-14 : Propriétés physiques de la gomme arabique	125
Tableau 3-15 : Constituants chimiques de la gomme arabique.....	125
Tableau 3-16 : Conductivités thermiques de quelques matériaux.....	128
Tableau 3-17 : Mesure des conductivités thermiques de PVC.....	134
Tableau 3-18 : Formulations pour le calcul de conductivité thermique.....	136
Tableau 3-19 : les éléments de mesure de la cartouche chauffante.....	140
Tableau 3-20 : Tableau : Echanges convectifs par la surface de cuivre.....	141
Tableau 3-21 : flux échangés avec l'air ambiant.....	142

Tableau 3-22 : les éléments de mesure.....	143
Tableau 3-23: Caractéristiques géométriques	143
Tableau 3-24 : Conductivités thermiques des échantillons étudiés.....	144
Tableau 3-25 : Formulations de briques en BTC	147
Tableau 3-26 : Formulations des éprouvette (4 x 4 x 16 cm)	150
Tableau 3-27 : Résultats des Caractéristiques mécaniques des briques en BTC	152
Tableau 3-28 : les caractéristiques mécaniques des éprouvettes.....	156
Tableau 4-1 : les plages des résistances en compression des différentes éprouvettes	169
Tableau 4-2 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC.....	170

Tableau 0-1: Liste des symboles

Symboles	Grandeurs	unités
b	Largeur de l'éprouvette	mm
E	Module de Young	MPa
e	Indice de vide	%
F _r	Force de rupture en compression	N
F _{tmax}	Effort maximal de traction	N
h	Hauteur de l'éprouvette	mm
I _p	Indice de plasticité	(%)
L	Distance entre les appuis	mm
m ₀	Masse des grains solides	g
m ₁	Masse du pycnomètre vide	g
m ₂	Masse du pycnomètre contenant la prise d'essai	g
m ₃	Masse du pycnomètre, du sol et de l'eau	g
m ₄	Masse du pycnomètre pleine d'eau	g
m _h	Masse de l'échantillon humide	g
m _s	Masse des grains solides	g
m _T	Pesée hydrostatique	g
m _w	Masse de l'eau ;	g
m _p	Masse de paraffine	g
m _{s+p}	Masse de l'échantillon + paraffine	g
m(t)	Masse de l'échantillon à l'instant t	g
S	Section de l'éprouvette	mm ²
S _r	Degré de saturation	%
T	Température	°C, K
σ _c	Résistance à la compression	MPa
σ _t	Résistance à la traction	MPa
V _a	Volume de l'air	
V _T	Volume total	cm ³
V _P	Volume de paraffine ayant enrobé la paille de riz	cm ³
V _S	Volume de l'échantillon solide	cm ³
V _v	Volume des vides	cm ³

V_w	Volume de l'eau	
α_A	Taux de cendre	%
η	porosité apparente de la paille	%
α_E	Taux d'extractible	%
α_L	Taux de lignine	%
ρ_{app}	masse volumique apparente	g/cm^3
ρ_d	Masse volumiques sèches de l'échantillon	g/cm^3
ρ_h	Masse volumique humide	g/cm^3
ρ_p	Masse volumique de paraffine	g/cm^3
ρ_s	Masse volumique des grains solides	g/cm^3
ρ_w	Masse volumique de l'eau	g/cm^3
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ϕ	Flux de chaleur	W
Φ	Densité de flux	$W.m^{-2}$
σ_C	Résistance à la compression	MPa
ε	déformation à la rupture.	(%)
ω	Teneur en eau	%
W_L	Limite de liquidité	%
W_P	Limite de plasticité	%

INTRODUCTION GENERALE

L'argile est le matériau le plus utilisé sur la planète depuis plusieurs siècles. Les différents sites archéologiques dans le monde en témoignent. De nos jours, les constructions en terre sont toujours visibles sur les différents continents. Il est estimé que le tiers de la population mondiale habite dans des ouvrages construits en terre. Le développement économique et technologique a apporté d'autres matériaux résistants et durables (ciment, chaux, bitume, acier, etc.) pour la construction des infrastructures. Les problèmes de réchauffement climatiques ont contraint l'homme à utiliser des matériaux sains et sans émission de gaz à effet de serre. Ce qui a encouragé le retour de la terre dans la construction.

La première raison qui n'est pas de moindre est la disponibilité de la terre et sa proximité du site de chantier. La mise en œuvre qui est relativement facile, ne demande ni des matériels et équipements lourds moins encore une technologie avancée. Le matériau terre ne demande pas d'énergie pour sa mise en œuvre et il est doté d'une excellente inertie thermique due à sa masse élevée. Cette inertie thermique permet d'avoir un habitat frais en été et chaud en hiver. Par contre, le matériau terre comporte également des inconvénients qui sont entre autre, une faible résistance mécanique et une grande sensibilité à l'eau.

L'homme a toujours réfléchi pour trouver des solutions aux insuffisances du matériau terre en utilisant plusieurs moyens de stabilisation, tels que mécanique, chimique et physique, ce qui a permis l'invention des différents produits en terre, il s'agit de : l'adobe ; le torchis ; le pisé ; les briques de terre cuites, et le bloc de terre comprimé (BTC).

Parmi les différents produits de matériau de construction en terre crue, le BTC est la version récente de l'adobe, qui a pour avantage un retrait limité, une résistance élevée, une faible sensibilité à l'eau et une forme bien dressée avec des arrêtes bien droites. Pour l'amélioration de ses caractéristiques, plusieurs stabilisants sont utilisés, à savoir du ciment, de la chaux, de bitume et des fibres naturelles ou synthétiques.

La paille de culture est utilisée comme renfort dans la construction depuis très longtemps. Cette technique continue jusqu'à nos jours. Par exemple dans la production industrielle des adobes aux Etats Unis, la terre est mélangée avec de la paille et du bitume. La paille est utilisée également dans les productions artisanales des briques en terre crue telles que l'adobe, la terre-paille, le torchis, la bauge, le pisé et le BTC [1]. Les fibres naturelles ou synthétiques sont incorporées dans la terre pour améliorer leurs résistances mécaniques [69, 70].

Le renforcement de la terre par les fibres n'a pas donné le consensus des chercheurs et des professionnels même si la stabilisation de la terre par les différents liants (ciment, chaux, bitume) a apporté une amélioration considérable sur les résistances mécaniques des matériaux et réduit leurs sensibilités à l'eau.

Au Tchad, les constructions en terre sont bien présentes à la campagne comme en ville. Dans toutes les régions du pays les architectures sont différentes, les constructions sont faites en prenant en compte les exigences climatiques (la pluie, la chaleur et le vent). A l'heure actuelle, il est estimé que la moitié de la population tchadienne vit dans des habitats en terre.

Le Tchad est un pays à vocation agricole par excellence surtout au centre et au sud du pays. Le riz est l'une des cultures les plus pratiquées, elle couvre une superficie de 25 000 hectares et produit 75 000 tonnes de pailles. Une partie est consommée par les animaux, elle est utilisée également pour l'énergie de chauffe et la construction des huttes dans les zones de pâturages. La gomme arabique est présente en grande quantité dans la zone sahélienne. Actuellement le Tchad produit 200 000 tonnes/an. Il est le deuxième exportateur avec 20 000 tonnes par années, après le soudan.

Au Tchad, il y a une insuffisance de logements et les matériaux industriels (ciment, la chaux et les aciers) sont chers et produisent une quantité importante de CO₂ dans l'atmosphère. Les matériaux traditionnels (sable et gravier) sont épuisables dans le temps.

Vue les nombreuses qualités offertes par l'argile, il est opportun de valoriser les matériaux locaux à base d'argile, de paille de riz et de gomme arabique. Ces matériaux sont disponibles, économiques et sains vis-à-vis de l'environnement. Nous allons fabriquer des blocs de terre comprimés (BTC) avec de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée avec la paille de riz.

Des études seront menées pour la caractérisation mécanique et thermique des blocs en terre comprimés afin de choisir une meilleure formulation pour les deux grandeurs.

En plus de l'introduction générale, ce travail de recherche est constitué de quatre chapitres.

Le chapitre 1 est consacré à l'étude bibliographique, il donne un aperçu général sur les différents produits de la terre dans la construction et en particulier le BTC, les différentes réalisations des ouvrages en terre dans le monde, le choix de la terre à stabiliser et les différents modes de fabrication des BTC. Dans cette partie, nous allons également présenter l'utilisation des fibres

naturelles et synthétiques dans la terre et faire ressortir leurs avantages et leurs inconvénients dans la construction.

Le chapitre 2 fait une présentation du Tchad, ses zones climatiques, ses cultures céréalières en générale et celle du riz en particulier. Dans cette partie les différents liants sont également présentés, avec leurs avantages et leurs inconvénients. Par la suite, la gomme arabique est retenue comme liant pour la stabilisation des matériaux de construction. Enfin, une description détaillée est faite sur la gomme arabique pour mettre en exergue ses qualités et sa disponibilité.

Le chapitre 3 est consacré aux travaux expérimentaux, ce qui revient à déterminer les différentes grandeurs tels que les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et thermique des matériaux utilisés (argile, gomme arabique, paille de riz et sable de carrière). Dans ce chapitre les différentes formulations, les procédures de fabrication des échantillons et de séchage, ainsi que les outils de caractérisations seront présentés et enfin les caractéristiques mécaniques et thermiques des échantillons sont décrites.

Dans le chapitre 4, sont présentés les résultats et les discussions. Ces résultats montrent l'effet de la gomme arabique par rapport aux échantillons fabriqués avec de l'argile sans gomme arabique et l'effet de la paille de riz par rapport aux échantillons non renforcés.

Enfin la conclusion générale et des recommandations pour des futures recherches mettront un terme à ce travail de recherche.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Le matériau terre est utilisé depuis très longtemps dans le monde entier pour la construction des habitations. Dans la plupart des pays, les premières habitations sont en terre. Avec le développement technologique, la construction en terre a reculé considérablement au profit des matériaux modernes (le ciment, la chaux, le bitume, le bois. etc.) à cause de sa faible résistance mécanique et à l'eau. Le réchauffement de la planète incite l'homme à recourir aux matériaux ayant un faible impact environnemental et disponibles en tant que ressource. Le matériau terre souvent cité comme matériau des pauvres, fait son retour en matière de construction durable de coût et de confort intérieur [1].

1.2. Techniques de construction en terre

Parmi les différentes techniques, la figure 1-1 représente celles qui sont retenues dans le programme établi par le groupe CRAterre en 1986 [1]. Huit techniques sont couramment utilisées dans la construction :

- **Adobe** : la terre mélangée avec une quantité d'eau élevée, devient une pâte plastique et souvent amandée avec de la paille. Les blocs sont moulés et séchés au soleil ;
- **Pisé** : la terre avec une teneur en eau moindre est compactée dans des coffrages, couches par couches et damée ;
- **Terre-paille** : une grande quantité d'eau est versée sur de la terre pour obtenir un liquide épais homogène et ensuite la paille est ajoutée. Ce mélange où argile et paille sont visibles, nécessite des éléments porteurs pour sa mise en œuvre ;
- **Torchis** : est un mélange de la terre argileuse, d'eau et de fibres naturelles (pailles, foin, crin de cheval, bouse de vache... etc.). Il permet de couvrir par enrobage les clayonnages ou par pression aux lattis des pans de bois des maisons en colombages ;
- **Terre façonnée** : un mélange préparé avec de l'argile, de la paille et de l'eau. Elle sert à la construction des murs de la même manière que la technique des poteries ;
- **Terre extrudée** : le matériau est extrudé par un puissant dispositif, adapté à la fabrication des matériaux pour la cuisson ;
- **Bauge** : la terre est souvent mélangée de paille ou autres fibres. Les matériaux de construction sont façonnés en forme de grosses boules et posés les uns sur les autres et compactés légèrement avec les pieds ou les mains pour construire des murs monolithiques. Souvent, la bauge est encadrée par des éléments porteurs en bois ;
- **Terre comprimée** : la terre est comprimée dans un moule métallique pour obtenir des blocs de terre. Dans le passé le matériau est compacté dans un moule à l'aide d'un pilon ou à

sont également apparues dans les années 1970 et 1980. Ce qui a encouragé le développement de production et d'utilisation des blocs de terre comprimée dans la construction [3].

1.4. Diverses variétés de blocs de terre comprimée

Pour utiliser dans différents usages, la figure 1-2 expose divers produits en bloc de terre comprimé [1] (voir figure 1-2).

- Blocs pleins

Ils sont généralement de forme prismatique (parallélépipèdes, hexagones multiples, rectangles, cubes, etc.) et utilisés pour différents usages (mur extérieur et cloison) dans la construction.

- Blocs creux

Avec 15% à 30% de vide, ces blocs sont allégés et améliorent l'adhérence du mortier. Certains servent de blocs coffrant.

- Blocs alvéolaires

La fabrication de ces blocs nécessite un moule spécial et une pression bien supérieure par rapport aux blocs usuels. Ils ont l'avantage d'être léger.

- Blocs à emboîtement

Avec ces blocs, on peut construire des murs sans utiliser de mortier. Par contre leurs fabrications nécessitent des moules spécifiques et une pression élevée.

- Blocs parasismiques

Leurs formes améliorent leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes parasismiques : chaînage par exemple.

- Blocs spéciaux

Ces blocs sont fabriqués uniquement pour des applications très spécifiques.



Figure 1-2 : Différents produits de bloc de terre comprimée [1]

1.5. La construction en bloc de terre comprimée dans le monde

Utilisant ces avantages : économiques, écologiques, esthétiques et environnementaux, de nombreux bâtiments ont été construits de par le monde. Par exemple : La Maison Palmier à Marrakech, Maroc (figure 1-3) ; le Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau, France (figure 1-4) et l'atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde (figure 1-5) [4].



Figure 1-3 : Maison Palmier à Marrakech (Maroc) [4]



Figure 1-4 : Domaine de la terre, l'Isle d'Abeau (France) [4]



Figure 1-5 : Atelier électronique, Ecole en Auroville (Inde) [4]

1.6. L'utilisation de la terre dans la construction

1.6.1. Définition

Le sol est la partie superficielle de l'écorce terrestre. C'est un matériau complexe avec des constituants de tailles différentes. Le sol supporte des infrastructures et des êtres vivants. Il est issu d'une roche mère dont les éléments se sont déplacés par différents processus. Ce processus de migration des particules se traduit par une infinité de terres avec des caractéristiques bien différentes. Cette terre sera valorisée dans la construction dans le cas où ses matières organiques diminuent ou disparaissent [5].

1.6.2. La composition

La terre est un matériau, qui est composé d'éléments de différentes granulométries. Il s'agit de graviers, de sable, de limons et d'argiles ($< 2\mu\text{m}$). Parmi ces éléments, il y a des inertes (gravier et sable) et actifs (limons argiles). Les graviers et les sables représentent le squelette solide, le limon et l'argile, constituent le liant, comme le ciment dans le béton [5]. Le comportement du sol change avec la proportion d'éléments fins ou grenus. Avec une forte proportion d'argile le

sol gonfle en présence d'eau et se rétracte après séchage. Par contre le sol est stable avec une proportion élevée d'éléments grenus à l'état sec ou humide. Les matériaux contenant des éléments fins en grande proportion sont à éviter dans les constructions [6].

La présence en proportion importante d'argile dans les matériaux de base pour la fabrication des blocs de terre comprimés est nécessaire pour jouer le rôle de liant. Il est important de rappeler quelques propriétés qui sont responsables des changements de comportements.

1.6.3. Quelques rappels sur le matériau argileux

Les argiles sont des roches silicatées en feuillets (phyllosilicates), riches en alumine et plus ou moins hydratées. Elles forment seules ou composent, en association avec d'autres roches, plus de 50 % des roches sédimentaires. Les argiles présentent comme des particules extrêmement fines (de l'ordre 2 μm). Les argiles imbibées d'eau deviennent plastiques et imperméables [7]. Elles se trouvent dans la nature en grande quantité et sont facilement exploitables.

L'argile est une ressource naturelle. Ses différentes propriétés font qu'elle est utilisée dans beaucoup de domaines. En plus de son rôle dans la construction (matériaux), elle est employée dans la fabrication « des polymères, ou encore le raffinage d'huile alimentaire, la médecine ou la cosmétique ». C'est un matériau qui présente une grande valeur industrielle à travers ses différentes propriétés chimiques et physiques [8].

1.6.3.1. Structure

Les phyllosilicates sont des minéraux silicatés par lesquels les tétraèdres de Si_2O_4 constituent des feuillets infinis bidimensionnels. Des octaèdres d'oxydes métalliques sont entassés avec des feuillets tétraédriques dans un rapport de 2 pour 1 ou 1 pour 1. Selon (Le Pluart, 2002) [9] les phyllosilicates sont aussi nommés silicates lamellaires. Les différents minéraux sont identifiés par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques (figure 1-6). La charpente d'ions O^{2-} et OH^- forme la structure des phyllosilicates [10]. Les anions (O^{2-} et OH^-) sont placés au sommet des liaisons octaédriques (O^{2-} et OH^-) et tétraédriques O^{2-} . Les cations de taille variables (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) viennent se loger dans les cavités des unités structurales élémentaires. Une organisation de ses éléments se fait en plan pour former des couches octaédriques et tétraédriques par lequel le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace interfoliaire est l'appellation de l'espace entre deux feuillets parallèles. Quand Al^{3+} ou un autre ion métallique trivalent occupe deux cavités sur trois de la couche octaédrique, cette structure est appelée dioctaédrique. Dans le cas de substitution isomorphe dans les groupes tétraédriques (Si^{4+} -- Al^{3+} , Fe^{3+}) et/ou octaédriques (Al^{3+} -- Mg^{2+} , Fe^{2+} ou Mg^{2+} -- Li^+), un déficit

de charge est causé et il est compensé à l'extérieur du feuillet par des cations compensateurs [11].

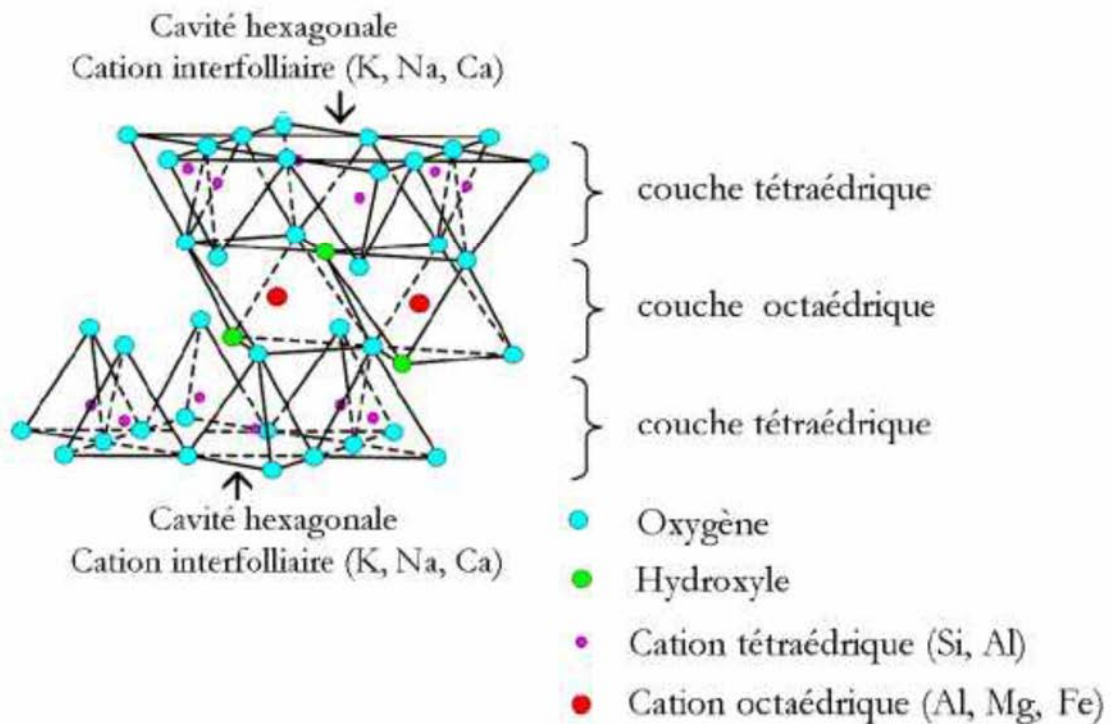


Figure 1-6 : Une structure d'un feuillet de phyllosilicate 2 : 1 [11]

1.6.3.2. Les différentes catégories d'argiles

Les argiles sont classées sur la base de l'épaisseur et de la structure du feuillet. Il existe quatre groupes les plus classiques.

- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique fait partie des minéraux à 7 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O ou 1 : 1 ;
- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques fait partie des minéraux à 10 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O : T ou 2 : 1 ;
- Le feuillet composé des feuillets T : O : T et des couches octaédriques interfoliaires par alternance fait partie des minéraux à 14 Å d'épaisseur.
- Les minéraux argileux interstratifiés forment des feuillets d'épaisseurs variables. Ces minéraux proviennent du mélange régulier des différents groupes présentés dans le tableau 1-1. La classification des phyllosilicates est réalisée grâce à la valeur de la charge permanente du feuillet (McKenzie, 1975 et Brindley, 1966) [12].

Tableau 1-1 : : Classification des phyllosilicates, d'après (Caillère, 1959)[13], complétée par (Mitchell, 1993)[14]

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cation ou seulement de l'eau	Kaolinite	Dioctaédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cation	Pyrophyllites	Dioctaédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Dioctaédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique
	Cations monovalents non hydratés	Micas	Dioctaédrique	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Dioctaédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Dioctaédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2 : 1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Diotaédrique	Sépiolite, Palygorskite

1.6.3.3. Les différents types d'argiles

Il existe plusieurs variétés des familles d'argiles qui composent des dizaines d'espèces, (voir le tableau 1-1). Par ailleurs, les trois familles qui sont la Kaolinite, l'Illite et la montmorillonite sont présentes un peu partout dans la terre en différentes proportions.

1.6.3.3.1. La kaolinite

Les minéraux argileux (1 : 1 ou T-O) de 7,2 Å d'épaisseur sont les kaolinites (figure 1-7 et 1-8). Dans le cas où deux feuillets sont superposés, les H^+ se trouvant sur la surface inférieure et les O^- de la surface supérieure créent entre eux une liaison hydrogène (O-H) forte. Une grande stabilité est assurée entre la liaison hydrogène et la liaison de Van der Waals pour faire face à l'action de l'eau. De ce fait, les minéraux argileux kaolinites sont stables et leurs structures élémentaires sont protégés vis-à-vis de l'eau.

La faible valeur de la surface spécifique ($45m^2.g^{-1}$) et le nombre élevé de feuillets par particule de kaolinite expliquent la forte liaison hydrogène entre les feuillets.

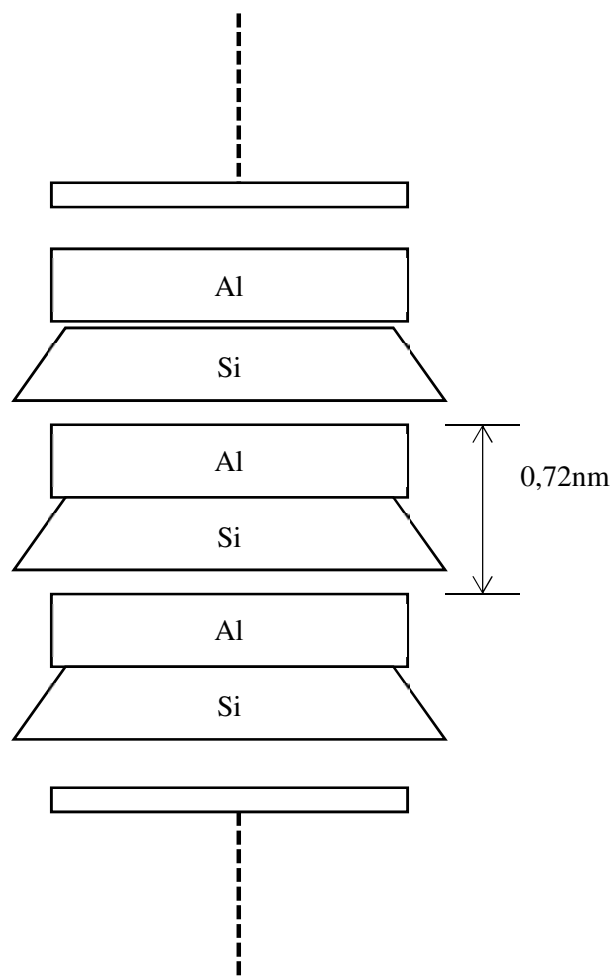


Figure 1-7 : : Structure schématique de la kaolinite [15]

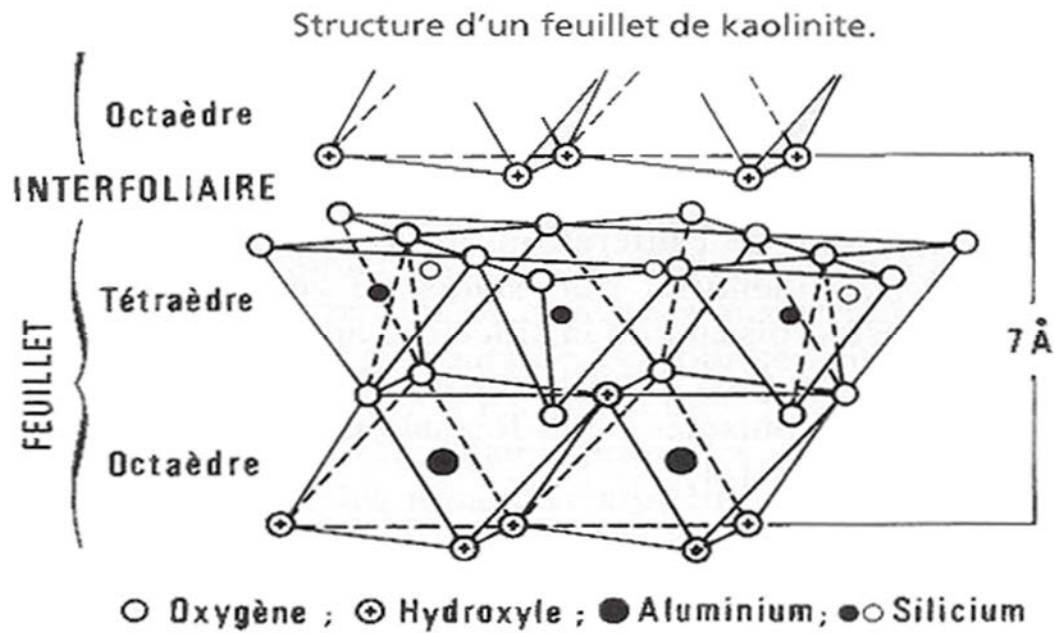


Figure 1-8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [16]

1.6.3.3.2. La montmorillonite

La montmorillonite est constituée des feuillets élémentaires de type 2 pour 1 ou T : O : T. Elle est caractérisée par deux couches tétraédriques de silice entourée d'une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets n'est pas ordonné. « Chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est estimée à 9,6 Å » (figure 1-9 et figure 1-10).

Par ailleurs, la montmorillonite possède une grande sensibilité à l'eau et un gonflement conséquent dans la mesure où des molécules d'eau s'infiltrent entre les feuillets. Les feuillets ont des épaisseurs qui varient de 9,6 Å à 15 Å. En fonction de la nature de cation compensateur et la présence d'humidité entre les feuillets, leurs épaisseurs augmentent encore plus [17].

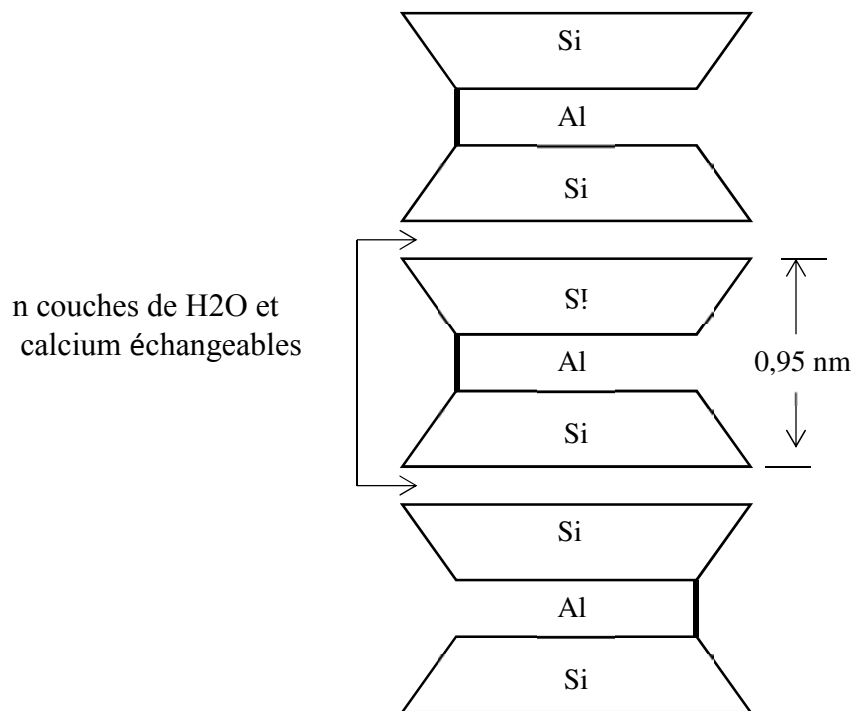


Figure 1-9 : Schéma de la structure de la montmorillonite [15]

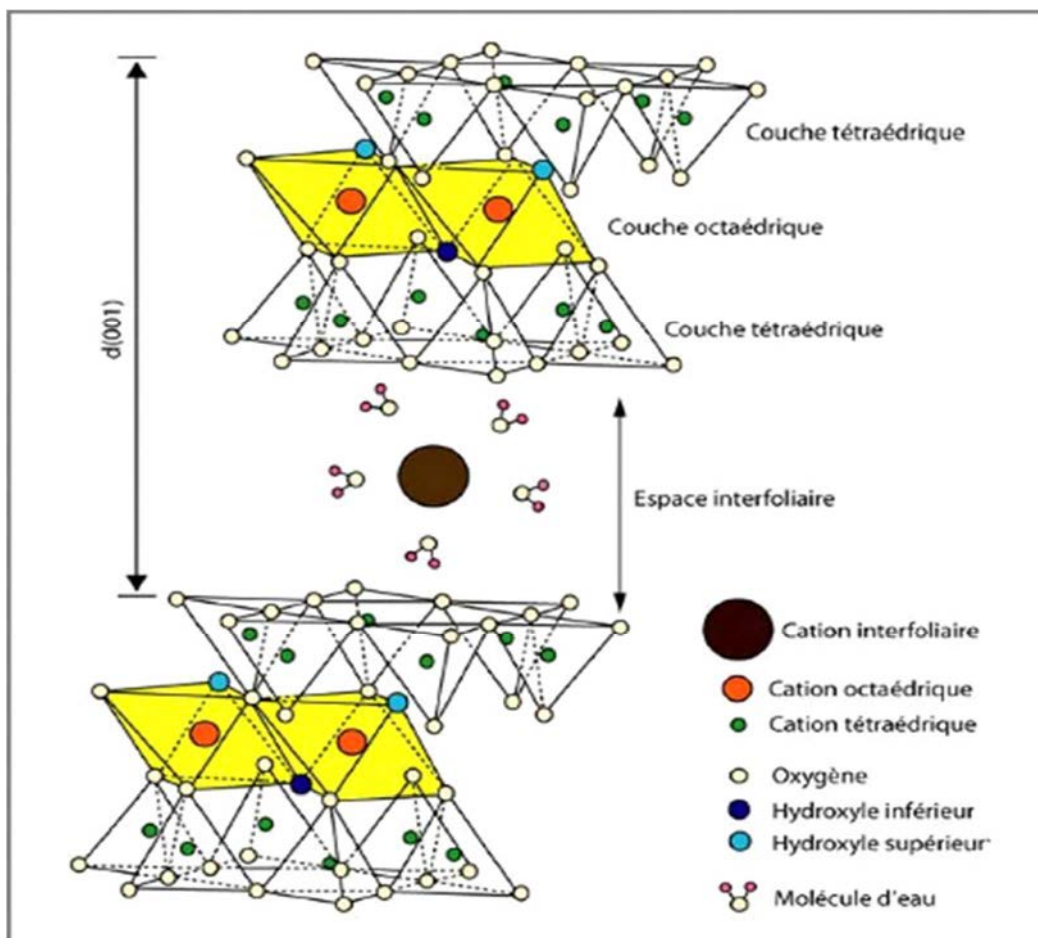


Figure 1-10 : Schéma de la structure de la montmorillonite [18]

1.6.3.3.3. L'illite

La structure de l'illite de type 2 pour 1 est proche de celle de montmorillonite. La différence est que cette dernière présente un déficit de charge dû au remplacement des ions par des cations de potassium K^+ (figure 1-11). L'avantage des cations potassium (K^+) est qu'il arrive à remplir la cavité dans lequel il est logé. Les ions potassium anhydre arrivent à assurer une liaison forte entre les feuillets, ce qui empêche la pénétration des molécules d'eau entre ces feuillets et en même temps maintenir l'espace interfoliaire fixe à 9,6 Å. Par conséquent, l'illite possède une stabilité face à l'eau par rapport à la montmorillonite.

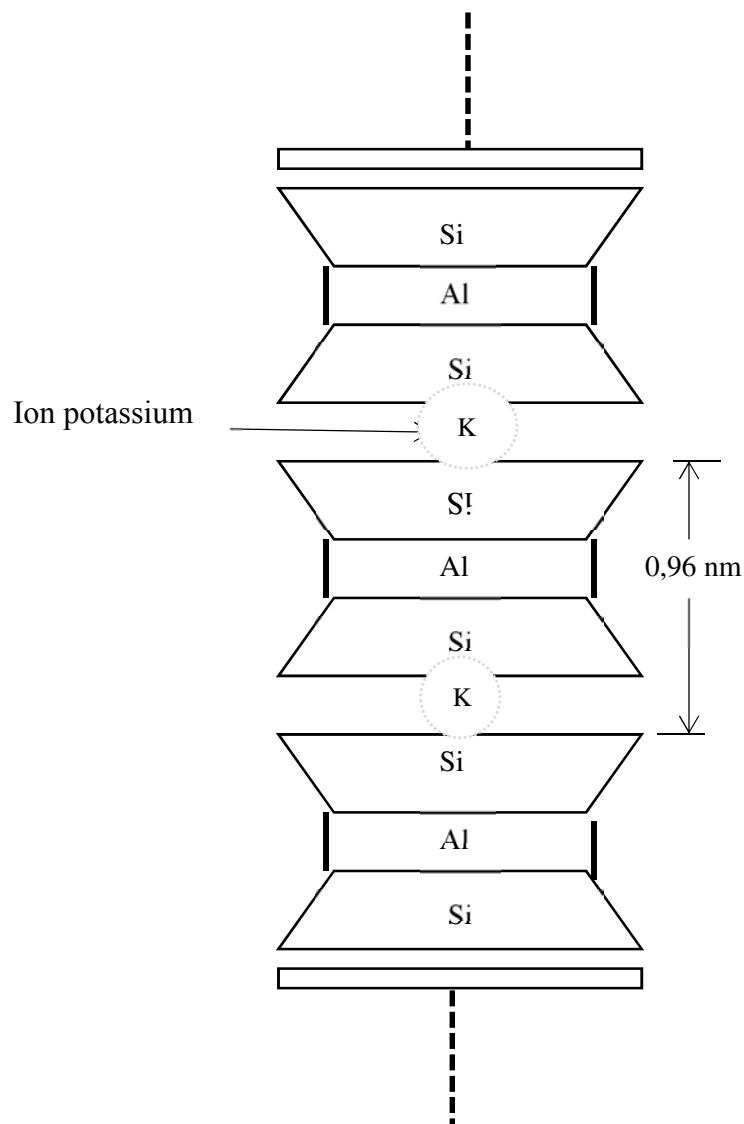


Figure 1-11 : Schema de la structure de l'illite [15]

1.7. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

La terre utilisée dans la construction possède des propriétés différentes. Elles sont dues aux caractéristiques de la matière première qui domine dans le sol. Il est nécessaire de connaître les différentes propriétés physiques et chimiques de la terre pour son utilisation dans la construction [3]. Les plus essentielles sont :

- La granulométrie ;
- La limite d'Atterberg ;
- La cohésion;
- La compressibilité.

Les caractéristiques physiques telles que la granulométrie les limites d'Atterberg sont développées dans le chapitre 3.

1.7.1. La cohésion

La cohésion est une force d'interaction qui regroupe les grains des matériaux pour former un bloc résistant au cours d'une opération de traction. Le matériau agit différemment selon que son taux d'argile est important ou non. Pour les sols argileux, la cohésion vient de l'argile. Par contre pour le sol sableux, la cohésion est apportée par l'ajout d'un liant pour assurer la liaison des grains entre eux. Les matériaux sont ordonnés du moins cohérent au plus comme suit [1] : Sable grossier, sable fin, limon et argile.

1.7.2. La stabilisation

La stabilisation est une opération qui permet de modifier les propriétés d'un composite en procédant au mélange de plusieurs matériaux pour améliorer ses caractéristiques mécaniques [29].

1.7.2.1. Les différents objectifs de stabilisation définis par les auteurs [28, 27, 29] sont :

- Meilleures caractéristiques mécaniques ;
- Faible variation de volume et moins de porosité du matériau ;
- Bonne résistance à l'érosion du vent et de la pluie.

1.7.2.2. Les principaux procédés de stabilisation sont [28, 27, 30] :

- La stabilisation mécanique : elle est obtenue en exerçant des contraintes de compactage sur le matériau pour réduire la porosité, augmenter la densité et l'imperméabilité.
- La stabilité physique : elle est obtenue en modifiant la granularité du matériau. Par exemple, pour le matériau argileux, l'ajout du sable à gros grain est nécessaire. Dans le cas des matériaux grossiers, l'ajout des éléments fins est nécessaire.
- La stabilisation chimique : Pour la stabilisation chimique, des liants minéraux et de bitume sont utilisés. Ils réagissent avec la terre pour améliorer les caractéristiques du matériau. La nature de la terre à stabiliser conditionne la quantité et le type de liant à utiliser [21]. Deux procédures de stabilisation sont couramment utilisées. Introduction du liant dans le matériau et homogénéiser l'ensemble (traitement de la masse). L'application des enduits de crépissage, des peintures sur la construction sont considérés comme le traitement de surface.

1.7.2.3. Influence de la teneur en eau sur la densité

La densité d'un matériau dépend d'un certain nombre de paramètres physiques : la masse volumique de la matière première, la granulométrie, la contrainte de compactage, la méthode de compactage et la teneur en eau. En effet, la teneur en eau influe d'une manière significative sur les propriétés des matériaux comprimés [24].

La majorité des matériaux compactés affichent un comportement similaire entre la masse volumique et la teneur en eau. La masse volumique la plus élevée est obtenue pour un indice de vide réduit et une teneur en eau dite optimale (TEO) (figure 1-12) [25]. Cette teneur en eau est déterminée au laboratoire. Pour les matériaux routiers, cette grandeur est obtenue à l'aide de l'essai Proctor qui exerce une force dynamique sur les matériaux. Cet essai ne convient pas aux matériaux argileux [26].

Les auteurs (Mesbah *et al.*, [34]) proposent un compactage statique pour sol argileux.

Par ailleurs, il est difficile de trouver un rapport entre le compactage dynamique fourni par l'essai de Proctor et le compactage statique provenant d'une presse de BTC [35].

Pour la détermination de la teneur en eau optimale, il est plus convainquant d'utiliser la presse de BTC [36].

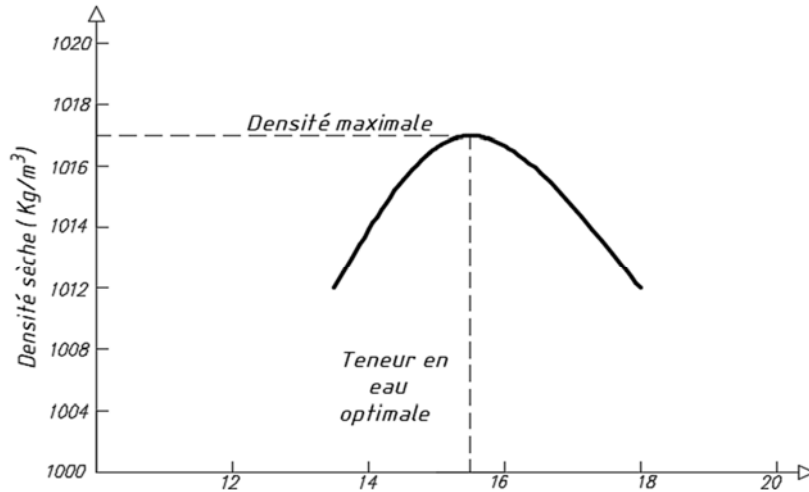


Figure 1-12 : Rapport entre le teneur en eau et la densité sèche [25]

1.7.2.4. Influence de l'énergie de compactage

Une contrainte de compactage élevée, nécessite une teneur en eau optimale moindre. En effet la compaction est efficace et la densité sèche est élevée (figure 1-13) [37, 28, 25]. Tout de même, une énergie de compression trop élevée risque de détériorer le matériau [1].

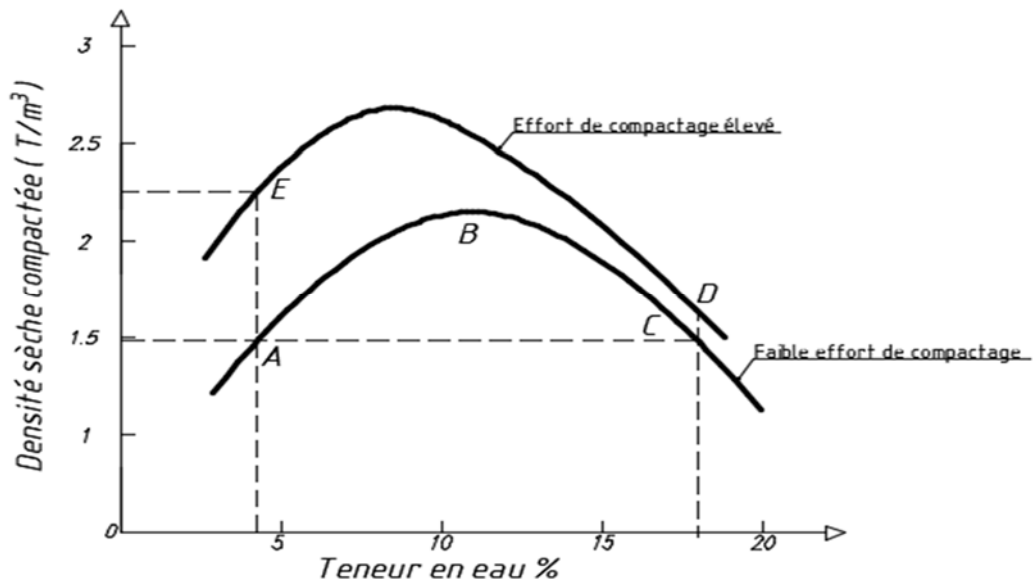


Figure 1-13 : Effets de l'énergie de compactage sur la structure du sol [37]

Gooding [38], dans certains de ses travaux a mis en évidence le rapport entre la contrainte de compactage et la résistance mécanique. Ainsi, une forte contrainte de compactage produit une résistance mécanique plus élevée (figure 1-14). Guettala et al [39] ont montré dans leurs études que les résistances mécaniques évoluent avec la contrainte de compactage jusqu'à un optimum

de 17,5 MPa. Par contre, une baisse de résistance de 7% est observée en utilisant une force de compression de 20 MPa (figure 1-15).

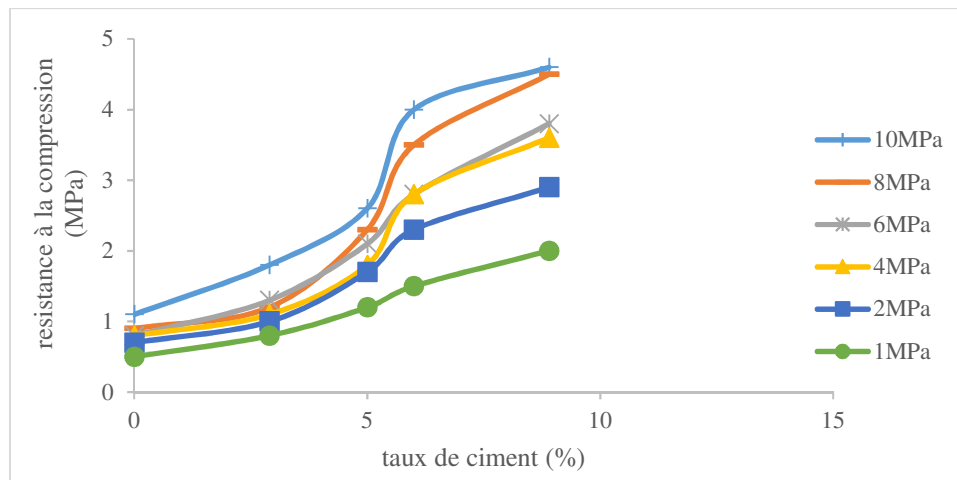


Figure 1-14 : Résistance des matériaux en fonction de la teneur en ciment et la contrainte de compactage [38]

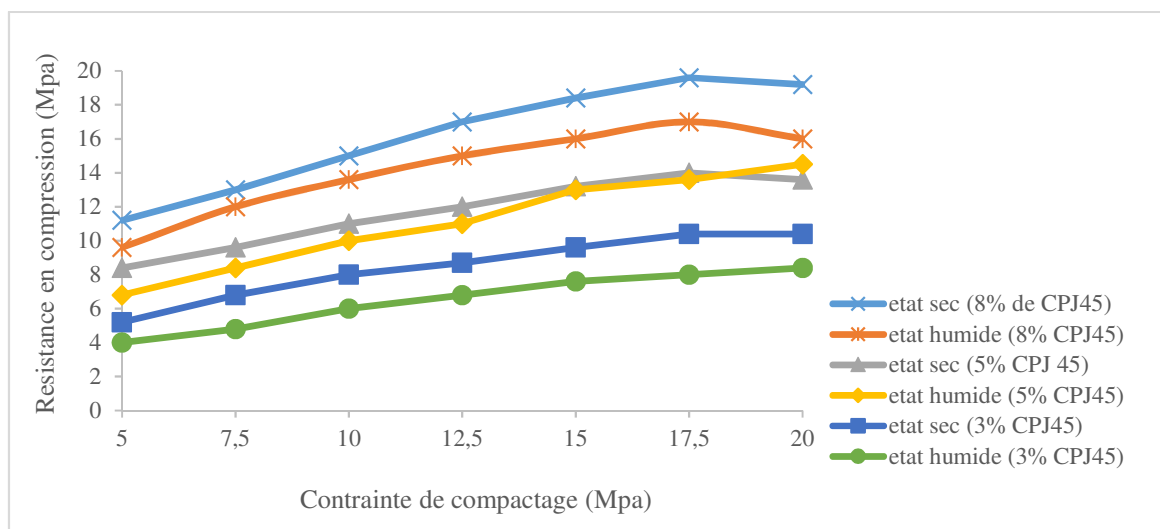


Figure 1-15 : la contrainte de compactage et le taux de ciment sur la résistance en compression [39]

1.7.2.5. Effet de la granulometrie du sol

La granulométrie uniforme n'est pas à mesure de fournir une compacité élevée et la courbe de compactage est presque plate, avec un maximum peu accentué (figure 1-16) [25]. Les granularités étalées, caractéristiques de matériaux où toutes les tailles des grains sont représentées. Cette composition de matériau donne par contre, une meilleure compacité.

En effet, un matériau constitué de mélange d'éléments fins et grossiers donne donc un produit final bien plus dense qu'un matériau composé uniquement des éléments fins [6, 25].

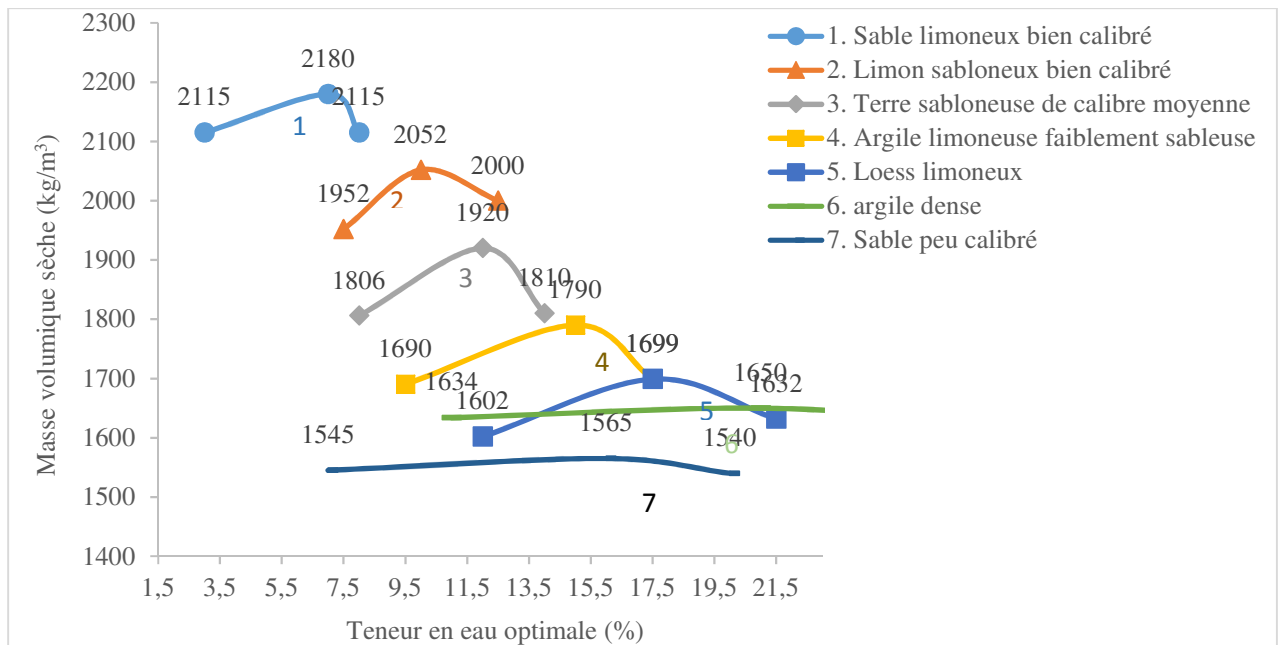


Figure 1-16 : la relation entre la teneur en eau et la densité sèche pour 7 types de sol [25]

Pour chercher une bonne résistance mécanique et à l'eau sur un matériau, il faut exercer une pression de compactage pour réduire au maximum les vides [1]. Une correction granululaire peut aussi être utilisée sur le matériau disponible. Il s'agit d'ajouter du sable au matériau plastique ou des éléments fins au matériau granulaire. La variation de la plasticité (Limites d'Atterberg) d'un mélange de sable et d'argile en différente proportion est illustrée par (la figure 1-17) [6].

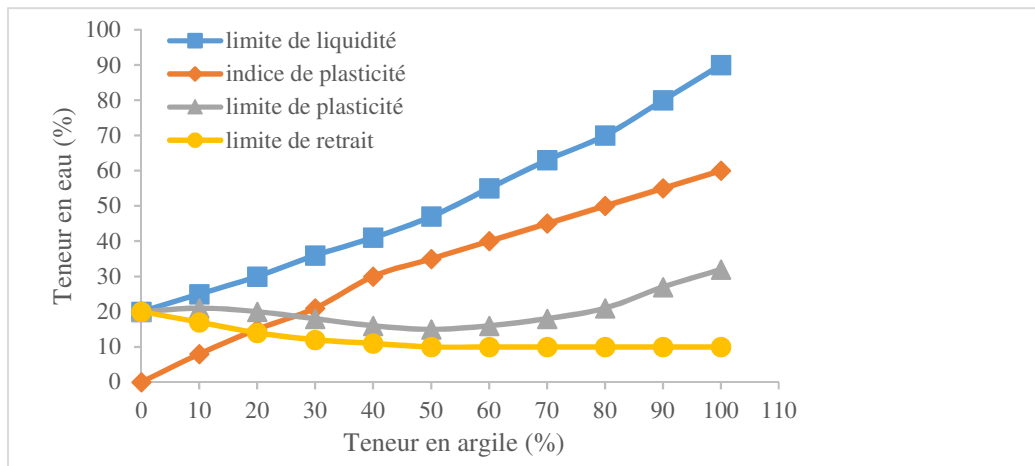


Figure 1-17 : Evolution des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en argile [6]

D'après Guettala [40], les résistances à la compression à l'état sec et humide augmentent avec le taux de sable dans le mélange (figure 1-18). A titre d'exemple, l'ajout de 30% de sable, les résistances des matériaux secs et humides augmentent environ de 24% à 28% .

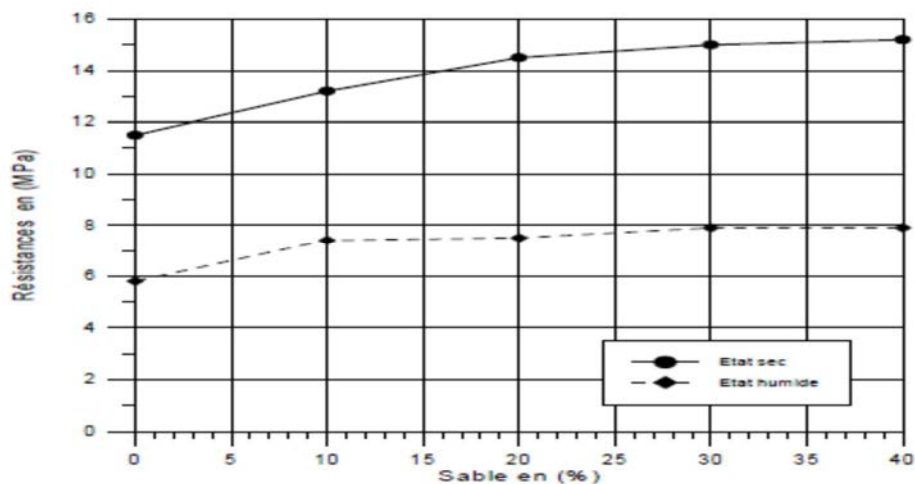


Figure 1-18 : Effets de contrainte de compactage (10 MPa) et de taux de sable sur la résistance en compression d'un matériau stabilisé à 5% de ciment [40]

1.7.3. Stabilisation au ciment

1.7.3.1. Généralités

La technique d'amélioration des caractéristiques mécaniques de la terre par les liants minéraux est utilisée depuis 1920 en Allemagne et 1935 aux Etats Unis. Dans le secteur routier, les tentatives de stabilisation par le ciment remontent à 1952 aux USA avec un élargissement aux

routes et pistes d'aérodromes. La maîtrise de la technique de stabilisation de la terre par les liants minéraux, permet de couvrir tout le domaine de génie civil [1].

L'utilisation de tous les ciments normalisés dans la construction donne de bons résultats [41]. Compte tenu de la résistance demandée, on peut employer la classe de résistance qui convient le mieux. Par contre, Doat [6] propose un type de ciment en fonction de la nature du sol.

L'utilisation de ciment riche en alite (C_3S) et bélite (C_2S) convient mieux aux sols argileux. Ces types de ciments donnent, après hydratation, beaucoup de Portlandite $Ca(OH)_2$. Verdeyen [44] propose pour ce type de ciment une terre dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30% ($I_p < 25\%$).

1.7.3.2. Mécanisme de stabilisation

Le ciment est constitué de plusieurs éléments. Dont les quatre principaux sont :

- 1- le silicate tricalcique ou alite ($SiO_2 - 3CaO$) ;
- 2- le silicate bicalcique ou belite ($SiO_2 - 2CaO$) ;
- 3- L'aluminate tricalcique ou aluminate ($Al_2O_3 - 3CaO$) ;
- 4- Ferro-aluminate tetracalcique ou Ferrite ($Al_2O_3 - Fe_2O_3 - 4CaO$).

Ces composés sont désignés en notation cimentière respectivement par : C_3S ; C_2S ; C_3A et C_4AF . Les constituants secondaires sont la chaux libre (CaO), les sulfates de sodium et de potassium ($NaSO_4$ et K_2SO_4) [43].

Suivant la teneur de ces constituants, les propriétés du ciment changent. Pour illustration, avec une forte teneur en C_3S , le ciment présente une résistance mécanique élevée, par contre un ciment possédant une forte teneur en C_3A , se caractérise par une faible résistance à l'action des eaux agressives.

Lorsque le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrate si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C_3S et C_2S) qui forment deux nouveaux composés : la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté ($C-S-H : 3CaO.2SiO_2.3H_2O$) :

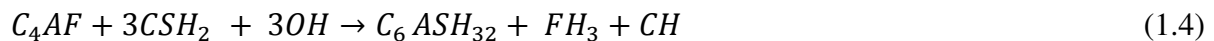


En fonction du taux de gypse dans le ciment, les aluminates tricalciques (C_3A) sont hydratés. L'ettringite est formé en présence de gypse et elle joue un rôle moteur dans l'amélioration de la résistance :



Les C_3A réagissent avec l'eau pour former des C_4AH_{13} , C_2AH_8 , et des C_3AH_6 en l'absence de gypse. C_4AH_{13} et C_2AH_8 sont instables. « Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C_4AH_8 »

Une réaction se produit par la phase ferrite (C_4AF) en présence de gypse pour produire de l'ettringite suivant la réaction (1.4)



La réaction du ciment dépend de la granulométrie et de la minéralogie du sol à traiter. Pour les sols à éléments grossiers, le ciment couvre les grains pour les assembler et former un bloc résistant [44]. La réaction se produit entre le ciment et la terre ou bien entre les différents constituants du ciment [27].

Pour le matériau cohérent, une quantité importante de particules sont plus petites que les grains de ciment, « donc elles ne peuvent pas être couvertes par le ciment » [22]. Par ailleurs, le compactage du mélange pourra améliorer la résistance du composite. La résistance croit de plus en plus au fur et à mesure que l'hydratation avance.

1.7.3.3. Efficacité et dosage

Le compactage à l'état humide est mieux adapté pour obtenir une bonne résistance en compression. Les éléments grenus (graves et sable) procurent une résistance accrue par rapport aux limons et aux argiles [1]. Les meilleurs résultats obtenus avec les éléments grenus ont été confirmé également par Walker [45]. La résistance à la compression de BTC stabilisé par du ciment diminue avec l'augmentation des matériaux argileux (figure 1-19).

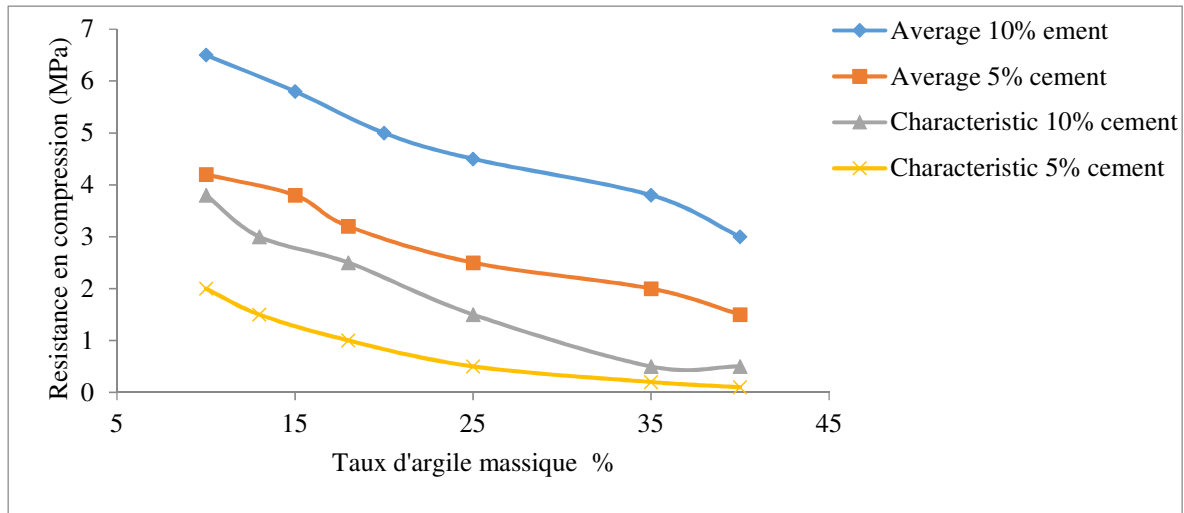


Figure 1-19 : Influence de la teneur en argile sur la résistance à la compression du bloc de terre stabilisée au ciment [45]

Généralement la stabilisation de la terre avec 5 à 6% de ciment donne des résultats acceptables en compression. Doat [6] propose un dosage en ciment de 8% qui constitue une limite supérieure économiquement acceptable. Dans la plupart des cas, le taux de ciment utilisé pour la stabilisation du matériau terre varie entre 3 à 12 % [38]. Heathcote [46] propose une teneur minimale de ciment pour la stabilisation de 0,75%. D'autres études prouvent que cette teneur est très insuffisante, ils proposent entre 5 et 12 % pour que la résistance mécanique soit acceptable. Pour argumenter cette thèse, Walker [20] affirme que les BTC stabilisé avec moins de 5% de ciment sont trop fragile pendant la manipulation. Une année après, Walker [20] propose pour une teneur d'argile soit entre 5 et 20 %, la teneur de ciment doit être comprise entre 4 et 10 % et l'indice de plasticité du matériau entre 2,5 et 30 %.

1.7.3.4. Effets sur les propriétés du matériau stabilisé

1.7.3.4.1. Effet sur la densité

Les résultats obtenus par Kerali [47] montrent que la stabilisation de BTC par le ciment améliore la densité sèche. Cette amélioration devient plus importante avec une pression de compactage élevée.

1.7.3.4.2. Effet sur la résistance mécanique

L'incorporation de ciment améliore nettement les caractéristiques mécaniques [20, 21]. La résistance mécanique telle que la compression et la traction par fendage augmente avec le taux de ciment dans le mélange [48] (figure 1-20). Les travaux de Akpokodje [21] ont montré que

la résistance à la compression d'un sol augmente avec le pourcentage de ciment selon une fonction linéaire (figure 1-21).

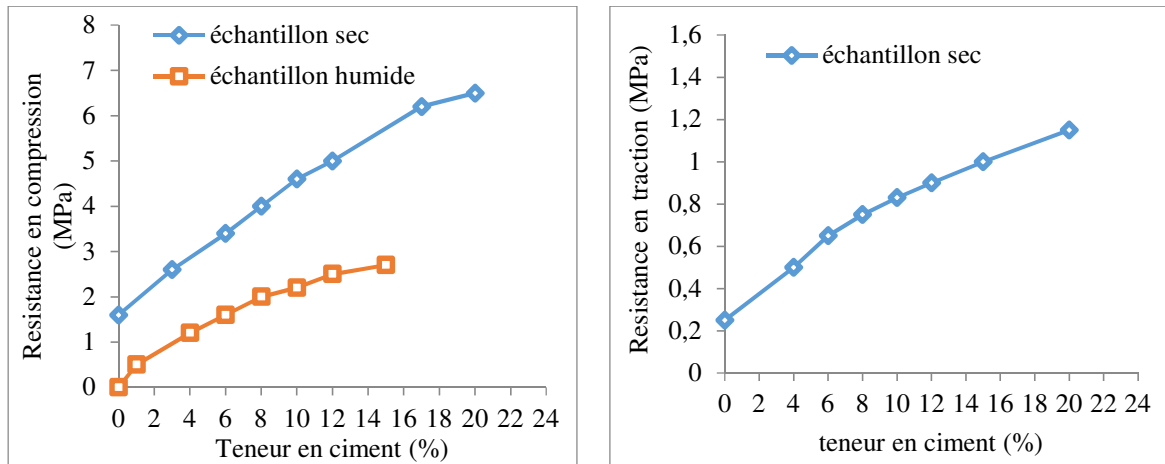


Figure 1-20 : Influence du ciment sur la résistance à la traction par fendage et à la compression de bloc de terre comprimée [48]

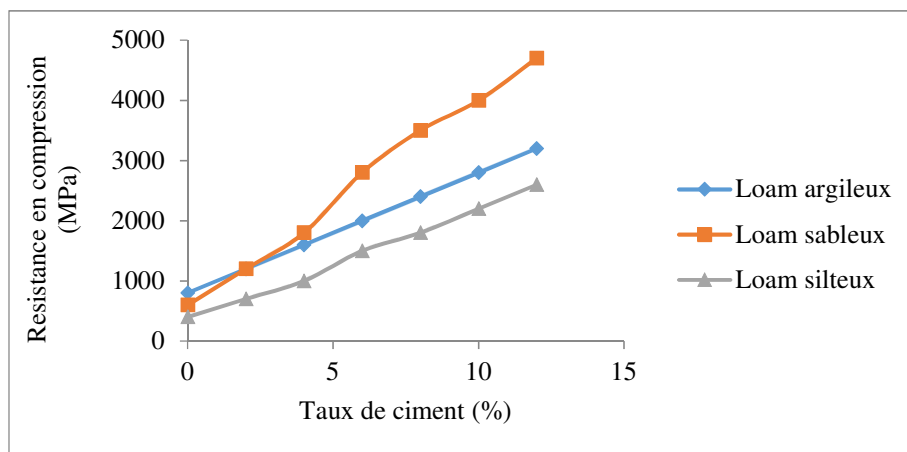


Figure 1-21 : Evolution de la résistance en compression pour 3 types de sols australiennes en fonction de taux en ciment [21]

La stabilisation de sol par le ciment améliore ses caractéristiques mécaniques et son insensibilité à l'eau. Les travaux de Venkatrama et al [49] ont montré que la résistance à la compression humide et à la traction des blocs de terre stabilisés croît avec l'augmentation de ciment. En doublant le taux de ciment, la résistance augmente de 2,3 fois. (Figure 1-22).

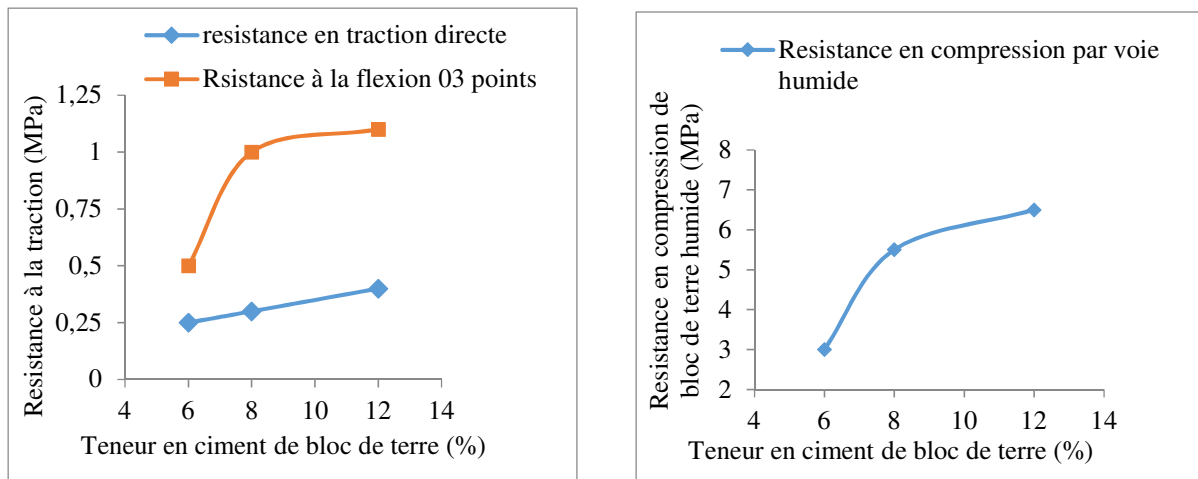


Figure 1-22 : Evolution de la résistance mécanique de blocs de terre en fonction du taux de ciment [49].

1.7.3.4.3. Effet sur l'absorption totale

Les travaux de Meukam [50] montrent que la stabilisation de matériau terre améliore son insensibilité à l'eau. A travers (la figure 1-23), Meukam [50] a remarqué que le taux d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de pourcentage en ciment.

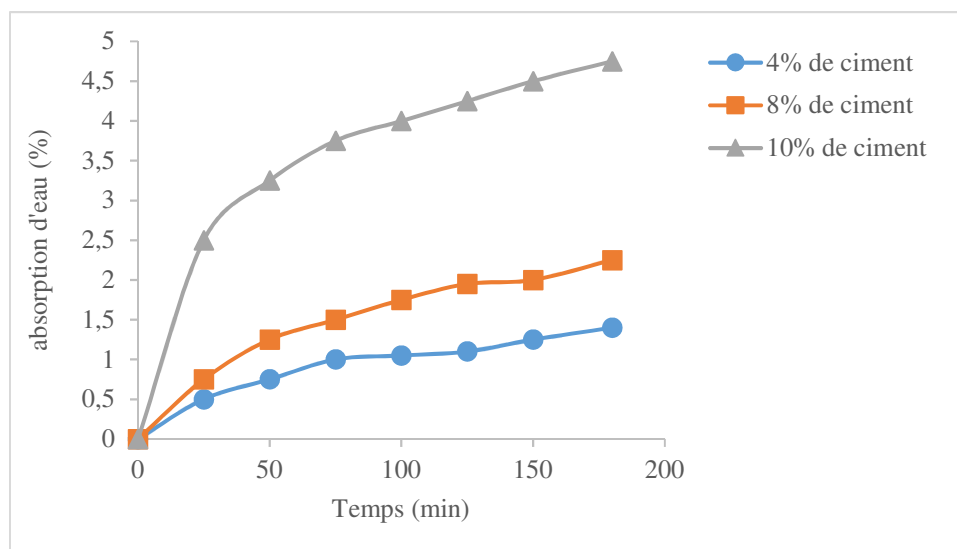


Figure 1-23 : Taux d'absorption d'eau dans le temps du matériau en terre stabilisée par différents pourcentages en ciment [50]

1.7.4. Stabilisation à la chaux

1.7.4.1. Généralité

Comme le ciment, la chaux a joué aussi un rôle dans la stabilisation des matériaux de construction depuis très longtemps. Elle fut employée par les Romains et d'autres anciennes civilisations pour stabiliser la chaussée des pistes [51].

La chaux est obtenue par calcination d'un mélange de calcaire et d'argile à une température qui avoisine 1000 °C. Il existe deux types de chaux :

- La chaux vive est obtenue par incinération du calcaire plus ou moins pure. Il s'agit de l'oxyde de calcium (CaO) (équation 1.5).



La chaux aérienne ou chaux éteinte quant à elle provient de la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est appelée aérienne parce qu'elle se durcit en présence de l'air. La chaux aérienne est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) (équation 1.6).



La chaux hydraulique contrairement à la chaux aérienne agit en présence d'eau. Elle provient de la calcination d'un calcaire surtout argileux.

Tous les types de chaux peuvent être utilisées pour la stabilisation du matériau terre [6]. Son utilisation est conseillée pour les sols contenant 20% d'argile et les sols qui ont IP > 17 et LL > 40.

La chaux éteinte est privilégiée par rapport à la chaux vive. Cette dernière présente des défauts tels que : la conservation est difficile face à l'humidité avant son utilisation et la manipulation est également pénible lors des préparations de mélanges [52]. La résistance d'un sol riche en kaolinite croît avec la teneur en chaux. Par contre pour un sol riche en illite, c'est à partir de 5% de chaux que les résultats sont satisfaisants à moyen et long terme [53].

1.7.4.2. Le mécanisme

Les réactions qui vont se produire lors d'une stabilisation à la chaux sont : l'échange cationique, la floculation et l'agglomération d'argiles, la carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques entre la chaux, la silice et l'alumine [54, 55, 56]. Tout d'abord les deux

premières réactions se produisent pour augmenter la plasticité, la maniabilité et aussi la résistance du sol. Ces réactions réduisent nettement l'indice de plasticité. Cette phase constitue la période de modification du sol (figure 1-24).

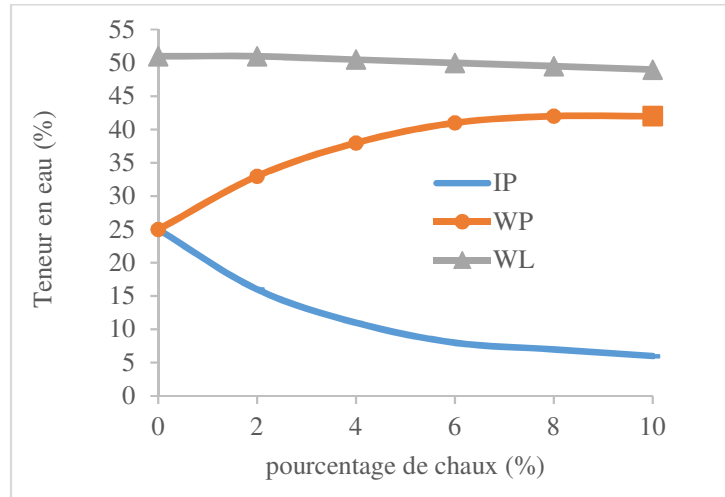


Figure 1-24 : variation des limites d'Atterberg en fonction du pourcentage de chaux par poids [57]

La phase suivante représente la stabilisation qui regroupe la troisième et la quatrième réaction. C'est la période de cimentation avec augmentation progressive de la résistance au cisaillement et de la durabilité du sol. La température joue un rôle prépondérant dans la stabilisation des sols par la chaux. Une température inférieure à 13 °C ralentit le processus de stabilisation. Par contre une température plus élevée l'accélère [58].

La teneur en eau diminue avec l'utilisation de la chaux vive. Elle est due à la réaction exothermique qui produit une forte chaleur. Le malaxage pourra également favoriser l'évaporation de l'eau.

1.7.4.2.1. L'échange cationique

Pendant la première réaction de la phase de modification, les différents processus de stabilisation commencent. Ils sont suivis par la floculation puis l'agglomération des minéraux argileux. Les échanges des cations sont souvent rapides. Ils sont de l'ordre de quelques heures [59]. Lorsque le mélange entre l'argile et la chaux a eu lieu, les liaisons entre les grains d'argile sont modifiées, le rendant très insensible à l'eau. Les types d'argiles telles que la montmorillonite et l'illite sont plus actives dans les échanges cationiques [19]. Ces minéraux argileux possèdent une structure 2 :1, soit deux feuillets de silice tétraédrique et un feuillet d'aluminate octaédrique. Les feuillets de silice possèdent des ions (anions), ce qui facilite la

liaison avec les ions positifs (cations) de l'eau. Cette liaison entre les anions de silice et les cations de l'eau donne une forte plasticité aux minéraux argileux tels que la montmorillonite et l'illite par rapport aux autres types d'argiles.

La réaction produite au moment du mélange d'argile avec la chaux vive provoque la déshydratation et assèche le sol. Cette action provoque la dissolution de la silice et de l'alumine des minéraux argileux [37]. La dissolution de l'hydroxyde de calcium est illustrée par la relation 1.7.



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

L'échange cationique peut supporter des changements importants [56] :

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

1.7.4.2.2. La flocculation et l'agglomération

La flocculation est un processus physico-chimique par lequel l'argile en état granulaire se transforme en granulat de taille plus importante. C'est l'agglomération de l'argile.

« La flocculation et l'agglomération sont attribuées à un contenu élevé en électrolyte, à un pH élevé et à la réduction d'épaisseur entre couches d'argiles par échange cationique. Comme l'échange cationique, la flocculation et l'agglomération sont relativement rapides avec des changements significatifs qui ont lieu en quelques heures [59] ». Le résultat des deux premières réactions (échange cationique et flocculation/agglomération) se reflète par changement de la relation entre l'humidité et la masse volumique du matériau. Par ailleurs, l'argile stabilisée par la chaux change des propriétés physiques. Ce matériau composite présente une masse volumique inférieure au matériau non traité. De même la quantité de chaux dans le mélange fait

augmenter la teneur en eau [58, 60]. Pour illustration, la figure 1-25 montre le mouvement de la courbe Proctor d'un sol stabilisé avec 4% de chaux.

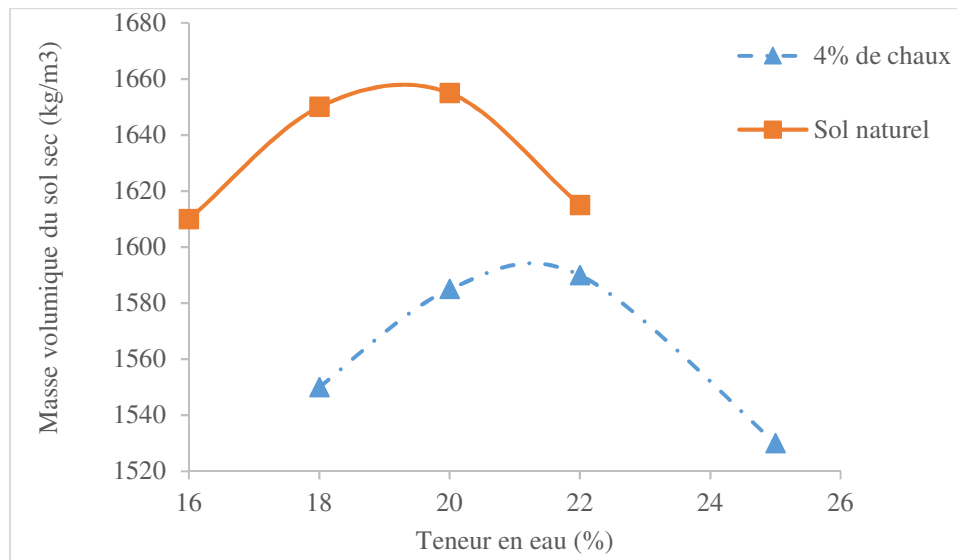


Figure 1-25 : Déplacement de la courbe Proctor suite à une stabilisation à la chaux [58]

1.7.4.2.3. La carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques

La stabilisation des matériaux est rendue possible grâce à la « carbonatation de la chaux et les réactions pouzzolaniques ». La réaction de la chaux avec le CO_2 de l'atmosphère produit de carbonate de calcium [54]. Ce dernier augmente le pH du sol. De même que, la réactivité et la solubilité de l'alumine et de la silice se trouvant dans l'argile. La combinaison des ions de calcium, de la silice et de l'alumine constitue « des agents de cimentations (équation 1.8 et 1.9) » [60]. « Ces produits sont donc des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) » [54]



Pour atteindre la résistance finale, des réactions pouzzolaniques s'effectuent lentement sur une longue période (des mois ou même des années). Pendant cette phase, la terre stabilisée perd sa plasticité, mais sa résistance en cisaillement augmente. Il faut au minimum 20% d'argile ou un taux de 35% d'un mélange d'argile et de silt (limon) pour que les réactions pouzzolaniques se produisent [61]. Dans le cas où les différents taux (20% d'argile ou 35% d'argile + silt) ne sont pas atteints, le matériau stabilisé aura de manquement en silice et en alumine pour poursuivre les réactions pouzzolaniques.

1.7.4.3. Efficacité et dosage

La performance d'une stabilisation de la terre par la chaux n'est pas facile à prévoir. Elle dépend de plusieurs paramètres, qui sont : « la minéralogie de l'argile, la présence des matières organiques, la granulométrie du matériau, le pH de la terre...etc. » [55, 58, 62]. Le matériau change de comportement par la diminution de la plasticité avec l'incorporation d'un minimum de 2 à 3% de chaux.

Souvent un taux de 6% à 12% de chaux est suffisant pour la stabilisation des matériaux de construction. Cependant, il faut signaler qu'un dosage optimum en chaux est utilisé « pour chaque type de sol » [1]. Un arrangement de l'argile est proposé « du plus favorable au moins favorable dans l'ordre : kaolinite, > Illite, > smectite » en se basant sur les aspects mécaniques, physiques et chimiques des éprouvettes d'argile stabilisées par la chaux.

1.7.4.4. Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé

Les caractéristiques mécaniques d'un sol stabilisé à la chaux augmentent considérablement [21, 29]. Des études sont menées sur la stabilisation de la terre des zones arides d'Australie par la chaux. Les sols stabilisés sont : un loam sableux (59% de sable, 28% de limon et 13% d'argile). Une teneur de 2% de chaux a donné au loam sableux et argileux une résistance d'environ 0,7 MPa à 7 jours. A 4% de chaux, la résistance en compression est de l'ordre de 1,2 à 1,3 MPa (figure 1-26). Par contre, des taux de chaux au-delà de 12% n'ont pas donné satisfaction sur la résistance mécanique des éprouvettes. Millogo [63] ont trouvé également des résultats similaires sur des briques de terre moulées (adobe) (figure 1-27).

Un taux élevé de chaux ne donne pas nécessairement des résistances initiales élevées [33]. La figure 1-28 montre que la résistance à la compression à 7 jours est modeste. C'est à partir de 28^e jours que la résistance devient significative.

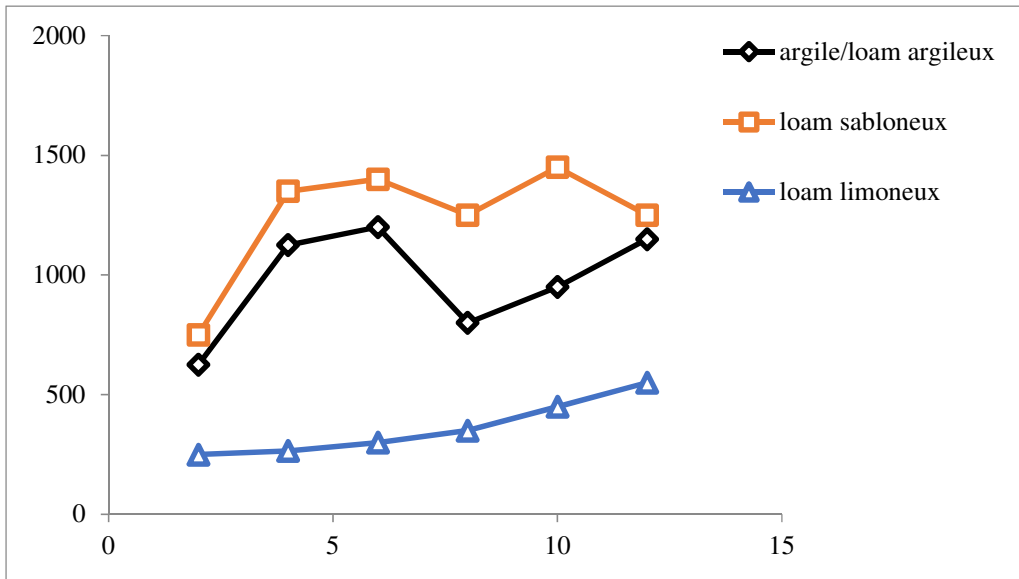


Figure 1-26 : Allure de la résistance à la compression par rapport à la teneur de chaux pour 3 types de sols australienne [21]

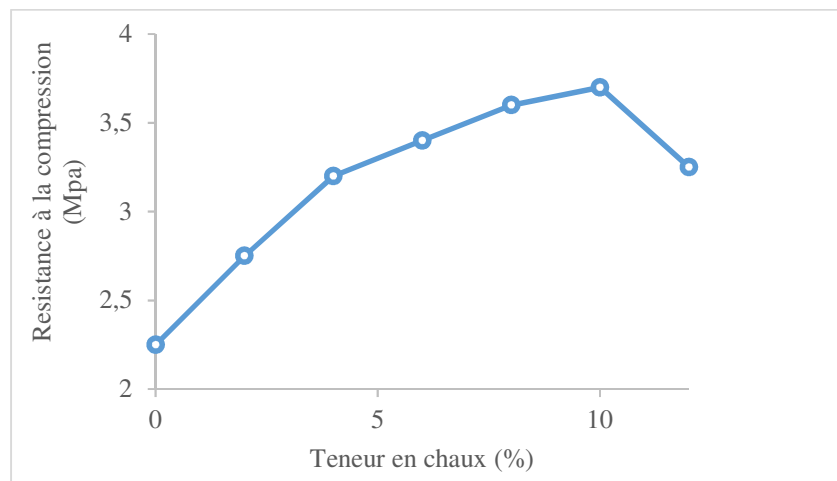


Figure 1-27 : La résistance à la compression d'adobe en fonction de la teneur en chaux [63]

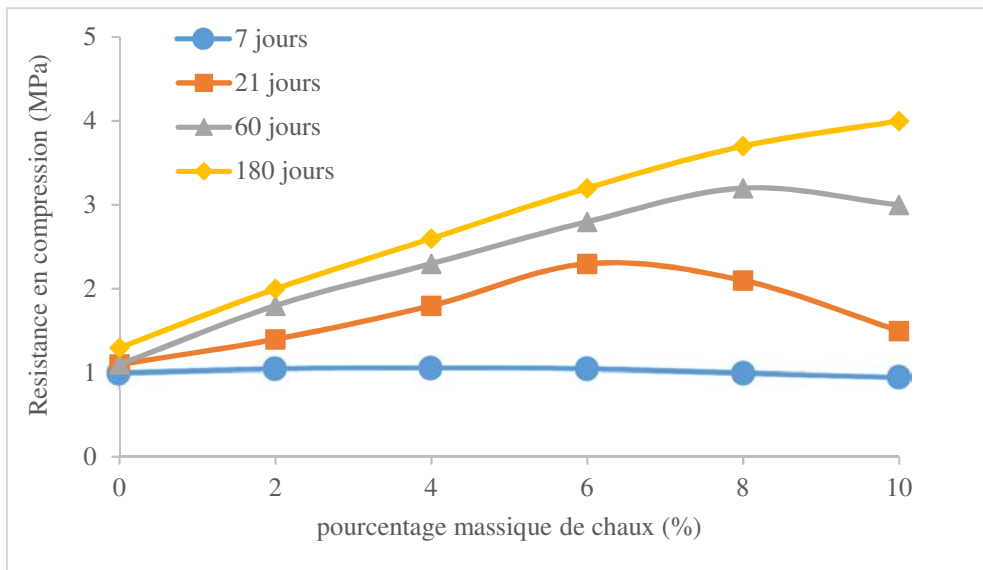


Figure 1-28 : La résistance à la compression des matériaux en fonction de l'âge de teneur en chaux [33]

Pour examiner la durabilité d'un sol stabilisé par de la chaux, la croissance de la résistance en compression sur le mélange sec et humide est observée par Guettala [40]. Par exemple la résistance à l'état sec est très intéressante avec des faibles teneurs en chaux. Entre 5 à 8 % de chaux, la résistance à la compression augmente de 54%. Par la suite, elle évolue modestement de l'ordre de 18 % pour un taux de 8% et 12 % avec une pression de compactage de 10 MPa (figure 1-29).

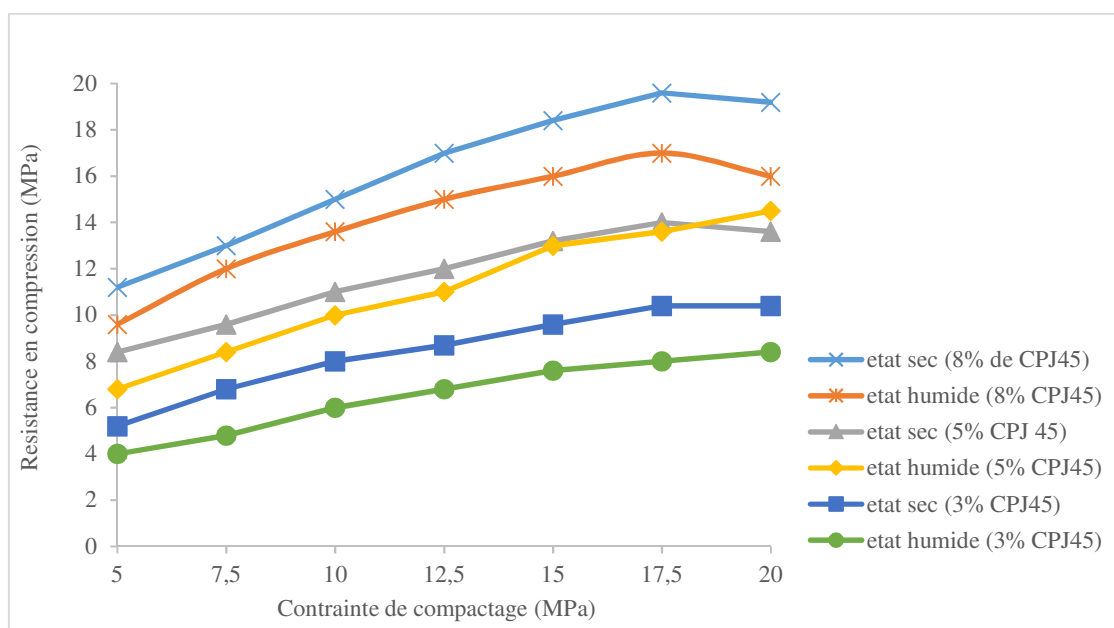


Figure 1-29 : La force de compactage et le pourcentage en chaux sur les résistances mécaniques [40]

1.7.5. Stabilisation mixte chaux-ciment

Le traitement des sols humides et plastiques convient mieux avec un produit mixte (chaux-ciment). A cet effet, la chaux est utilisée en premier lieu à faible teneur dans le mélange et ensuite le ciment est ajouté. L'ajout de chaux à l'argile provoque l'assèchement du sol trop humide. Le complément de ciment dans le mélange permet d'apporter une grande résistance dès les premiers jours de traitement. Les deux liants minéraux sont complémentaires. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment s'ajoutent à ceux provenant du ciment dissout [40].

Les travaux de Tesoriere *et al.*, [64] rapporté par Guettala [40] relatifs à la caractérisation mécanique des matériaux limoneux très plastiques, stabilisées par un liant mixte chaux-ciment. La résistance à la compression évolue comme suit :

- Pour une consolidation du sol par le ciment, la résistance finale est atteinte en une seule phase pendant un temps donné.
- Pour le cas de la stabilisation avec de la chaux, la maturation de la résistance s'effectue en deux phases. Dans un premier temps, c'est la phase d'évolution des paramètres chimiques et physiques qui se produisent à 25 °C. A partir de la deuxième phase de consolidation, la résistance évolue progressivement pour atteindre des valeurs théoriques maximum supérieures par rapport aux matériaux stabilisés par de ciment.

Pour le traitement mixte chaux-ciment, la résistance finale est atteinte en plusieurs phases comme pour le cas de la chaux. Pour un début, la stabilisation avec un liant mixte donne des résultats supérieurs aux matériaux stabilisés uniquement par la chaux ou le ciment. Un dosage en chaux est suffisant pour corriger la plasticité du sol mais il donne des résultats mécaniques limités comme pour le cas des sols stabilisés par le ciment. Par ailleurs, pour des dosages élevés en chaux, l'évolution de la résistance continue pendant une période assez longue. En utilisant un dosage faible en chaux, avec un écart de trois heures d'additions des liants, les résistances mécaniques évoluent à court et à long terme.

1.7.6. Stabilisation par les fibres

Dans le monde entier, le renforcement des matériaux de construction par les fibres date de très longtemps. Les fibres sont utilisées dans les matériaux de construction possédant une forte plasticité pour corriger le retrait et les fissures. Les villageois ont utilisé le mélange d'argile-paille pour fabriquer des briques de terre moulée (l'adobe). Cette technique de renforcement est

utilisée également dans la construction en torchis, en terre paille, en bauge, en pisé et en BTC [1]. Les fibres synthétiques sont utilisées généralement dans le sol pour améliorer leurs résistances mécaniques telles que la compression et le cisaillement [65, 66].

Les industries sont revenues à la valorisation des fibres végétales au début de XXI^{ème} siècle. Les gouvernements ont encouragé cet investissement à cause de leurs qualités environnementales, des couts élevés et de la rareté des ressources pétrolières.

Nous allons passer en revue les principales fibres utilisées comme renfort dans les matériaux de construction.

Les fibres sont caractérisées par une longueur et un diamètre. La longueur fait trois fois son diamètre. Plusieurs variétés de fibres utilisées sont employées dans la construction. Elles sont identifiées par leurs origines (naturelle ou fabriquées), leurs formes (droites, ondulée, aiguille), leurs dimensions (macro ou microfibre) et également par leurs différentes propriétés. Toutefois, les fibres seront choisies en fonction de leur utilisation et surtout la compatibilité avec la matrice.

1.7.6.1. Différents types de fibres

Les différents types des fibres utilisées dans la construction sont classés par familles et illustrés par la (figure 1-30) [67].

1.7.6.1.1. Les fibres naturelles

Elles sont réparties en trois groupes selon leurs origines.

Les fibres végétales : leur utilisation dans la construction présente deux avantages. Elles sont disponibles et obtenues à faibles coût. Elles procurent également des revenus aux agriculteurs. D'autre part, elles permettent la réduction des impacts environnementaux. Ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, sans émission de CO₂ et qui ne demandent pas trop d'énergie pour ça production. Elles comprennent :

- Des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok)
- Des fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie)
- Des fibres provenant des feuilles (sisal), des troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;

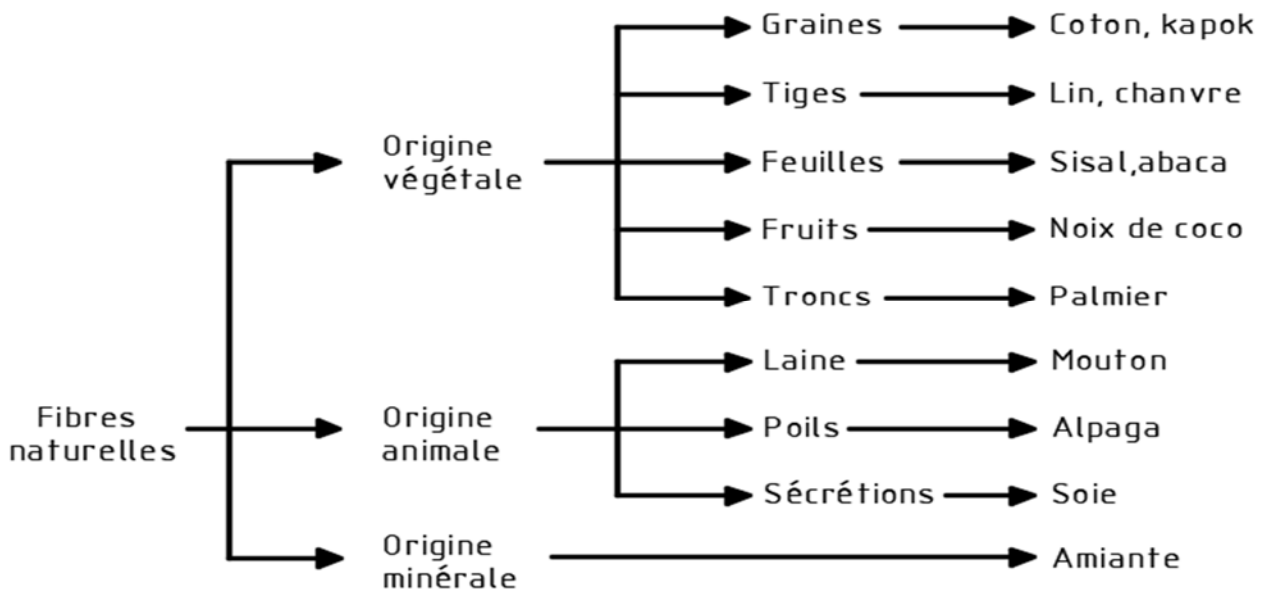


Figure 1-30 : Classification des fibres naturelles en fonctions de leur origine [67]

Les fibres animales ont pour origine :

- « Les poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire » ;
- « Les sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée »;

« **Les fibres minérales** : L'amiante est la seule fibre minérale naturelle ». Elle a été employée dans plusieurs domaines à cause de ses qualités de résistance à la chaleur, au feu, aux agressions chimiques et électriques et pour son pouvoir absorbant. Cette fibre a été interdite progressivement à cause des risques cancérigènes qu'elle présente.

1.7.6.1.2. Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des substances ou composés fournis par l'industrie pétrochimiques. Elles sont découvertes au 20^e siècle après la réussite de la fibre de « Viscose ». Depuis ce jour, plusieurs fibres synthétiques ont été fabriquées. Leurs propriétés correspondent à des applications particulières. Comme les fibres artificielles, les fibres synthétiques sont obtenues par filage. Elles sont utilisées dans différentes industries à cause de leur faible coût, de leurs disponibilités et aussi leur indépendance de saisons. Par ailleurs, l'utilisation des fibres synthétiques est critiquée à cause de leur comportement environnemental soit au moment de sa fabrication, ou pendant leurs utilisations et également pour son recyclage difficile. Les principaux types de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;
- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfinés : les polyéthylènes et les polypropylènes sont beaucoup évolués et leurs productions sont estimées à 8% de toutes les fibres synthétiques.

1.7.6.1.3. Les fibres artificielles

Ces fibres sont utilisées aussi bien dans l'industrie que dans le génie civil. Il s'agit des fibres de verre, de carbone, d'acier et d'autres. Elles représentent aujourd'hui un taux élevé dans l'industrie de la construction.

1.7.6.2. Caractéristiques essentielles des fibres lignocellulosiques

1.7.6.2.1. Les constituants chimiques de la biomasse

Dans les fibres lignocellulosiques, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont des polymères majoritaires. Il existe également d'autres, tels que les protéines, les pectines, l'amidon et les sels minéraux en faible pourcentage [68]. Les constituants chimiques des fibres dépendent de leur origine, toutefois la cellulose est majoritaire avec des pourcentages allant de 22% pour les fibres provenant de sabai à 85 % pour les linters de coton (tableau 1-2). Les teneurs massiques en lignine varient de 7 à 24 % et celles des hémicelluloses de 12 à 27 %. Ces composés sont des hétéropolymères très variables dans sa composition chimique en fonction de leur origine. Les sels minéraux ou cendres varient aussi en fonction de leurs origines et de la nature des fibres. En effet, cette valeur représente 1% massiques pour les fibres lignocellulosiques de bois et environ 14% pour les pailles de riz [69].

La cellulose est un polymère de glycose constitué de chaîne linéaire qui représente l'un des constituants principaux de la paroi végétale (voir figure 1-31). Elle est responsable de la majorité des résistances mécaniques dans les végétaux sans tissus secondaires, à cause de sa structure cristalline et de son arrangement ordonné. Le taux de cellulose ne cesse de croître dans le temps. Ce qui fait qu'une plante jeune est fragile mécaniquement parce qu'elle ne possède pas suffisamment de cellulose [70]. Par sa cristallinité élevée la cellulose devient insoluble dans la plupart des solvants notamment dans l'eau bien qu'elle reste très hydrophile. Néanmoins, si la structure cristalline de la cellulose est modifiée, pour passer de la cellulose I très cristalline à la cellulose II amorphe, les résistances mécaniques sont dégradées [71].

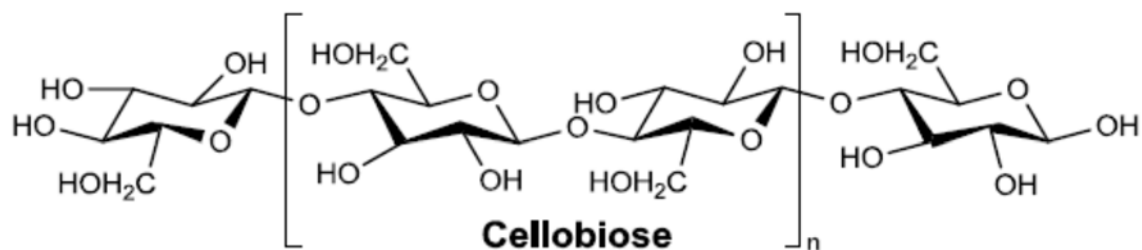


Figure 1-31 : Structure de la cellulose [72]

Tableau 1-2 : composition chimique de quelques fibres naturelles [73, 74]

Type de fibres	Cellulose (%)	Hémicelluloses (%)	Lignine (%)	Autres (%)
Fibres de pailles :				
Riz	28-36	-	12-16	-
Blé	29-35	27	16-21	11-23
Fibres de cannes à :				
Sucre	32-44	22	19-24	26-8
Bambou	26-43	15	9-35	9-35
Fibres d'herbes :				
Alfa (esparto)	33-38	-	17-19	-
Sabai	22	-	23,9	-
Fibres periliberiennes :				
Lin	43-47	16	21-23	13-20
Kénaif	31-39	19	15-19	23-35
Jute	45-53	15	21-26	5-11
Fibres de feuilles :				
Abaca (Memile)	60,8	20	8,8	10
Sisal (agave)	43-56	12	7-9	23-38
Fibres de graines :				
Linters de coton	80-85	-	-	-

Les lignines sont des polymères très hydrophobes et se présente en des composés tridimensionnels. Elles possèdent des structures complexes qui varient en fonction de l'espèce mais aussi de leurs éléments morphologiques (fibres, vaisseaux...). La lignine apporte aux végétaux qui en possèdent la rigidité et l'imperméabilité. En plus, elles participent à la cohésion des fibres dans les parties boisées lignocellulosiques du xylème et fourni une importante résistance en compression (figure 1-32).

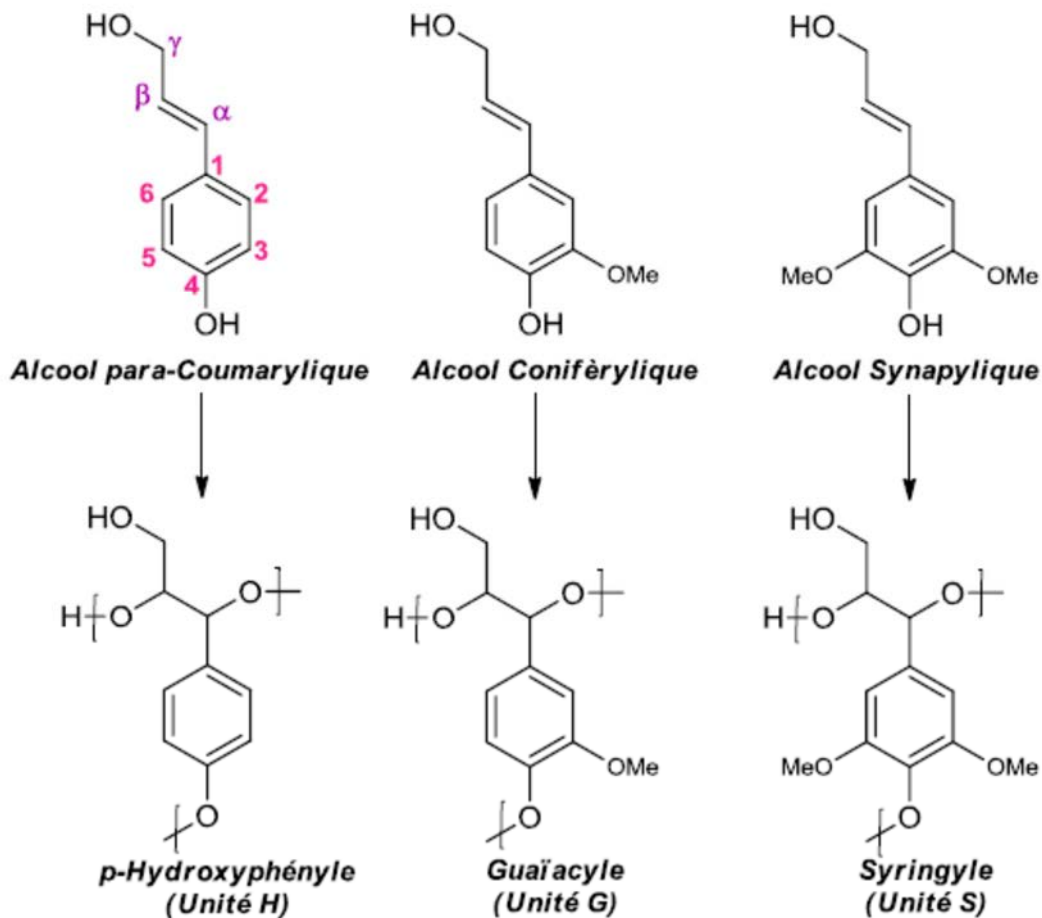


Figure 1-32 : Unité de base de la lignine [72].

L'hémicellulose est l'une des composantes du bois. Elle est la deuxième la plus importante chez les végétaux après la cellulose. L'hémicellulose est un polysaccharide branché et elle possède une structure amorphe (figure 1-33). L'hémicellulose a un caractère hydrophile et elle se gonfle en contact de l'eau. Cependant elle est soluble dans l'eau et peuvent être extraites du bois à partir d'une trempe alcaline notamment.

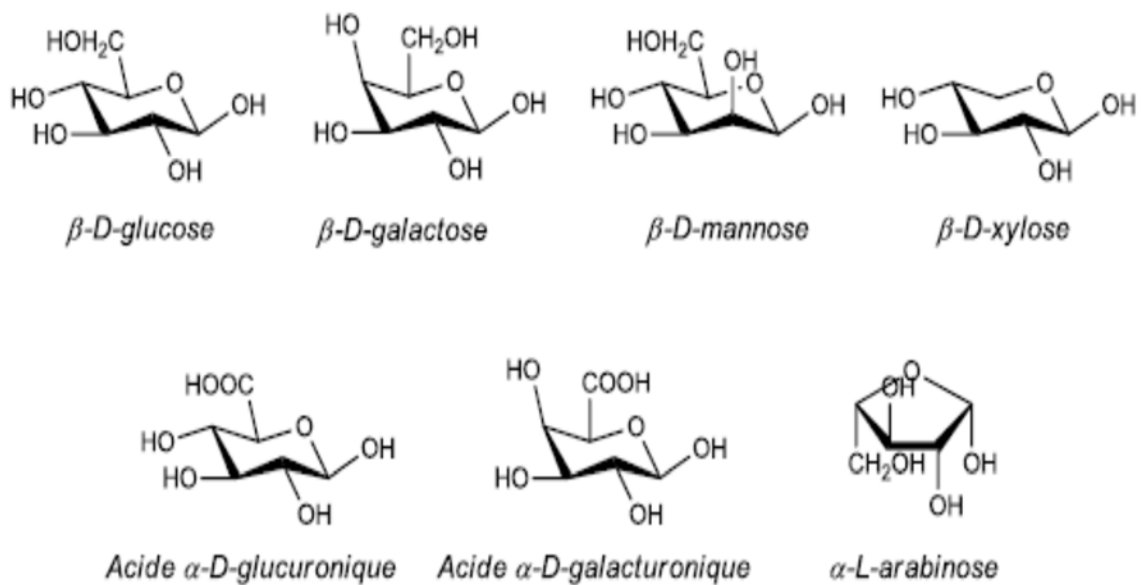


Figure 1-33 : Monomères des hémicelluloses du bois [72]

Les pectines sont des polysaccharides acides. Elles se trouvent en quantités importantes dans la lamelle mitoyenne et elles apportent la cohésion aux cellules. Comme les hémicelluloses les pectines aussi varient en fonction d'espèce végétale et elle se fait très complexe à appréhender [75]

1.7.6.2.2. Propriétés des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales

Avec les problèmes environnementaux qui deviennent de plus en plus soucieux, le choix des matériaux de construction joue un rôle non négligeable pour la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, l'utilisation de matériaux composites renforcés par la paille de culture répond à un problème économique par leur disponibilité et à leur faible impact environnemental [76]. Leurs productions et utilisations consomment moins d'énergie grise par rapport aux autres matériaux de construction, (voir la figure 1-34).

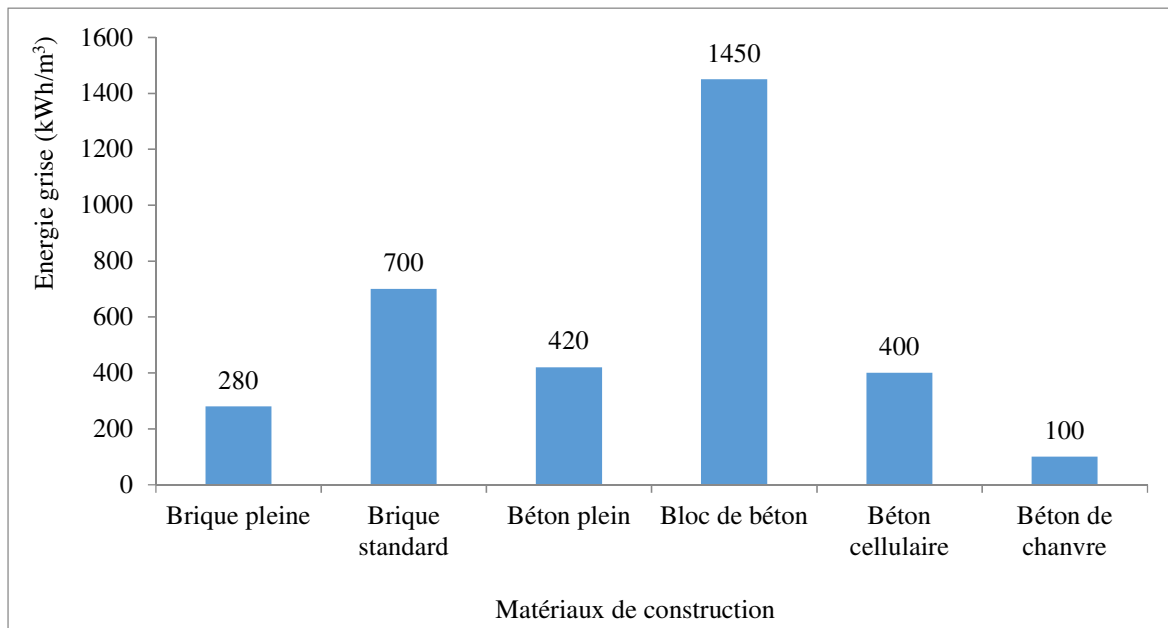


Figure 1-34 : Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment [76]

Les composites cimentaires renforcées par des fibres végétales brutes affichent un comportement mécanique différent. Par contre un composite cimentaire non renforcé présente un comportement élastique linéaire fragile. Des éprouvettes renforcées par des fibres et caractérisées en flexion « trois points » résistent même au-delà de la charge maximale et continue à supporter une charge significative dans la partie post-pic [77]. Ce comportement est illustré par (la figure 1-35). Pour mettre en évidence la manière de se comporter entre une matrice pure et la même matrice renforcée de 16% en volume de chanvre.

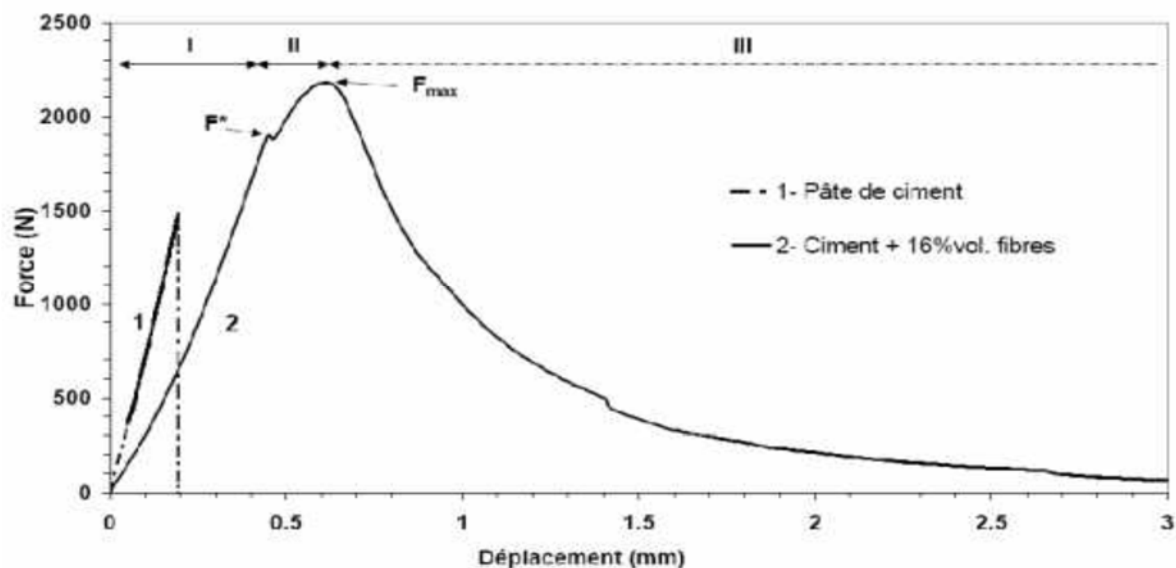


Figure 1-35 : Comportement d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un mélange ciment/fibre de chanvre (2) en flexion 03 points [78]

L'auteur (Sedan [79]) explique les trois différentes parties de la courbe:

- Partie I : la courbe est linéaire. Elle est presque identique à celle de la pâte de ciment seul. Jusqu'à là, le composite supporte presque la totalité des efforts ;
- Partie II : à partir de la force F^* la première fissure apparaît sur le composite et les fibres reprennent les charges. Selon l'auteur, la progression de la fissure est stoppée par un effet de couture ;
- Partie III : en dépassant la force F_{max} , contrairement à la rupture brutale de la pâte de ciment seul, la matrice fibrée assiste à une rupture contrôlée. L'auteur associe à cette phase une rupture progressive des interfaces fibres/matrices suivie d'un déchaussement des fibres.

La présence des fibres végétales ne contribue pas trop pendant l'apparition de la première fissure, qui dépend généralement aux propriétés de composite. Une fois que la fissure est apparue, les fibres limitent son évolution [77].

La présence des fibres dans la matrice cimentaire conduit à une rupture contrôlée (non brutale). Néanmoins ce comportement ne cautionne pas forcément la résistance en flexion [79]. La contribution des fibres dans le composite vient de sa ténacité qui procure aux matériaux la latitude d'amortir une certaine quantité d'énergie avant la rupture [80].

1.7.6.2.3. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols

La stabilisation de la terre par les fibres est utilisée depuis très longtemps. Les anciennes civilisations telles que les Mésopotamiens et les Romains ont découvert séparément que des pistes de circulation seront stabilisées en incorporant dans le sol de calcaire ou de calcium sous forme de poudre.

Dans la nature les arbres ont stabilisé le sol. Les racines de ces derniers pénètrent dans le sol et s'orientent de façon aléatoire pour améliorer sa résistance et stabiliser des pentes naturelles [81]. Par ailleurs, la technique de stabilisation de sol par des fibres a été découverte il y a de cela 5000 ans. Par exemple, dans l'histoire de la construction, les premiers hommes mélangent la terre avec de la paille pour fabriquer des blocs de terres renforcés [82]. Des nombreux exemples ont existé, comme le cas de la grande muraille de Chine. Pour cet ouvrage, des branches d'arbres ont servi comme renfort pour améliorer sa résistance en traction [83].

Dans le temps moderne de la stabilisation, Vidal [84] a développé la stabilisation des sols par des fibres. Il a prouvé que le renforcement de la terre par des fibres améliore sa résistance au

cisaillement. Depuis ce jour, environ 4000 constructions avec des matériaux stabilisés ont été réalisées dans 37 pays [85].

Beaucoup des travaux sont menés sur la stabilisation de la terre par des fibres. Dans la suite, un état de l'art sera préparé sur les renforcement des matériaux de construction par les fibres.

1.7.6.2.4. Fibres brutes de palmier dattier

Les fibres de palmier dattier décomposés ne fournissent pas des bonnes résistances mécaniques. Par conséquent, ces fibres présentent une absorption d'eau très élevée [86].

Des travaux menés par Marandi *et al* [87] sur des sols renforcés par des fibres de palmier dattier et non renforcés, pour déterminer la résistance à la compression non confiné et l'indice de portance Californien. Ils ont remarqué que les résistances maximum et résiduelles sont augmentées avec la même longueur et l'augmentation de taux de fibre de 0% à 1%. Par contre l'écart qui existe entre les résistances maximum et résiduelles a diminué (figure 1-36). Les mêmes comportements ont été observés dans le cas de l'augmentation de la longueur des fibres de palmier dattier de 20 mm à 40 mm pour un taux de fibre constants [87].

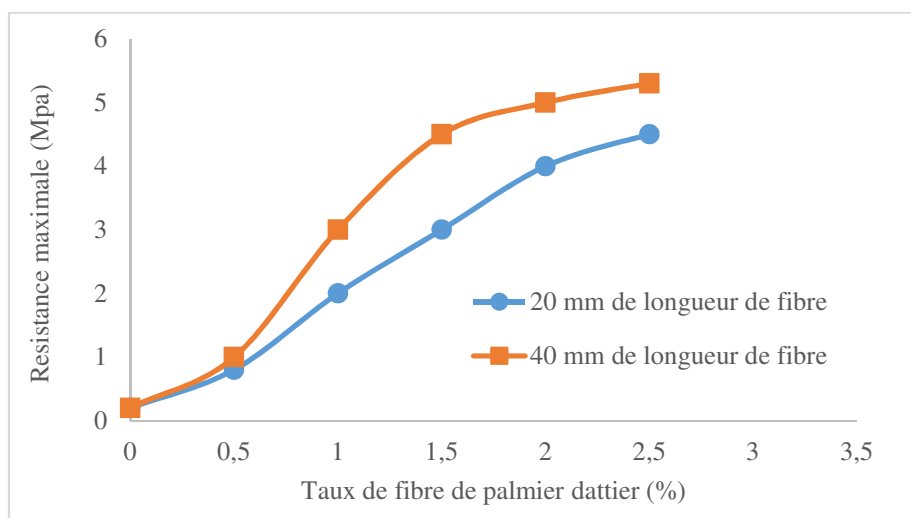


Figure 1-36 : Influence de taux de fibre de palmier dattier sur la résistance à la compression [87]

1.7.6.2.5. Les fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène ont servi de stabilisants dans le sol et sont caractérisées au laboratoire [88]. Beaucoup de travaux de stabilisation de sol par des fibres de polypropylène sont menés pour améliorer leurs caractéristiques afin de réduire le retrait et contourner les problèmes de dégradation chimique et biologiques [89]. Dans les travaux de Puppala et

Musenda [90] relatifs à la stabilisation des sols par des fibres de polypropylène ont montré que le renfort améliore la résistance à la compression non confinée du sol et réduit le gonflement et le retrait des sols actifs [90].

Tang et al [88] ont prouvé à travers des essais que le renforcement du sol par des fibres avec ou sans ciment a amélioré la résistance à la compression non confinée (figure 1-37). Ce renforcement a augmenté également la résistance au cisaillement et la déformation axiale de rupture, une diminution de la rigidité et la perte de résistance post-pic. Ces auteurs ont observé également un changement du mauvais comportement du sol stabilisé par le ciment par un autre plus ductile.

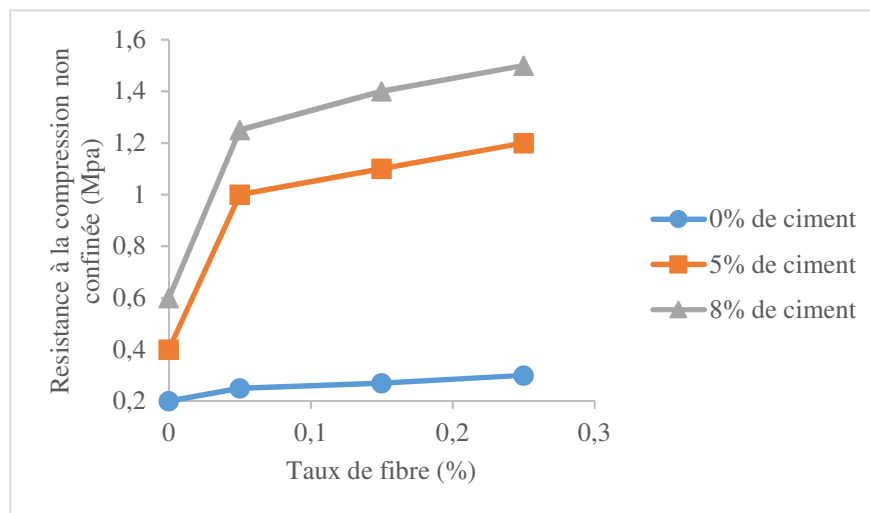


Figure 1-37 : Influence des teneurs en fibre des échantillons écrasés en compression non confinée [88]

Cai *et al* [91] ont travaillé sur les renforcements de sol par des fibres de polypropylène. Ils ont utilisé un grand nombre de sols stabilisés et non stabilisés pour caractériser en compression simple et au cisaillement direct. En plus, le gonflement et le retrait ont également été étudiés. Ils ont conclu finalement que l'augmentation de taux de fibres a favorisé la résistance à la

compression et la ductilité des matériaux. De même, le retrait et le gonflement ont diminué (figure 1-38).

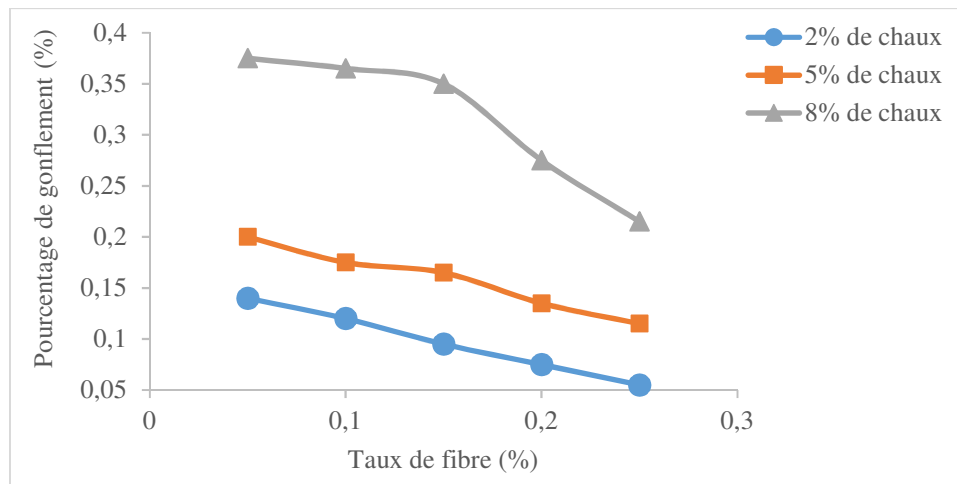


Figure 1-38 : Impactes de taux de fibre de polypropylène sur le gonflement des échantillons en terre stabilisée à la chaux après 7 jours de séchage [91]

1.7.6.2.6. Propriétés des adobes renforcés par des fibres naturelles

La stabilisation des produits de la terre telle que l'adobe par les fibres naturelles a été utilisée depuis très longtemps [92]. Ces fibres jouent plusieurs rôles. D'une part, elles améliorent la résistance en traction. Pour une terre non stabilisée la résistance en flexion est faible. Par contre, si elle est renforcée, la terre subit des déformations importantes sans se rompre. Les fibres sont réparties dans tout le volume du matériau et empêchent les fissures au séchage. Par conséquent le volume qu'elles occupent dans le matériau permet de diminuer sa densité et améliore ses qualités isothermiques [6].

Des recherches sont menées sur l'adobe en utilisant plusieurs types de fibres végétales et les résultats étaient contradictoires.

Des études menées par Ghavami *et al* [93] sur des sols non renforcés et parfois renforcés avec de sisal et aussi avec de noix de coco. Il remarque que la rupture des sols non renforcés est rapide et brutal. Par contre pour le sol renforcé, il résiste au-delà de la charge de rupture. Selon les auteurs, cette résistance est due au transfert des forces internes de la matrice vers les fibres de renforcement (Figure 1-39).

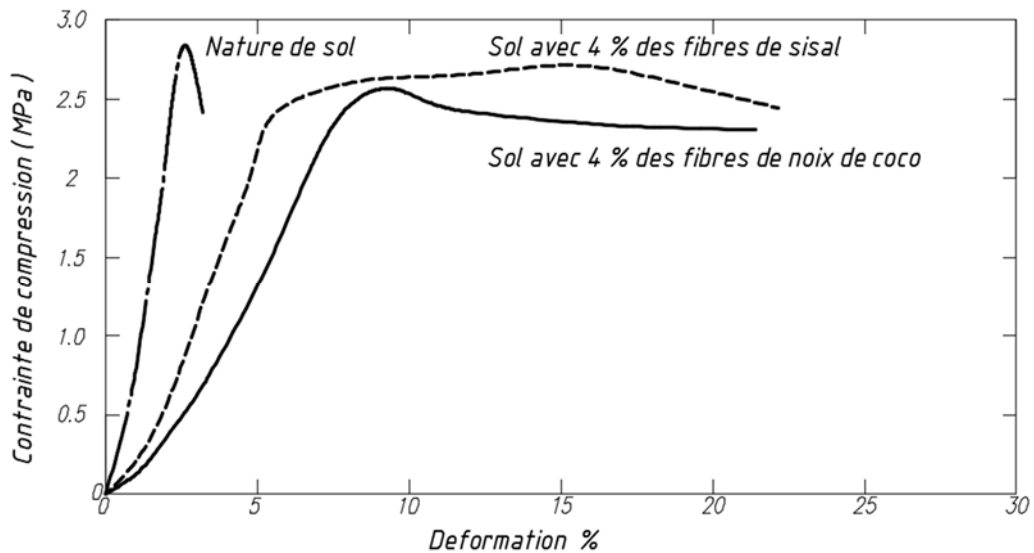


Figure 1-39 : Influence de 4% de fibre sur la relation contrainte-déformation du sol) [93]

Yetgin *et al* [94] ont travaillé sur cinq types différents de sols stabilisés par la paille. Les résultats montrent que la résistance baisse avec l'augmentation des fibres de pailles.

1.7.6.2.7. Propriétés de bloc de terre comprimés renforcés par des fibres

Le faible coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques motive beaucoup plus son utilisation comme matériau de construction [95]. Par contre, l'utilisation des fibres naturelles devient un défi aux chercheurs et aux professionnels pour optimiser leurs utilisations dans la construction [96].

L'industrie des fibres naturelles doit faire des efforts pour relever les défis afin de faciliter leur utilisation dans la construction. Les défis particuliers des scientifiques sont l'adhérence fibre/matrice, la faible résistance, leurs caractères hydrophiles, le problème de stockage sur des longues périodes, leur sensibilité à l'humidité etc... [14].

La conversion des fibres végétales dans la construction est beaucoup plus avantageuse à la population locale. Pour son obtention à faible coût, son abondance et sa faible consommation d'énergie lors de sa production peuvent réduire les impacts environnementaux [97, 98, 99, 100, 101, 102].

1.7.6.2.8. Influence des fibres sur les résistances mécaniques

Des travaux de recherches menés sur le BTC ont montré que l'incorporation des fibres naturelles réduit la taille des fissures provenant des retraits et améliore la durabilité et la résistance à la traction [103, 104, 105].

Millogo [102] a travaillé sur la stabilisation des sols latéritiques par des fibres d'hibiscus cannabinus (kénaf) pour fabriquer des blocs de terre compressé sans stabilisant chimique. Ces BTC ont été renforcés par des fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et de longueur de 30 mm et 60 mm de fibre. Il trouve que la présence des fibres améliore les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs (figures 1-40 et 1-41).

Ces auteurs ont justifié l'amélioration de la résistance et la réduction des fissures par la présence des fibres dans le composite. Ils ajoutent que la présence des fibres est bénéfique pour l'amélioration de la résistance à la flexion aussi, à cause de leur résistance à la traction élevée et de leur bonne adhérence à la matrice d'argile.

Verglas *et al* [106] ont remarqué sur la résistance sismique de la maçonnerie par l'utilisation de 0,5 % à 8 % en poids et une longueur de 100 mm ont donné des bons résultats en compression. Ils ajoutent que cette bonne résistance est due à l'action de couture de l'interface BTC-mortier des fibres des pailles ce qui limite l'apparition des microfissures produites par les retraits de séchage.

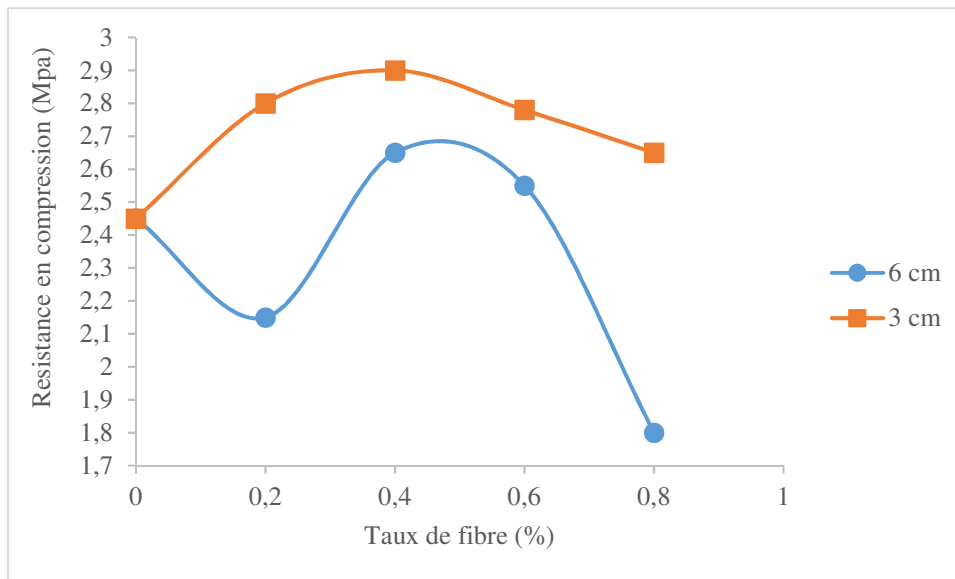


Figure 1-40 : Influence du taux et de la longueur des fibres sur la résistance à la compression [102]

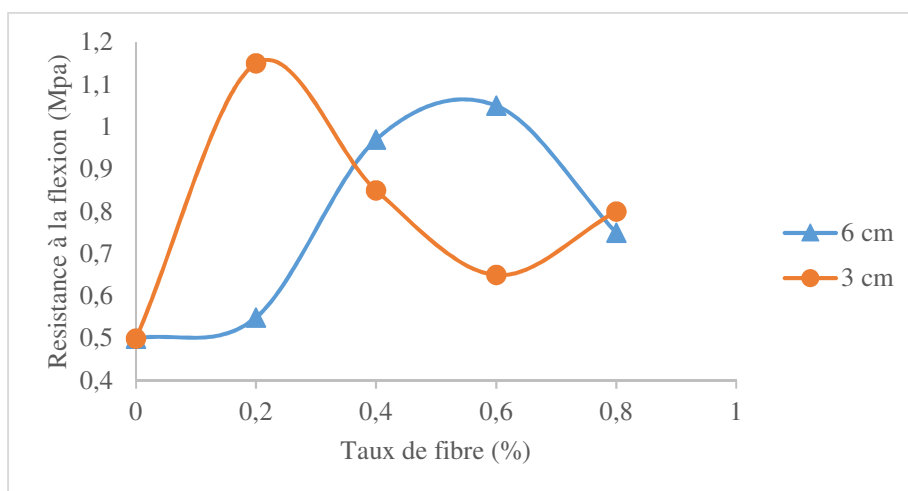


Figure 1-41 : Influence du taux et de la longueur des fibres sur la résistance à la flexion [102]

Namango [107] a observé une nette croissance de la résistance à la compression et à la flexion, à partir d'un certain taux de fibres de sisal, de poudre de manioc et une certaine en ciment. En dehors de cette limite les fibres de sisal donnent des résultats défavorables sur la résistance des BTC [107] (figure 1-42 et 1-43). L'utilisation des fibres telles que les poils d'animaux ou humains, coco, sisal, agave, le bambou et la paille permet de réduire le retrait. Il y a une réduction de la teneur d'argile et la quantité d'eau sera absorbée par les fibres [108]. Dans le même ordre d'idée, l'incorporation de pelure de manioc a augmenté la résistance à sec du mélange [109].

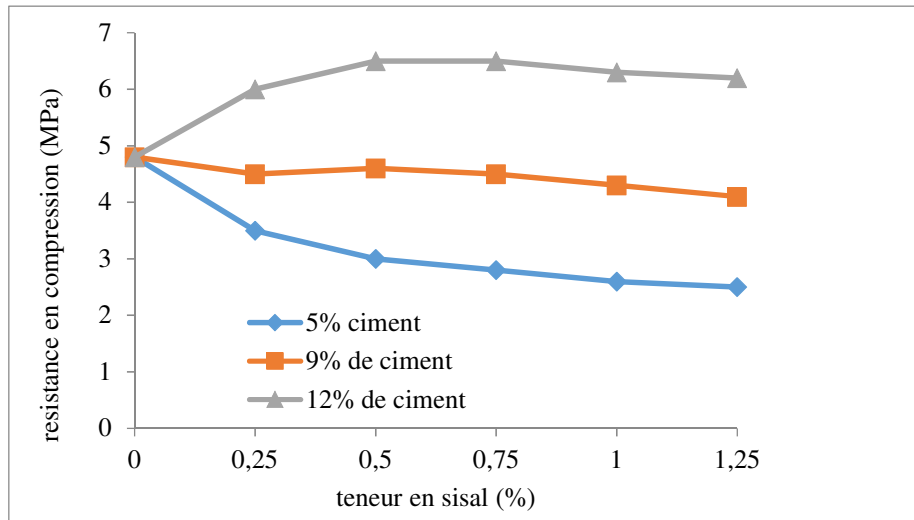


Figure 1-42 : Influence de taux de fibre de sisal sur la résistance à la compression [107]

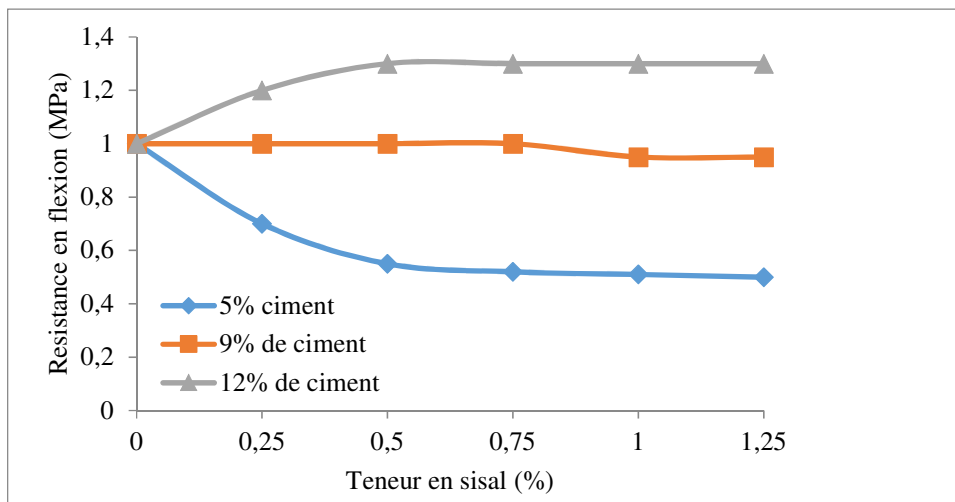


Figure 1-43 :Influence de taux de fibre de sisal sur la résistance à la flexion [107]

Khedari *et al* [110] ont travaillé sur des briques à base de latérite compressée et stabilisée par des fibres de coco. Ils trouvent des faibles résultats en compression. Les auteurs ont justifié cette faible valeur de résistance par l'effet de dimension, des conditions de surface et le nombre des fibres présents dans un volume donné. A partir de ce constat on peut dire que l'augmentation des fibres de coco conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, ce qui influence la chute de la résistance en compression (figure 1-44).

Olivier et El Gharbi [111] ont travaillé sur des blocs de terre stabilisée avec des fibres de sisal. Ils ont montré que le point faible se trouve à l'interface entre le mortier de terre et bloc de terre. Les auteurs ont tenté d'améliorer l'interface en renforçant les blocs de terre comprimée par les

fibres de sisal ainsi que le mortier de terre. Ils ont également évalué la contribution de l'utilisation du sisal [111].

(Savastano Jr *et al*) [112] ont travaillé sur des résidus de sisal, de bananier et d'eucalyptus comme renfort dans des composites cimentaires. Ces composites ont donné une performance acceptable. (Kriker. A *et al*) [79] ont utilisé quatre types de fibres de palmier dattier dans une matrice cimentaire. Ils ont constaté que l'augmentation des longueurs et les pourcentages des fibres améliorent la résistance à la flexion et la dureté du composite mais diminuent les résistances à la compression.

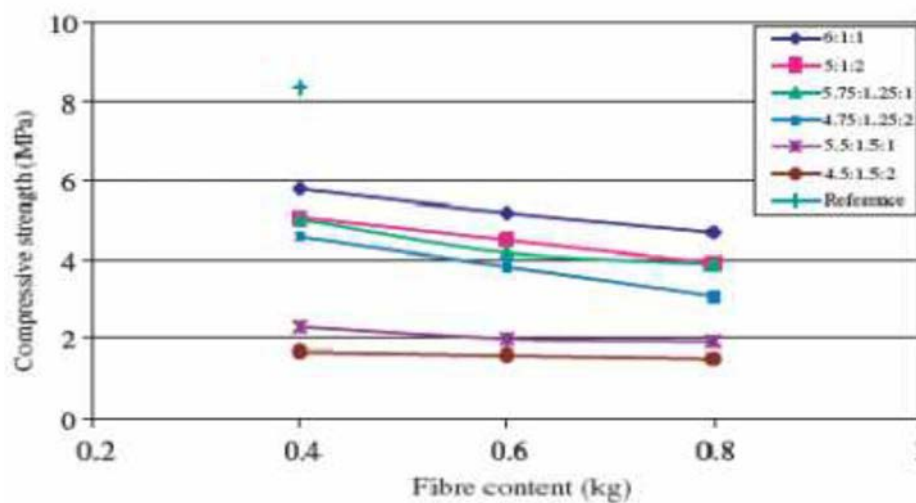


Figure 1-44 : Impact de taux de fibres sur la résistance à la compression [79]

Des travaux scientifiques sont menés sur les renforcements de sol par de ciment et des fibres végétales de bagasses de canne à sucre. Le taux de ciment est de 5 à 10 % massique et 5 à 15 % en volume de fibre de bagasse. Les résultats montrent qu'il y a une amélioration de la résistance à la compression non confinée à 28 jours avec l'augmentation de taux de ciment. Néanmoins, l'augmentation des fibres provoque une chute considérable de la résistance à la compression [113] (figure 1-45).

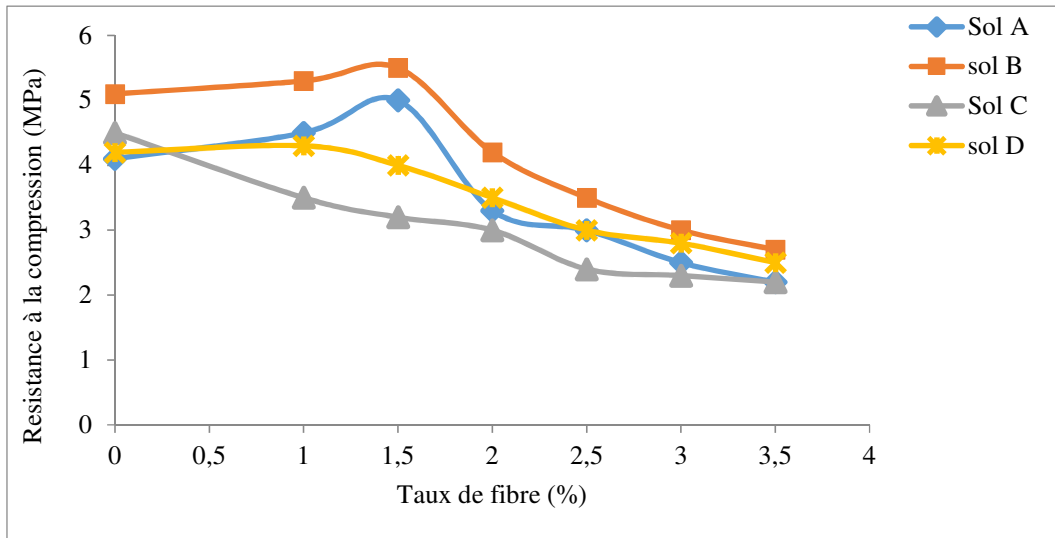


Figure 1-45 : Evolution de la résistance à la compression des échantillons renforcés par la paille d'orge hachée [99].

Des fibres synthétiques et artificielles ont servi de renfort dans des blocs de terre comprimée. Il s'agit de la terre latéritique stabilisée à 6% de ciment et renforcée par trois différents teneurs en fibres : 1,7%, 2% et 2,7% de longueurs : 20 mm, 35 mm et 50 mm. Les résultats montrent que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de taux de fibre jusqu'à un pic. Au-delà, une diminution de résistance est observée avec l'augmentation de la teneur en fibre (figure 1-46) [113].

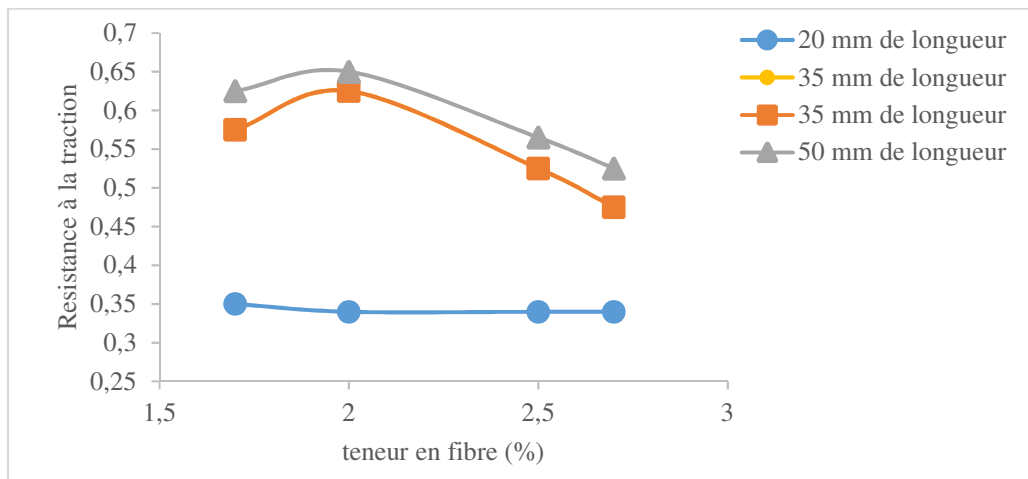


Figure 1-46 : contribution des fibres en acier des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment sur la résistance à la traction [113].

1.7.6.2.9. Effet des fibres sur les propriétés thermiques

L'isolation thermique est un moyen et une technique qui permet de limiter le transfert de chaleur par conduction de part et d'autre d'une paroi. A cet effet, il permet de ralentir les échanges de flux de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur ou vis-versa grâce à sa résistance thermique élevée. En général, l'isolation thermique contribue efficacement à la réduction des consommations énergétiques. De même pour la création d'un espace de vie sain et confortable dans le bâtiment. Une bonne maîtrise de la technique d'exécution et un bon choix des matériaux isolant permet de choisir des équipements de confort de puissance réduite, donc plus économiques [114]. Pour obtenir un confort intérieur agréable, la notion d'isolation est un acte essentiel. En plus de la protection contre le froid ou la chaleur, le bien être thermique fait intervenir des facteurs culturels et psychologiques [115].

1.7.6.2.10. Avantages d'isolation thermiques

L'isolation thermique a pour but de rendre moins dépendant des équipements de confort (climatisation et chauffage) lors de l'exploitation du bâtiment [116]. Au-delà du confort thermique, l'isolation d'un bâtiment peut générer d'autres avantages qui sont économiques, acoustiques, environnementaux, etc. [116].

1.7.6.2.11. Classification des matériaux isolants

Les matériaux isolants sont repartis en trois groupes essentiels : les minéraux inorganiques (isolants minéraux) ; les minéraux organiques (isolants synthétiques, végétaux et animaux) et les matériaux combinés (comme la laine de bois) [117].

- Matériaux inorganiques

Les isolants minéraux proviennent des matières naturelles inorganiques. Il s'agit du verre cellulaire ; de la laine de verre ; de la laine de roche (basalte en particulier) ; de la perlite ; de la vermiculite et de l'argile expansée [115, 118].

Les isolants minéraux ont des performances thermiques excellentes. Ils résistent également au feu et sont dotés d'une bonne stabilité dans le temps. Ils sont utilisés dans tout le domaine de constructions sous différentes formes [115]. Parmi les matériaux inorganiques, la laine de roche et la laine de verre sont les isolants les plus utilisés [118].

- Matériaux organiques

- Les isolants synthétiques sont souvent utilisés en isolation extérieure. Des études sont menées par Cabeza *et al* [119] sur les propriétés de panneaux de polyuréthane et polystyrène pour une isolation extérieure sur un bâtiment. Ils ont montré que ces

matériaux présentent des bonnes performances thermiques. Il existe également d'autres catégories des isolants synthétiques. Ces isolants sont conçus pour la recherche d'une haute performance isolante. Il s'agit de PIV (Panneau d'isolants sous vide) ; l'aérogel ; le brique monomur en terre cuite ; les blocs monomur en argile expansée etc. [118].

- Les isolants d'origine végétal : les fibres végétales sont utilisées comme matériaux isolants dans le bâtiment grâce à leurs bonnes performances thermiques et à leurs disponibilités. Parmi ces matériaux on trouve la laine de bois, la laine de coton, la laine de lin, la laine de coco, la cellulose, la paille, le torchis, le liège expansé et le chanvre [115].
- **Les isolants d'origine animale** : la laine de mouton est devenue un matériau homologué du bâtiment depuis 1990 dans les pays germaniques. Elle peut être utilisée comme isolant de remplissage à disposer manuellement [115, 118].
- **Les matériaux combinés (laine de bois)** : les panneaux de laine de bois sont fabriqués à l'aide de fibre de bois avec comme liant la lignine. La performance thermique de ces panneaux est comparable aux autres laines isolantes. Elle possède une structure rigide qui garantit une grande longévité [114].

De nombreuses études sont menées sur des composites cimentaires renforcés par les fibres pour améliorer les caractéristiques thermiques des matériaux de construction.

Dans cette partie, nous présentons une synthèse bibliographique sur les caractéristiques thermiques des matériaux de construction renforcés par les fibres.

Des études sont menées par Taoukil *et al* [120] sur un mélange de laine de bois et du sable pour évaluer son isolation thermique. Ils ont constaté que la laine de bois dans le mélange réduit considérablement la valeur de la conductivité thermique ainsi que sa densité. De même, l'augmentation de la laine de bois dans un composite favorise l'augmentation de l'isolation thermique et allège les matériaux. Par conséquent, elle diminue la résistance à la compression. Par ailleurs, la résistance à la compression mécanique et la conductivité thermique augmentent avec la densité (figure 1-47 et 1-48).

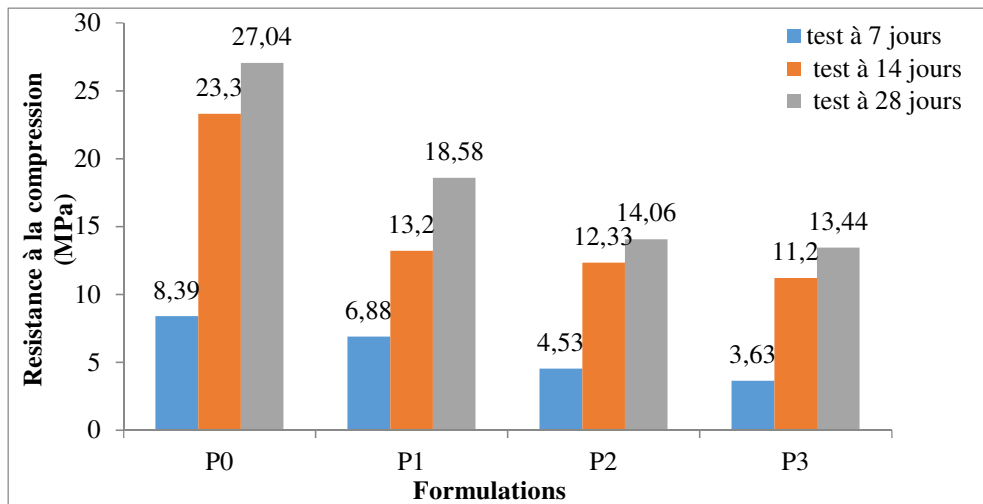


Figure 1-47 : Résistance à la compression en fonction de la concentration de laine de bois pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35, 46, 58%, respectivement [120].

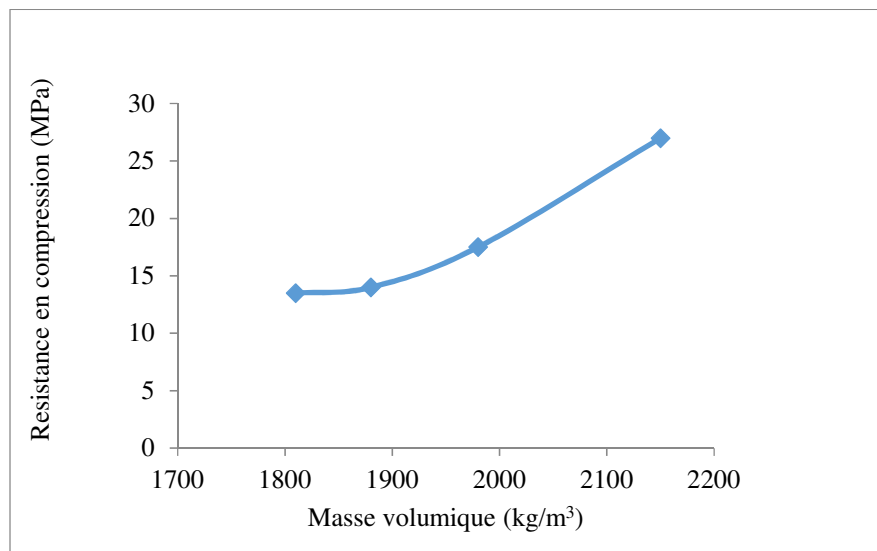


Figure 1-48 : Résistance en compression en fonction de la masse volumique de composite [120].

Un matériau composite est initié par Djoudi et al [121] pour utiliser dans la construction. Le mélange est préparé à base de plâtre, de sable, de gravier concassé et de fibre de palmier dattier dans le but d'améliorer les caractéristiques thermiques. Dans le même domaine de recherche, Mounir et al [122] ont travaillé sur un mélange d'argile et de liège pour évaluer ses propriétés thermiques. Les deux résultats ont montré qu'ils sont deux fois plus isolants que l'argile seule. Par ailleurs, Taoukil et al [120] ont constaté que la conductivité thermique d'un mortier renforcé par la laine de bois augmente avec la teneur en l'eau pour les différents composites (P0, P1, P2 et P3), (voir figure 1-49).

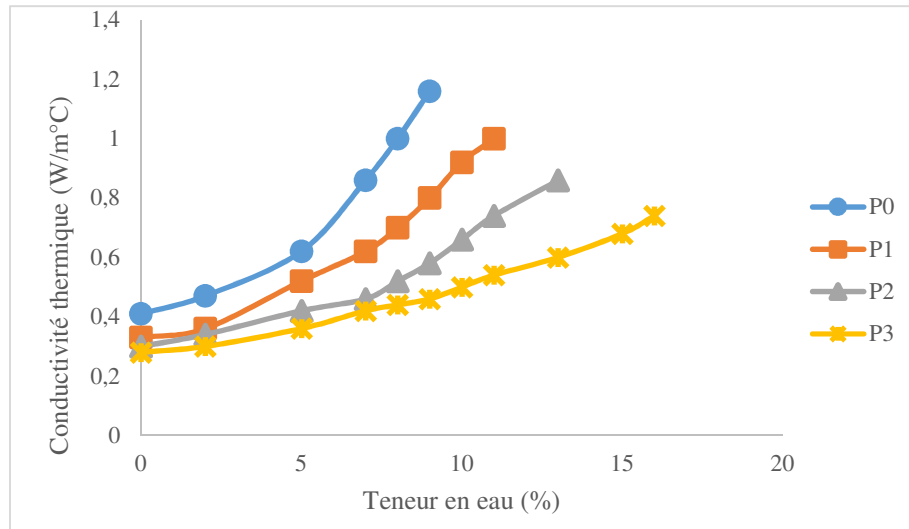


Figure 1-49 : Conductivité thermique de composites en fonction de la teneur en eau pour les composites P0, P1, P2, P3 correspondant aux concentrations de laine de bois de 0, 35, 46, 58%, respectivement [120].

Des études menées sur un matériau composite à base d'un béton de sable est renforcé par des copeaux de bois pour tester ses caractéristiques thermiques [123]. Ils ont constaté que l'ajout de copeaux de bois a amélioré les propriétés thermiques du mélange et a fait chuter sa densité. Al Rim et al [28] ont remarqué le même comportement sur un matériau composite préparé avec d'argile de ciment et de bois, (voir figure 1-50).

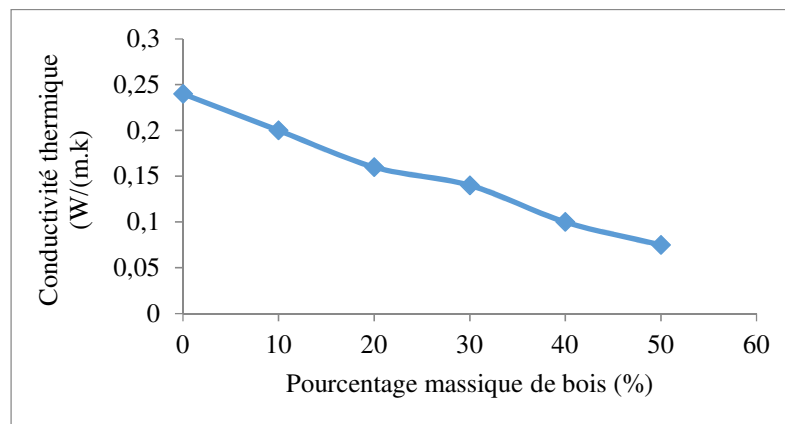


Figure 1-50 : Conductivité thermique en fonction de dosage en bois selon [124]

La conductivité thermique des briques d'argile latéritique comprimées et stabilisées par des fibres de coco diminue. Cette diminution est beaucoup plus importante avec l'augmentation de taux de ces fibres [110].

Les auteurs Millogo et al [102] ont également remarqué que la valeur de la conductivité thermique a chuté avec l'augmentation des taux et de longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus (figure 1-51).

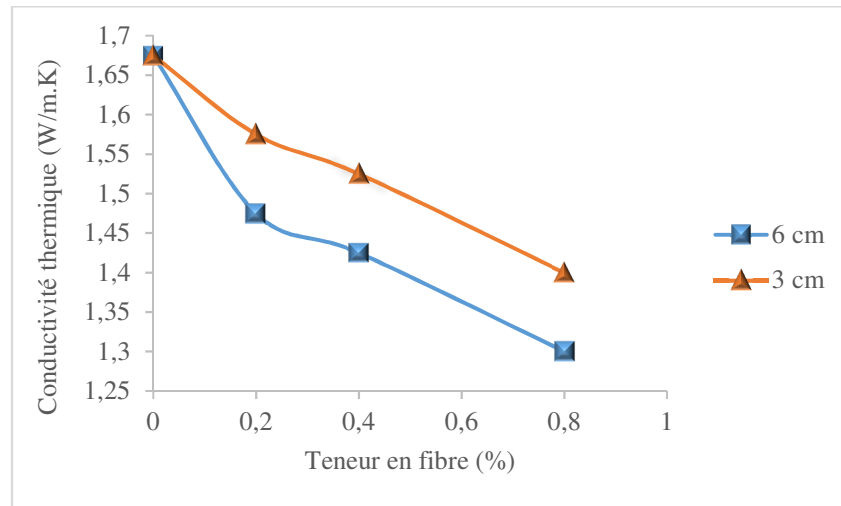


Figure 1-51 : La conductivité thermique de bloc de terre comprimé renforcée à différents taux et de longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus [102].

L'utilisation de fibres végétales naturelles, dans la construction a des atouts non négligeables, entre autres, les fibres sont disponibles et moins chères, elles constituent également un nouveau débouché pour les matières agricoles.

D'autre part, sa valorisation est très rentable face aux impacts environnementaux par rapport aux granulats conventionnels dans le cadre des émissions de gaz à effet de serre, et pour sa production elles ne demandent pas trop d'énergie.

Ces derniers temps, les particules végétales sont beaucoup plus utilisées à l'état naturel dans la construction sous forme de béton en mélangeant avec un liant et de l'eau pour une isolation thermique.

Selon les différents articles exploités, ils ont soulevé des obstacles pour son utilisation. Notamment, la durée de prise est trop longue et également les granulats provenant des fibres végétales ont une grande affinité d'eau.

Les solutions proposées dans la littérature sont les traitements physiques, chimiques ou thermiques pour les rendre compatibles avec les différents types de liants.

Ces dernières décennies, les matériaux à base de fibres lignocellulosiques, en plus de leur utilisation dans la construction sous forme de panneau, sont également utilisés comme matériau

de construction à l'état naturel. Cependant, l'utilisation des fibres naturelles comporte des inconvénients.

Dans cette partie, nous présentons une bibliographie pour la bonne compréhension de ses inconvénients.

1.7.6.2.12. Effet des fibres sur l'absorption d'eau

Les fibres végétales affichent un comportement hydrophile qui favorise une absorption d'eau en quantité importante. Par contre, des fibres comme le polypropylène présentent un caractère hydrophobe. Ce comportement constitue un défaut pour son utilisation dans le matériau terre. Quelques travaux scientifiques sont présentés dans cette partie, pour parcourir les différents problèmes et proposer des solutions.

A partir de la littérature bibliographie, Sallehan et Yaacob [125] ont tiré une conclusion que l'absorption d'eau des fibres de palmier dattier augmente avec le taux de ces fibres.

Dans le même volet, Ravishankar *et al* [126] ont constaté que la teneur en eau des fibres de coco augmente avec la quantité de ces fibres.

1.7.6.2.13. Effet du traitement des fibres végétales sur les propriétés des composites

Beaucoup d'études sont menées sur les propriétés d'adhésion entre le sol et les fibres. En effet, pour obtenir une bonne résistance finale du composite cimentaire, l'adhérence entre la matrice et les fibres est primordiale. Car, pendant un chargement, une fois que la matrice est dépassée, elle transmet la charge aux renforts (fibres). A leurs tours, les fibres maintiennent l'équilibre de l'ensemble en supportant la charge pendant un bon bout de temps. La présence des fibres dans un composite peut être bénéfique pour améliorer les résistances mécaniques des matériaux [127]. L'adhérence entre les renforts et la matrice conditionne une bonne stabilité de l'ensemble. Une faible adhérence entre les renforts et la matrice est une source de fragilisation dans le temps. La recherche des solutions pour améliorer l'adhérence entre matrice/fibre est basée sur les traitements de surface des fibres. Plusieurs études sont menées dans ce sens et des méthodes de traitements physiques et chimiques sont proposées [128].

En plus de leurs qualités thermiques, les matériaux biosourcés jouent un rôle de renfort et de rigidité dans le composite cimentaire. Malheureusement, ils comportent des défauts sur la prise

et le durcissement que nous allons les décrire ainsi que les solutions proposées dans la littérature bibliographique.

(Garcia Juenger MC *et al* [129] et Bilba. K *et al* [130]) ont testé l'influence de sucre sur la prise des composites cimentaires et ont trouvé que le sucre retarde l'hydratation des ciments.

La présence des substances hydrosolubles dans la partie lignocellulosique affecte la réaction d'hydratation du ciment et provoque un retard de prise et de durcissement du composite. Pour son bon usage, il faut procéder au traitement.

Les composites cimentaires à base de copeaux de bois traités pouvaient augmenter les performances mécaniques et thermiques ainsi que la stabilité de la variation dimensionnelle [131]. Amar Daya EH [132] a travaillé sur les poussières obtenues à partir de teillage des fibres de lin comme agrégats dans un composite à matrice cimentaire. Les résultats ont montré que le traitement à l'eau bouillie des poussières de lin améliore considérablement les résistances mécaniques des composites.

Mouloud [133] a utilisé un traitement d'ébullition sur les fibres de sparte (*lygeum spartum*). Il a constaté que l'ébullition a détruit complètement la présence de sucre hydrosolubles et il offre au composite une hydratation et un durcissement comparable à un mortier ordinaire.

Blankenheim P.R et al [134] a procédé au traitement chimique de surfaces des différentes fibres de bois et comparés aux fibres non traitées. Ils affirment que les fibres traitées améliorent bien les caractéristiques mécaniques.

Juarez [135] a testé des agents protecteurs pour tenter de diminuer la sensibilité à l'attaque alcaline des fibres d'agaves. Il a utilisé de l'huile de lin, de la paraffine, un mélange de l'huile de lin et de colophane et un mélange de paraffine et de colophane. Juarez constate que la paraffine est plus efficace pour inhiber l'absorption d'eau des particules végétales. Il note également que la paraffine se révèle la plus efficace pour diminuer l'absorption d'eau des fibres (-37% par rapport aux fibres non traitées) et leur perte de résistance (maintien de 53% de la résistance initiale contre environ 31% pour les autres traitements). Il en est de même pour la ductilité puisque l'allongement à la rupture des fibres traitées par de la paraffine représente 47% de la valeur initiale tandis que celui des fibres traitées par les autres substances ne conservent qu'entre 17 et 27% de cette valeur.

Denibras *et al* [136] ont montré expérimentalement que certains déchets comme les coques de noisettes, les déchets de hêtres, et de sapins peuvent être utilisés partiellement avec le ciment

portland, mais les déchets de thé ne sont plus admis. Donc, certains déchets provenant des matières lignocellulosiques peuvent avoir des effets néfastes sur les caractéristiques des composites.

Les fibres végétales peuvent bien apporter des solutions alternatives aux granulats minéraux mais le problème de retard d'hydratation et leurs forts pouvoirs absorbants sont les seuls obstacles.

Pour accélérer l'hydratation de ciment, Sorouschian. P *et al* [137] ont procédé au traitement chimique à un composite cimentaire, en ajoutant 2% de silicate de sodium de la masse de ciment et également 10% de chaux par masse de ciment, pour accélérer d'avantages les réactions avec les dioxydes de carbone.

Mouloud [133] a travaillé pour vérifier le taux d'absorption des quatre différentes fibres de sparte (*Lygeum spartum*) qui sont : sparte naturel non broyé, sparte broyée bouillie non lavé, sparte broyé bouilli et lavé et sparte broyé, non bouilli et sèche à 50°C. Il a constaté que les fibres de sparte naturelle non broyées coupées absorbent à court terme, moins que les fibres broyées, mais à la longue, l'absorption pourrait atteindre le même taux d'absorption que les autres fibres de sparte de broyé.

Par contre, pour les fibres broyées séchées de sparte non bouillies, bouillies non lavées et bouillies lavées, présentent des absorptions qui avoisinent les 100% ainsi qu'une même cinétique d'absorption et un temps de saturation avoisinant 60 min. Selon lui, le fait de bouillir les fibres de sparte n'a apporté aucune modification dans son pouvoir absorbant.

Pour les fibres de sparte, traitées avec de l'huile de lin et avec du bitume, présentent des absorptions très faibles voire même négligeable. Ceci montre que l'huile de lin et le bitume ont rendu étanche les fibres de sparte.

Les résultats des essais d'absorption en phase liquide obtenus sur les fibres enrobées de l'huile de lin et de bitume sont représentés sur la figure 1-52.

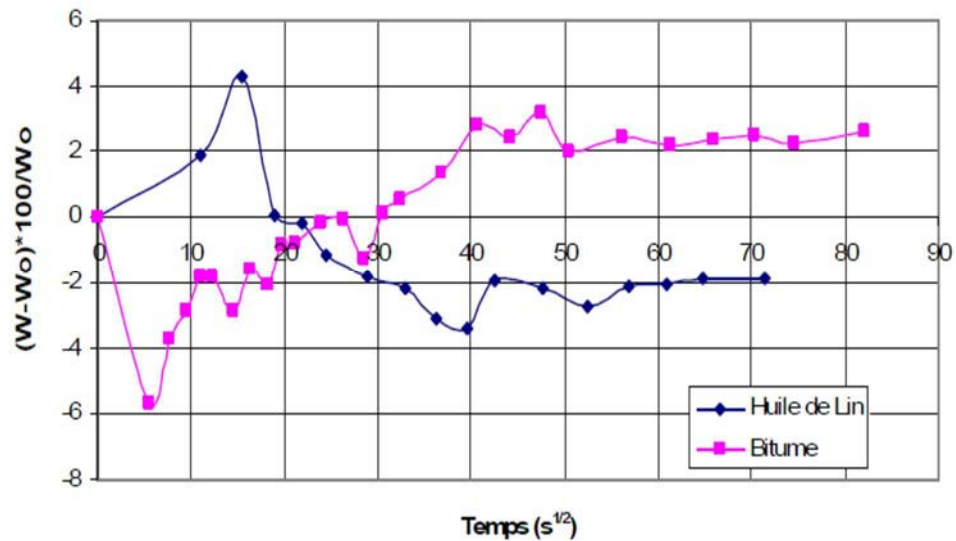


Figure 1-52 : Essais d'absorption des fibres de sparte (*lygeum spartum*) enrobées d'huile de lin ou bitume [133]

Dans le même ordre d'idée, des essais d'absorption en phase vapeur ont été menés sur les échantillons de sparte (*lygeum spartum*). Les résultats ont montré que l'absorption de fibre de sparte non bouilli en phase vapeur est plus importante que celle de fibre de sparte bouilli. D'après l'auteur, cette affinité est due certainement à cause de substances hydrophiles. Puisqu'en phase liquide, cette absorption n'a pas été observée. A partir du 11^{eme} jour dans le dessiccateur, les échantillons du sparte non bouilli, commencent à se détériorer. Alors que les échantillons du sparte bouilli n'ont pas été contaminés. Le caractère hydrophile et la décomposition des fibres de sparte non bouilli laissent supposer l'existence de sucre qui sera responsable de la contamination.

Il a été constaté également une faible absorption des fibres de sparte, imprégnées dans de bitume ou de l'huile de lin, comme le sont aussi en phase liquide. En général, les deux traitements apportent une étanchéité acceptable au matériau de base.

Les résultats des essais d'adsorption des fibres de sparte en phase vapeur sont représentés sur la figure 1-53.

Pour nos travaux de recherches, nous allons choisir la paille de riz pour le renfort de la terre argileuse. Elle est disponible un peu partout dans le monde, contrairement aux autres cultures annuelles qui sont considérées comme des cultures méditerranéennes ou des cultures des pays développés.

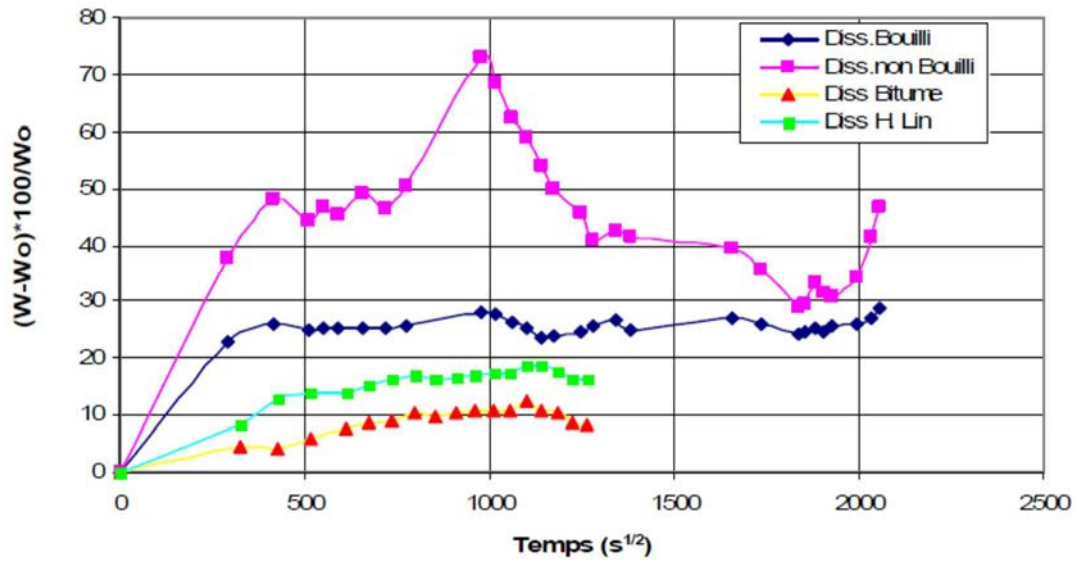


Figure 1-53 : Essais d'absorption en phase vapeur des fibres de sparte (*lygeum spartum*) avec ou sans traitements [133].

Hamada [138] a travaillé sur le traitement des fibres avec une solution de NaOH pendant un temps et une température bien connus. Après le traitement, les fibres sont lavées avec de l'eau distillée et étalées à l'air libre pour séchage. Il constate que ce traitement améliore l'adhérence matrice/fibre.

Les fibres sont traitées avec une solution de NaOH durant un temps et température bien définies. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau distillée pour éliminer l'excès de NaOH, et finalement elles sont séchées à l'air libre. Ce traitement améliore les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles [138].

Des fibres de palmier dattier sont traitées avec une solution de soude à une teneur de (2% à 5%) à 23 °C pendant 2 h, 4 h, 6 h et 24 h pour ajouter au mélange à base de polymère. Ce traitement a permis d'éliminer les impuretés et une partie d'hémicelluloses qui sont à la base du caractère hydrophile des fibres. Par ailleurs, l'élimination en partie ou totalement des hémicelluloses des fibres végétales, réduit l'avidité des fibres en eau [139].

Les travaux de Joshy *et al* [140] sur le traitement des fibres d'Isora avec 1% de solution alcaline à 30° C pendant 4h pour renforcer un composite polyester. Les caractéristiques mécaniques du mélange donnent de bons résultats avec les fibres traitées par rapport aux fibres non traitées. Ce traitement apporte une nette amélioration au module de Young. De même, le volume de fibres traitées peut aller jusqu'à 66% dans le composite, contre 45% pour les fibres non traitées [140].

Le taux de la solution alcaline pour le traitement des fibres influe sur leurs résistances et leurs adhérences. Alsaeed *et al* [128] ont étudié les traitements des fibres de palmier dattier avec une solution de soude en utilisant trois concentrations différentes (3%, 6% et 9%) pendant 24 h sous la température ambiante du laboratoire. Les auteurs ont constaté qu'une faible concentration de soude n'a ni une influence sur la résistance à la traction moins encore sur l'adhérence matrice/fibre. Par contre avec une concentration jusqu'à 9% de soude pour le traitement a détruit les fibres. Avec 6% de soude, cette concentration est jugée optimale et qui a donné des bons résultats mécaniques et a amélioré le caractère adhérent du composite renforcé [140].

Lo. Y et al [141] ont testé un traitement des fibres végétales par pré-mouillage à l'eau et ils ont constaté que le pré-mouillage des agrégats végétaux améliore la résistance et la maniabilité du composite de matériaux d'agrégats légers à matrice cimentaire. Ce traitement par pré-mouillage permet d'éliminer une bonne partie des substances hydrosolubles.

1.7.6.2.14. Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin

Les liants minéraux tels que le ciment et la chaux possèdent des comportements fortement basiques en mélangeant à l'eau. Le ciment portland a un pH de 13,5 et la chaux aérienne un pH de 12,5.

Les milieux basiques sont responsables des pertes de ductilités des composites cimentaires renforcés par les fibres végétales. Cette perte de ductilité est due à la dégradation des fibres végétales dans un milieu alcalin. Pour mieux comprendre ce phénomène, plusieurs recherches sont menées sur des fibres végétales trempées dans des solutions basiques variables.

Des travaux menés par Filho et al [39] pour étudier la durabilité des fibres de coir et de sisal dans de l'eau à pH = 8,3, du Ca(OH)₂ à pH = 12 et du NaOH à pH = 11. Ils constatent les faits suivants :

- 210 jours d'imbibition dans la solution d'hydroxyde de calcium, les résistances en traction résiduelles des différentes fibres représentent 33,7 % de fibre de sisal et 58,7% des fibres de coco par rapport à leurs résistances initiales.
- Après 420 jours d'immersion dans une solution de soude, des fibres de coco et de sisal, les résistances résiduelles à la traction augmentent respectivement de 72,7 et 60,9% de la résistance initiale.

Cette amélioration est due à la cristallisation des chaux dans les pores des fibres imbibées dans la solution d'hydroxyde de calcium.

Dans le passé, cette vérification est faite par Gram [142], qui est due à l'action spécifique des ions de calcium lors de l'immersion des fibres dans des solutions d'hydroxydes de potassium ou de sodium.

Dans le même volet, Kriker *et al* [143] ont mené des études sur des fibres de palmier dattier. Six (6) mois d'immersion dans la solution de NaOH, la résistance résiduelle est légèrement supérieure que l'immersion dans une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour la même période. De même, l'auteur constate par une observation au microscope électronique à balayage deux modes de dégradations distingués. Le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ semble couvrir entièrement pour pénétrer dans les pores des fibres. Par contre, l'attaque de NaOH est localisée (des dépôts de NaOH visibles et des trous apparaissent par endroits sur les fibres).

La faible résistance des fibres n'est pas due uniquement à l'agression de la solution alcaline, mais également à la propriété intrinsèque des fibres.

Pour vérifier cette thèse, Kriker *et al* [143] ont travaillé sur des fibres de différents diamètres. Ils constatent que plus le diamètre des fibres est faible, plus la résistance est faible.

Une étude comparative est menée sur les effets de l'immersion et des cycles humidifications/séchages sur des fibres de coir, de sisal, de jute et d'hibiscus cannabinus dans de l'eau de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou du NaOH [144]. L'auteur constate différent dégradation selon les fibres testées.

- La dégradation est plus agressive pour le cas de cycle humidification/séchage dans la solution d'hydroxyde de calcium pour laquelle, à partir de 30 cycles, les fibres de sisal, de jute et d'hibiscus sont détruites. Par contre, avec le même essai, les fibres de coir conservent entre 20 à 40% de leur résistance originale. L'auteur attribue cette différence de comportement à la porosité des différentes fibres utilisées. Il constate que les fibres du sisal, du jute et de l'hibiscus cannabinus sont plus poreuses que les fibres de coir. Ce qui facilite la cristallisation de produits dans les pores et entraîne leur fragilisation.
- A travers ces essais, l'auteur constate une chute de teneur de 20 à 85% de cellulose et de 30 à 70% d'hémicellulose.

Le problème de fragilisation des fibres en milieu basique est probablement dû à la dissolution totale ou partielle des trois polymères majoritaires qui composent les fibres (celluloses, hémicelluloses et lignines).

Des études menées par Gram [145] sur des fibres. Il a constaté que la cause première de dégradation des fibres de sisal est la décomposition chimique de la lignine et de l'hémicellulose de la lamelle mitoyenne. La liaison qui existe entre les fibres se rompent en milieu alcalin comme illustré par la figure 1-54. Gram ajoute que le lumen, vide central des fibres de sisal est bourré d'hydroxyde de calcium et ainsi perd sa ductilité.

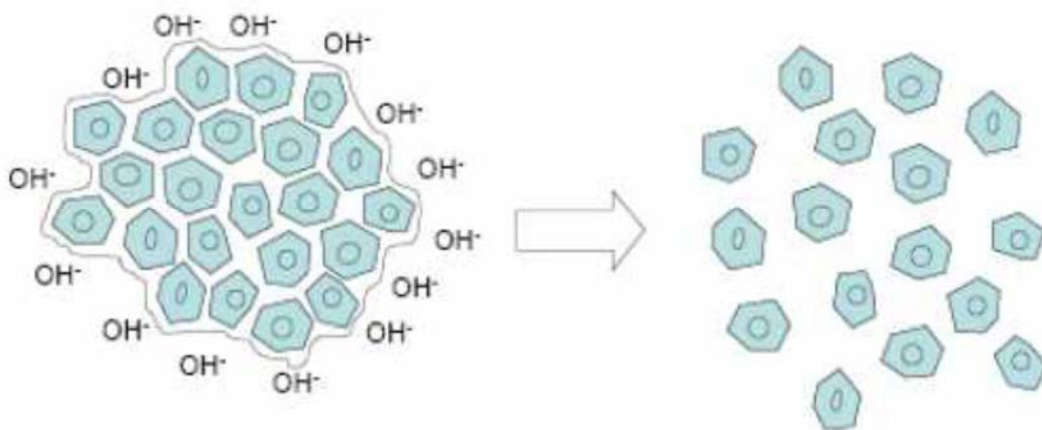


Figure 1-54 : Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin [145]

1.8. Conclusion

L'étude bibliographique a mis en évidence l'intérêt des liants minéraux dans la stabilisation des matériaux de construction. De même, l'utilisation des fibres dans la construction a servi de renfort pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et thermiques.

Dans ce chapitre, nous avons constaté à travers les différents travaux scientifiques que les liants minéraux, que ce soit la chaux ou le ciment contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques. Quand il s'agit d'utilisation des fibres dans la construction, elles ont un réel intérêt dans l'isolation thermique. De même pour limiter les retraites et les fissures. Par contre, pour leurs contributions dans l'amélioration des résistances mécaniques, l'avis est partagé. Il y a des travaux de recherche qui n'ont pas apprécié l'utilisation des fibres comme renfort dans les matériaux de construction, parce qu'ils fragilisent la matrice cimentaire. Pourtant d'autres l'ont recommandé pour leurs meilleurs résultats mécaniques, surtout en flexion.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le Tchad, ses potentialités agricoles et climatiques. Enfin un liant sera choisi pour stabiliser nos matériaux d'étude.

1.9. Références bibliographiques

- [1] Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [2] Houben. H, Guillaud H. Earth construction a comprehensive guide. London : Intermediate Technology; 1994.
- [3] Rigassi V. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- [4] Taallah.B. Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibre, vol 202, 2014
- [5] Houben H, Rigassi V, Garnier P. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.
- [6] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [7] Michot A. Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.
- [8] Mme Allam née Boussak Hassina, Mme Chemani Halima. Mémoire de thèse : Effet de la température sur les performances des céramiques contenant la bentonite de Maghnia, vol 175, 2015 ;
- [9] Le Pluart L. Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite: Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux. Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.
- [10] Caillère S, Hénin S, Rautureau M. Minéralogie des argiles. Masson, Tomes 1 et 2, Paris France, 184p et 189 p, 1982.
- [11] Benchabane A. Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg I, France, 2006.
- [12] Mckenzie RC. The classification of soil silicates and oxydes. In : Soil components vol. 2; Inorganic components. Giesecking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, pp.1-25, 1975.
- [13] Caillère S, HENIN S. La classification des argiles. XXème congrès Géol. Internat., Mexico, pp. 1-8, 1959.

- [14] Mitchell JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.
- [15] Lambe TW. The Structure of Inorganic Soil, Proceeding. ASCE, Vol. 79, Separate N°. 315,49p, 1953.
- [16] Grim RE. Physico-Chemical Properties of Soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations division. ASCE, vol. 85, no. SM2, pp. 1-17, 1959.
- [17] Saiyouri N. Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées, Thèse doctorat, Ecole Centrale Paris, 228 pp, 1996.
- [18] Reinholdt M. Synthèse en milieu fluoré et caractérisation de Phyllosilicates de type Montmorillonite. Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, 2001.
- [19] Holtz RD. Introduction à la géotechnique. Edition de l'école Polytechniques de Montréal, Canada, 808 p, 1991
- [20] Walker, P. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.
- [21] Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [22] Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology 42, 223-237, 1996.
- [23] AFNOR NF P 94-100. Sols : reconnaissance et essais – Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement.1999.
- [24] Burrough VS. Quantitative Criteria for the Selection and Stabilization of Soils for Rammed Earth Wall Construction, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, 2001.
- [25] USACE. Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.
- [26] P'kla A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002.
- [27] United Nations. Earth Construction Technology. United Nations Centre for Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- [28] Winterkorn HF. Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.

- [29] Symons WG. Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia, The Levels, South Australia, 1999.
- [30] Webb DJT. Stabilised soil and the built environment. *Renewable Energy*, Vol. 5, N°. 5-8, 1066-1080, 1994.
- [31] Ghomari F. Matériau en Terre Crue Compactée : Amélioration de sa Durabilité à l'Eau. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.
- [32] DeJong-Hughes J, Moncrief JF, Voorhees WB, Swan JB. Soil Compaction: Causes, Effects and Control. University of Minnesota Extension Service. 2001.
- [33] Ausroads. Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- [34] Mesbah A, Morel JC, Olivier M, Comportement des sols fin argileux pendant un essai de compactage statique : détermination des paramètres pertinents, *Matériaux et constructions*, vol 32, N°223, 1999.
- [35] Olivier M. et Mesbah A. Le matériau terre : essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre comprimées. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, volume 146. : pp 37-43, 1986.
- [36] (CDE) : Centre pour le développement de l'entreprise. Blocs de terre comprimée, procédures d'essais. Série technologies n°16. CDE, CRATerre-EAG, ENTPE, p. 121, 1982.
- [37] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. *Soft Ground Improvement in lowland and other Environments*. ASCE Press. New York, 1996.
- [38] Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.
- [39] Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [40] Guettala A. Béton de terre stabilisé : amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.
- [41] Venuat M. Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Publié par l'auteur, 66 av. C. Perrière, 92320 Châtillon-sous-Bagneux, 459 p, 1980.
- [42] Verdyen J., Roisin V, Nuyens J. *Applications de la mécanique des sols*", Dunod Ed. Paris, 1971.
- [43] Moszkowicz P, Barna R. Stabilisation - solidification des déchets. *Techniques de l'ingénieur*, Article G 2 080, Volume G. 04. 2001.

- [44] Tran N T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de doctorat de l'Université d'Artois, France, 2009.
- [45] Walker P. and Stace T. Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars, *Materials and Structures* Vol 30, pp 545 – 551, 1997.
- [46] Heathcote. K, & Piper R. Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. *J. Proc. Roy. Soc. New South Wales*, vol. 127, pp. 33-37, 1994.
- [47] Kerali AG. Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University, 2001.
- [48] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.
- [49] Venkatrama Reddy BV, Gupta A. Characteristics of soil cement blocks using highly sandy soils. *Journal of Materials and Structures*, 38, 651-658, 2005.
- [50] Meukam P, Jannot Y, Noumowe A, Kofane TC. Thermo physical characteristics of economical building materials. *Construction and Building Materials*, Volume 18, issue 6, pp. 437–443, 2004.
- [51] Jarrige JF. 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.
- [52] Le Roux A. Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux. Thèse de doctorat Université des Sciences d'Orsay ; 106 p, 1969.
- [53] Le Roux A. Traitement des sols argileux par la chaux. *Bull. liaison Labo P. et ch.* Sept.-oct., n° 40, pp 59-96, 1969.
- [54] Chauquette M. La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec. Thèse de Ph.D. Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, Qué. 188 p, 1988.
- [55] Locat J, Bérubé MA, Chauquette M. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Revue canadienne de géotechnique*. Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ont. Volume 27, numéro 3. 10 p, 1990.
- [56] Rogers CDF., Glendinning S, Dixon N. (éditeurs). *Proceedings of the seminar on Lime Stabilization held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department*. 25 septembre, 1996. Thomas Telford, London, England. 183 p, 1996a.
- [57] Kézdi A. *Stabilized Earth Roads, Developments in geotechnical engineering* 19. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, NY. 327 p, 1979.

- [58] Moore, R.K. Lime Stabilization. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. State of the art report 5. 59 p, 1987.
- [59] Prusinski JR, Bhattacharja S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. pp. 215--227. Présenté au Seventh International Conference on Low-Volume Roads. 23--26 mai, 1999, Baton Rouge, Louisiana. Transportation Research Record N°.1652, Volume 1. National Academy Press, Washington, D.C. 275 p, 1999.
- [60] Little DN. Fundamentals of the stabilization of soil/ with lime. National Lime Association, Arlington, Virginia. Bulletin 332. 20 p, 1987.
- [61] Broms BB. Stabilization of Soil with Lime Columns. Foundation Engineering Handbook, 2nd Edition, Ed. Hsai-Yang Fang Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 833-855, 1991.
- [62] Rogers CDF, Glendinning S, Dixon N. Lime Stabilisation. Proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department. 25 septembre, 1996. Thomas Telford, London, England. 183 p, 1996b.
- [63] Millogo Y, Hajjaji M, Ouedraogo R. Microstructure and physical properties of lime-clay adobe bricks. Construction and Building Materials, 2386-2392. Volume 22, 2008.
- [64] Tesoriere G. et al. "Studio sperimentale sulle trra. Calce-cemento", Analisi del comortament meccanico, Industria italiana det cemento (ITA), 1981, 5, n°6, pp. 435-444.
- [65] Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi A A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. Geotech Geol Eng, 29:899–908, 2011.
- [66] Prabakar J, Sridhar RS. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. Construction and Building Materials, 16,123-131, 2002.
- [67] Baley C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Les techniques de l'ingénieur, AM 5 130, 2004.
- [68] Rowell RM, Jacobson R, O'dell, JL. Proceeding of 3rd, Use of Natural Fibers in Resine Transfer molding. International Conference on Wood fiber – plastic Composites. Madison, USA, 137-140 p, 1995.
- [69] Sbiai A. Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier ; effet de l'oxydation au tempo. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2011.
- [70] Keller A, Leupin M. Influence of the growth stage of industrial hemp on chemical and physical properties of the fibres. Industrial crops and products, 13, 35-48, 2001.

- [71] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose fibres *Progress in Polymer Science*, 24, 221-274, 1999.
- [72] Olivia. C, Stephane. G, Henri. C, Frederique. P. Mémoire de thèse : Valorisation d'une lignine alcaline industrielle vers le développement de nouveaux synthons et oligomères biosourcés issus de lignine. 2015.
- [73] Reyne M. *Technologie Des Composites, Traité des nouvelles technologies. Série Matériaux ; Hermès, v.13, 1990.*
- [74] Gandini A, Belgacem MN. *La chimie des substances renouvelables. L'actualité chimique, Pages 6-14, 2002 ;*
- [75] Nozahic.V. *Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux Lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal. Thèse- Université Blaise Pascal – Clermont II. France, 2012.*
- [76] Tranle A.D. "Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment," Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010, pp. 221.
- [77] Aziz M, Paramasivam P, Lee. SL. *New Reinforced Concretes: 3. Concrete reinforced with natural fibres. Surrey University Press, 1984*
- [78] Sedan. D "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite." Thèse de Doctorat, Université De Limoges, 2007, pp. 137.
- [79] Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer MM, Chabannet M. Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate. *Cem Concr Compos ;27(5):554–64, 2005.*
- [80] ACI 544. *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. Reported by ACI Committee 544.1-96, 1996.*
- [81] Kaniraj R, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotext Geomembr; 21:123–149, 2003.*
- [82] Abtahi M, Okhovat N, Hejazi M. Using textile fibers as soil stabilizers – new achievements. In: *1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran; 2009.*
- [83] Rao J. Jute geotextile for improving the performance of highway embankment on soft marine soil. In: *Proc nat sem jute based geotextiles, New Delhi, India; 1996.*
- [84] Vidal H. The principle of reinforced earth. *High Res Rec ; 282 :1–16, 1969.*

- [85] Azeem A, Ati A. Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings. In : Ind geotech conf, Calcutta; 1992.
- [86] Swamy N. New reinforced concretes. Surry University Press; 1984.
- [87] Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *Am J Appl Sci*; 5:209–20, 2008.
- [88] Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotext Geomembr*; 25:194–202, 2007.
- [89] Vasudev D. Performance studies on rigid pavement sections built on stabilized sulfate soils. Msc thesis, University of Texas at Arlington; 2007.
- [90] Puppala J, Musenda C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils. *trans res boa*. In: 79th Annual meeting, Washington, USA; 2000.
- [91] Cai Y, Shi B, Ng CWW, Tang CS. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87, 230–240, 2006.
- [92] Mesbah A, Morel JC, Walker P. and Ghavami Kh. Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 95-98, 2004.
- [93] Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cem Concr Compos* ; 21(1):39–48, 1999.
- [94] Yetgin Ş, Çavdar O, and Çavdar, A. The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 222-227, 2008.
- [95] Thielemans W, Wool RP. Butyrate Kraft lignin as compatibilizing agent for natural fiber reinforced thermoset composites. *Compos Part A: Applied Sci Manuf*;35(3): 327-38, 2004.
- [96] Swamy RN. Vegetable fibre reinforced cement composite A false dream or a potential reality. In: Sobral H.S, editor. *Proceedings of the second international RILEM symposium, vegetable plants and their fibres as building materials*, Salvaor, Bahia (Brazil), Chapman and Hall; p.139–49, 1990.
- [97] Coutts RSP, Ni Y. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. *Cem Concr Compos*; 17(2) : 99–106, 1995.
- [98] Aggarwal LK. Bagasses-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 17(2) :107–12, 1995.

- [99] Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cem Concr Compos*, 27(5) :617–21, 2005.
- [100] Binici H, Aksogan O, Shah T. Investigation of Reinforced Mud Brick as Building Material. *Construction and Building Materials*, 19(4):313-318, 2005.
- [101] Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr Build Mater* 2; 30:100–16, 2012.
- [102] Millogo Y, Morel J-C, Aubert JE, Ghavami K. Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Constr Build Mater*; 52:71–78, 2014.
- [103] Ramaswamy HS, Ahuja BM, Krishnamoorthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *Int J Cem Compos Lightweight Concr*;5(1):3–13, 1983.
- [104] Ziegler S, Leshchinsky D, Ling HL, Perry EB. Effect of short polymeric fibres on crack development in clays. *Soils Found*; 38 (1): 247–53, 1998.
- [105] Filho RDT, Scrivener K, England GL, Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cem Concr Compos*; 22(2):127–143, 2000;
- [106] Vergas J, Bariola J, Blondet M. Seismic Strength of Adobe masonry. *Materials & Structures*, 19, pp. 253-258, 1986.
- [107] Namango SS. Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction. In: *Investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with sisal vegetable fibers. Cassava powder and cement compositions. A doctoral dissertation. Brandenburg Technical University; Cottbus, Germany, 2006.*
- [108] Minke G. *Earth Construction Handbook*. Boston: WIT Press; 2000.
- [109] Villamizar MCN, Araque VS, Reyes CAR, Silva RS. Effect of the addition of coalash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Constr Build Mater*;36(11):276–86, 2012.
- [110] Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J. Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity. *Cem Concr Compos*; 27(1):111–116, 2005.
- [111] Oliver M. and El Gharbi Z. Sisal Fibre Reinforced Soil Masonry. *Proceedings of the 4th International Masonry*, London, pp. 55-58, Oct. 1995.
- [112] Savastano Jr H, Warden P.G, Coutts R.S.P, Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites, *Cement Concrete Composites* 22 (2000) 379-384.

- [113] Eko RM, Offa ED, Ngatcha TY, Minsili LS. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Constr Build Mater*; 35(10):340–6, 2012.
- [114] Meukam. P "Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments," Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004, pp. 157.
- [115] Oliva J-P, L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre: terre vivante, mens, France, 207, 2001.
- [116] Dr. Mohammad S. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 353-366, 2005.
- [117] Papadopoulos A.M, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy and Building*, vol. 37, pp. 77-86, 2005.
- [118] Fragos MM & Trouillez, Le guide de l'isolation: Fine Media, Paris, 2012. contacte@finemedia.fr;
- [119] Cabeza L.F, Castell A, Medrano. M, Martorell I, Pérez G, & Fernandez I, "Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 630–636, 2010.
- [120] Taoukil. D, bouardia A. E, Ajzoul T & Ezbakhe H "Effect of the Incorporation of Wood Wool on Thermo Physical Proprieties of Sand Mortars, KSCE," *Journal of Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1003-1010, 2012.
- [121] Djoudi A, Khenfer. M.M, Bali A, Kadri E.H & Debicki G. "Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 7, pp. 2845-2853, 2012.
- [122] Mounir. S, Maaloufa Y, Cherki A. b & Khabbazi A. "Thermal properties of the composite material clay/granular cork," *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 183-190, 2014.
- [123] Bederina M, Marmoret L, Mezreb K, Khenfer M.M , Bali. A & Quéneudec . M, "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 662-668, 2007.
- [124] Al Rim K, Ledhem A, Douzane O, Dheilily R M, & Queneudec M. "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cementwood composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 269-276, 1999

- [125] Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika J Sci Technol*;19 (1):33–43, 2011.
- [126] Ravishankar U, Raghavan S. Coir stabilised lateritic soil for pavements. In: *Indian geotech conf, Ahmedabad, India*; 2004.
- [127] Haque MM, Hasan M, Islam MS, Ali ME. Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites. *Bioresour Technol*; 100 (20) :4903–4906,2009.
- [128] Alsaeed T, Yousif BF, Ku H. The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites, *Materials and Design*, 43, 177–184, 2013.
- [129] Garci Juenger M.C, Jennings H. M, New insights into the effects of sugar one the hydration and microstructure of cement pastes, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 393 –399 ;
- [130] Bilba K, Arsene, M.A, Ouensanga, A, Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composites, *Cement and Concrete Composites* 25(2003) 91-96.
- [131] Ledhem A, Dheilily R.M, Benmalek M.L, Quéneudec M, Properties of Wood-based composites formulated with aggregate industry waste, *Construction and Building Materials* 14 (2000) 341-350
- [132] Amar Daya E.H, Contribution à la valorisation de co-produits du lin, poussières obtenues par aspiration lors du teillage, dans une matrice cimentaire, Thèse de doctorat de l'Université de Picardie Jules Verne., Septembre 2004.
- [133] Mouloud M. Mémoire de thèse. Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base des fibres de sparte (*lygeum spartum*) dans la fabrication de maçonnerie, vol 139, 2007.
- [134] Blankenhorn P.R, Blankenhorn B.D, Silsbee M, Dicola M, Effects of fiber surface on mechanical properties of wood fiber-cement composites, *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1049-1055.
- [135] Juarez C, Dura A, Valdez P, Fajardo G. Performance of “Agave Lecheguilla” natural fiber in Portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment*, 2005.

- [136] Demibras A, Aslan A, Effects of ground hazelnut shell, wood and tea waste on the mechanical properties of cement, *Cement and Concrete Research*, Vol 28 N°8, pp 1101-1110, 1998.
- [137] Soroushian P, Aouadi F, Chowdhury H, Nossoni A, Sarwar G, Cement-bonded straw subjected to accelerated processing, *Cement and Concrete composites* 26 (2004) 797-802.
- [138] Hamada H, Ikuta N, Nishida N, Maekawa Z. Effect of interfacial silane network structure on interfacial strength in glass fibre composites, *Composites*, v.25, p.512, 1994.
- [139] Taha I, Steuernagel L, Ziegmann G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, v.14, n.7-9, p.669-684, 2007.
- [140] Joshy MK, Mathew L, Joseph R. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isora fibre reinforced polyester composites. *Composite Interfaces*, v.14, n.7-9, p.631-646, 2007.
- [141] Lo Y, Gao X.F, Jeary A.P, Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete, *Building and environment* 34 (1999), 759-764).
- [142] Gram HE. Durability of natural fibres in concret. CBI Research fo 1-83, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1, 255 pp, 1983.
- [143] Kriker A, Bali A, Debicki G, Bouziane M, Chabannet M. Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, p. 639-648, 2008.
- [144] Ramakrishna G, Sundararajan T, Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar, *Cement Concrete Composites* 27 (2005) 575-582.
- [145] Gram HE. Durability of natural fibres in concrete. In *Concrete technology and design, Natural fibre reinforced cement and concrete*, N, Swamy, Blackie and Son Ltd, UK, 1988.

CHAPITRE 2 : ZONE D'ETUDE ET SES POTENTIALITES AGRICOLES

2.1 Présentation du Tchad

Le Tchad est un pays d'Afrique centrale, situé, entre les 7^{ème} et le 24^{ème} degré de latitude Nord et les 13^{ème} et 24^{ème} degré de longitude Est. Il couvre une superficie de 1 284 000 km² dans laquelle vit une population estimée à 12 millions d'habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2011.

Son économie est dominée par l'agriculture et l'élevage avec environ 10% de sa superficie totale qui est cultivable. Le Tchad est reparti en trois zones climatiques qui évoluent du Nord vers le Sud comme suit (figure 2-1) :

- La zone saharienne ou (désertique) : représente 47% de la superficie totale du pays et offre une pluviométrie très faible, qui ne dépasse guère 100 mm de précipitation par année. Dans cette partie du pays, l'agriculture et l'élevage sont rares. Quelques cultures de subsistances irriguées sont pratiquées dans les oasis, associé un élevage sédentaire et de camelin (dromadaire). Toutefois, elle constitue une zone de culture des dattes par excellence, dans laquelle, se trouve un million de palmiers dattiers sur une superficie de 6000 à 7000 hectares.
- La zone sahélienne, couvre une superficie de 43% du territoire national et offre une précipitation qui varie de 100 à 600 mm par année. La population pratique une agriculture pluviale et un élevage constitué de petits ruminants. Les cultures favorables sont : le pédiculaire, le sorgho, le berberé, le maïs et le blé pour les céréales ; l'arachide et le sésame pour les oléagineux et des tubercules (manioc, patate douce). Les oignons et les ails sont cultivés dans la région du Ouaddaï, les riz et les produits maraichers sont produits dans le bas fond, les Ouaddis et tout le long du fleuve Chari.
- La zone soudanienne : elle représente 10% de la superficie du pays et reçoit une pluviométrie allant de 600 à 1200 mm par année, c'est une zone de culture par excellence, les cultures vivrières (céréales, légumineuses, oléagineuses et tubercules) et les cultures commerciales (le coton et la canne à sucre) sont pratiquées.

Les températures ne varient pas trop d'une zone à une autre, elles sont marquées par une période relativement froide allant de décembre à février (32°C à 36°C) et une période chaude de mars à juin (39 à 45°C).

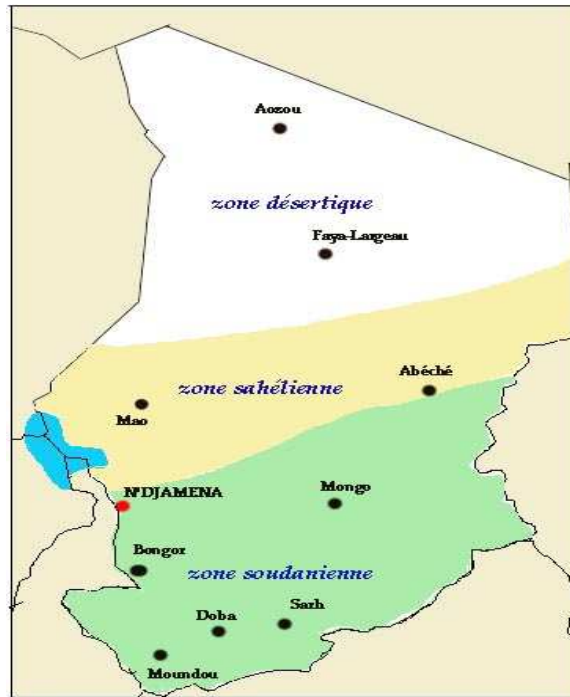


Figure 2-1 : Zones géo-climatiques du Tchad [1]

2.2 Données climatiques du Tchad

La pluie est répartie illégalement dans les différentes zones climatiques. Elle croit du nord au sud avec des proportions très importantes. Par exemple dans la zone désertique, il y a seulement deux mois de pluie par année. Entre juillet août avec une pluviométrie cumulée qui ne dépassent guère 100 mm. Par contre, dans la zone soudanienne, la pluie s'étale sur presque 6 à 8 mois, et atteint jusqu'à 1200 mm. L'humidité de l'atmosphère évolue dans le même sens que la pluie. Par exemple en saison humide (août), elle peut atteindre jusqu'à 80% et elle chute en saison sèche en dessous de 20% [2].

En ce qui concerne les températures, les différences ne sont pas significatives d'une zone à une autre. Par contre en fonction des périodes, l'écart est significatif. Pendant la période fraîche qui s'étale de décembre à février, les températures maximales varient de (32 à 36°C) et à partir du mois d'avril, elles montent en flèche pour atteindre parfois plus de 40°C. De juillet à septembre (saison de pluie), les températures se situent en moyennes au tour de 31°C [2]. Le tableau 2-1 et la figure 2-2 donnent les températures et les hauteurs de précipitations de la ville de Ndjamen (Zone d'étude).

Tableau 2-1 : Moyennes mensuelles des températures et des précipitations pour la période (1971-2010) [1]

	jan	fev	mars	Avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc
Températures moyennes (°C)	32,9	34,9	38,8	41,3	40,4	38,1	34,3	31,6	33,8	37,1	36,2	32,9
Précipitations (mm)	0,00	0,00	0,20	4,14	21,22	45,30	131,17	176,99	73,76	16,95	0,37	0,00

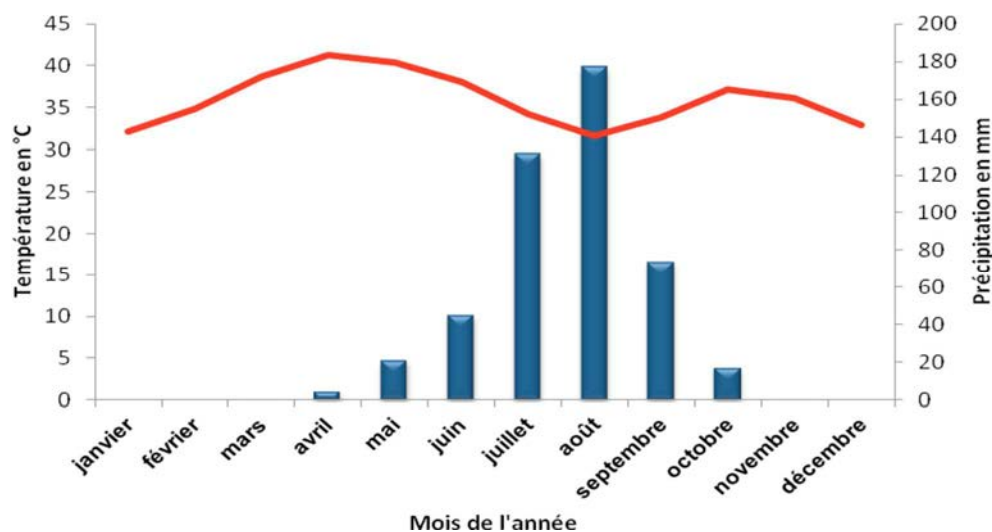


Figure 2-2 : La moyenne des précipitations et des températures de la station de N'Djamena (1971-2009) [1].

2.3 Agriculture au Tchad

Actuellement, le Tchad dispose de tous les indices favorables pour le développement de son agriculture. Une population à 82% rurale et un important réseau hydrographique constitué de deux fleuves, le Logone et le Chari qui alimentent le Lac Tchad. De même, une énorme réserve en eau sous terrain estimée entre 263 à 455 milliards de m³ exploitable par année.

La superficie irrigable au Tchad est évaluée à 335 000 ha, dont 30 000 ha sont aménagés pour pratiquer l'irrigation moderne. 3000 ha ont bénéficié de stations de pompages pour pratiquer une double culture. Environ 2000 ha sont irrigués dans des zones aménagées par des investisseurs privés tchadiens. Souvent les cultures de riz et d'oignon sont concernées par l'irrigation. Au Tchad la zone sahélienne et la zone soudanienne produisent :

- Des céréales : sorgho, mil, berbéré, maïs, fonio (éleusine), riz de bas fond et de plaine, blé ;
- Des oléagineux : arachide et sésame ;
- Des racines et tubercules : manioc, igname, patate douce, taro ;
- Des légumes : oignon, ail, haricot ; niébé, piment gombo, tomates oseille, soja ;
- Des fruits : agrumes, dates, mangues et goyaves.

Le coton, la canne à sucre et le tabac sont considérés comme culture de rente. Ils sont cultivés dans la zone soudanienne.

La canne à sucre et le coton sont des cultures à dimension industrielle. Dans le temps, la gomme arabique et la noix de Karité constituaient également une exportation promoteur.

En général, 39 millions d'hectares sont favorables à l'agriculture au Tchad. Il représente 30% de la superficie totale et 5,6 millions d'hectares de terres irrigables. En effet, les 2/3 de la zone cultivable se trouvent en zone sahélienne et le 1/3 en partie soudanienne [2]. Les cultures vivrières restent dominantes et occupent des surfaces agricoles importantes, (voir tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Les campagnes agricoles de la production céréalière de 1992-1993 à 1996- 1997 de l'ensemble du pays [3]

Années	Mil	Sorgho	Riz	Maïs	Blé	Berbère	Fonio	Total
1992/93	293433	386 934	108 211	87 424	2 400	97 808	1 000	977 210
1993/94	212 094	243 350	23 104	61 076	2 006	75 328	210	617 168
1994/95	319 698	480 720	90 548	158 896	2 932	121761	314	1 174 869
1995/96	227 715	437 448	78 978	62 537	2 643	97711	285	907 317
1996/97	257 631	352 517	97728	74 631	2 650	91629	952	877 738

Toutes ces cultures génèrent des résidus qui sont (les tiges de mil, de sorgho, de maïs, épillets et balle de sorgho, paille de riz, tiges et grains de coton, fane d'arachide et de niébé, etc.). Les résidus cultureux sont destinés à plusieurs usages, entre autres : la construction d'habitation et de parcs à bétail, la cuisson ou le chauffage, et surtout pour l'alimentation des animaux domestiques en saison sèche. La productivité de résidus cultureux (pailles et feuilles) est estimée à environ 128 000 tonnes par an. En ce qui concerne les autres résidus cultureux tels

que la paille de riz, nous n'avons pas la totalité des données. (Le tableau 2-3 présente uniquement les données de Ndjamena) [2].

Tableau 2-3 : Production de graines, de paille, les superficies et rendement de riz à N'Djamena [4]

Villages	Superficie (ha)	Rendement pluvial (t/ha)	Rendement contre saison (t/ha)	Production des graines (t)	Production de paille (t)
Mara	27	4,5	5,7	275,4	457,2
Droh Gana	29,5	5,8	7,4	389,4	646,4
Ndjam/Fara	33	7,3	-	240,9	399,9
Sagour	37,5	3,9	-	146,25	242,8
Medekine	31	4,3	-	133,3	221,3
Ambedane	30,25	5,3	6,8	366	607,8
Zafaya	30,5	5,6	7,5	399,5	663,25
Total	218,75	5,4	6,8	1950,75	3238,25

2.3.1. Culture de riz

La culture de riz est l'une des plantes annuelles la plus ancienne. Elle est apparue en Asie depuis quelques 40 millions d'années. C'est un produit vivrier, domestiqué depuis 9000 ans en Asie et 4000 ans en Afrique. La culture de riz la plus pratiquée est du genre « Oryza ». Il existe deux variétés [5]:

- Oryza Sativa provenant d'Asie, elle est la culture la plus pratiquées dans le monde ;
- Oryza Glaberrima, originaire d'Afrique, elle est cultivée uniquement sur ce continent.

L'avantage de la culture de riz est qu'elle produit sur tous les continents en zones humides. Quand la culture se trouve constamment dans l'eau, elle est appelée riz aquatique. Si cette eau est gérée par des digues, des canaux, elle est appelée culture irriguée. La culture est appelée pluviale, lorsqu'elle pousse sous la pluie [5] (figure 2-3).



Figure 2-3 : Culture de riz

2.3.2. Production de riz dans le monde

La culture de riz dans le monde s'élève à 650 millions de tonnes de riz paddy. Elle génère une quantité importante de paille. Le continent asiatique exploite lui seul, 92 % de surface totale rizicole mondiale [6].

Dans la plupart des pays qui pratiquent la culture de riz, la paille est brûlée ou enfouie pour fertiliser les parcelles.

En Inde 42 millions d'hectares sont exploités pour une récolte de 110 millions de tonnes de riz. Toute la paille provenant de cette culture est brûlée afin de s'en débarrasser et de préparer les sols pour la culture de blé qui vient juste après la récolte de riz.

Depuis 1991, l'Etat Californien incite les riziculteurs à cesser la pratique du brûlis de la paille de riz pour s'orienter vers d'autres voies de valorisation hors champ.

En France, la culture de riz est estimée en moyenne à 18 000 ha par an sur les 10 dernières années. Une grande partie de cette culture est pratiquée en Camargue. Comme dans les autres pays, la paille de riz est brûlée ou enfouie dans le champ [6].

Dans le cadre de la recherche, d'autres débouchés pour la valorisation des pailles de riz produites en Camargue sont envisagées [6] :

- utilisation de la paille de riz pour l'élevage (litière et nourriture animale) ;
- la construction des habitations ;
- valorisation énergétique ;
- fabrication de pâte à papier.

2.3.2.1.Elevage

Pour l'alimentation animale, en 2006, les agriculteurs n'ont pas apprécié cette option compte tenu de la présence de taux élevé de silice dans la paille de riz et ils déclarent : « ça ne vaut rien en litière ou en alimentation ». En France les éleveurs utilisent la paille de riz pour les animaux uniquement en cas de déficit de nourriture.

La bibliographie indique que dans certains pays comme le Niger, le Vietnam ou le Mali, les pailles de riz sont utilisées en complément fourrager. Un mélange mélasse-urée peut être ajouté pour augmenter la digestibilité des pailles.

2.3.2.2.Litière

Selon les agriculteurs, l'utilisation de paille de riz ne convenait pas pour la litière animale, à cause de la présence de silice élevée (faible pouvoir absorbant ; fumier plus lourd, se décomposant moins bien). Exception faite, en alternant les couches de pailles de blé et de paille de riz.

2.3.2.3.Biocombustion [7]

La valorisation des pailles de culture dans la production énergétique est très modeste en France. En ce moment, seulement 3% du gisement de paille de riz sont orientés vers ce secteur. Les informations obtenues dans la littérature portent sur la paille de blé, qui est valorisée énergétiquement. Les chaudières à paille sont rares en France. En février 2008, la première chaudière collective à paille a été inaugurée dans les HLM de la commune de Droué. « Un hectare de blé fournit 13 fois plus d'énergie que n'en a nécessité sa culture et une tonne de paille restitue 6 à 7 fois plus d'énergie que n'en requiert sa fabrication ».

Le commissariat de l'énergie atomique de Valduc (Côte d'Or) a mis en place une chaudière mixte (bois-paille) pour le chauffage de ses locaux. Cette installation permet d'économiser environ 2000 tonnes de fuel lourd, 6000 tonnes de CO₂ et 20 tonnes de soufre.

2.3.2.4.Bioconstruction

Les premières constructions avec de la paille de riz remontent en 1850 aux Etats-Unis (Nebraska). La plus ancienne habitation française en paille date de 1921. La paille de riz est utilisée de différentes manières dans la construction (mélangée avec de la terre, en bottes de paille ou sous forme de panneaux). La valorisation de la paille dans la construction affiche une motivation des constructeurs pour sa disponibilité et sa faible émission de CO₂.

Des architectes ont contacté des riziculteurs. Ils sont intéressés par l'utilisation de la paille de riz dans des chantiers « bioconstructions ». A ce niveau le problème de la paille se situe au niveau réglementaire. Elle ne bénéficie pas d'une garantie décennale. Elle souffre également d'une portée psychologique : sensible au feu, faible résistance aux attaques des insectes.

Le DTU (Document Technique Unifié) existe et permet de garantir la solidité de la structure, dans le cas de construction en paille. Le CEBTP (Centre expérimental de recherche et d'études du bâtiment et des travaux publics) et l'association ARCANNE ont réalisé le premier test sur le matériau paille dans la construction. Ces travaux ont bénéficié du financement de la Fédération française de bâtiment et de l'ADEME. Les résultats sont satisfaisants au niveau de l'isolation (thermique et acoustique), ainsi que sa résistance au feu. La paille de riz contient de la silice, ce qui permet à cette dernière d'être moins sensible à la pourriture.

L'architecte Marchal a procédé à la conception et à la réalisation de maisons écologiques en paille de riz. « Un bureau faisant office de showroom et une maison ont été inaugurés à Mont Ferrier-sur-Lez, en 2008 ». Le RFCP (Réseau Français de Construction en Paille) élabore un cahier de clauses techniques sur la construction en paille, ainsi qu'un AT (Avis technique) sur l'utilisation de paille comme matériau isolant. La rédaction des règles professionnelles de construction en paille est coordonnée par Luc Floissac, chercheur à l'Ecole d'Architecture de Toulouse.

2.3.3. Production de riz au Tchad

Le riz est cultivé au Tchad depuis les années 1950 par l'administration coloniale. Depuis lors sa culture n'a cessé de progresser [8]. Elle évolue comme suit : 36 000 ha en 1990-1991, on est ainsi passé à 90800 en 1999-2000. La production de riz a connu une progression semblable (66 000 t de riz paddy en 1990-1991, à 138 000 t en 1999-2000). Le rendement passe de 0,8 t/h en 1990-1991 à 2,5 t/ha en 2000-2001.

La production annuelle du riz est estimée à 137 000 tonnes sur une superficie exploitable de 111 000 ha. Elle occupe le 5^e rang des cultures céréalières au Tchad.

Une superficie de 15648 ha est aménagée pour la production de riz. Une surface 2500 à 3000 ha est sous la maîtrise totale et à peu près 12 500 ha en maîtrise partielle. Ce secteur occupe 30 000 producteurs. Le potentiel irrigable, ainsi que les aménagements réalisés sont présentés et résumés dans le tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Culture irriguée de riz au Tchad

Zone	Potentiel irrigable identifié (ha)	aménagement réalisé en 1979	aménagement réalisé en 2008
Zone Sahélienne	200 400		
Lac Fitri	15 000		
Bahr Azoum	10 000		
Moyenne Vallée du Chari (N'djaména)	60 000		
Moyenne Vallée du Logone (Malo)	5 400		
Lac Tchad	90 000		
Zone soudanienne	134 600		
Vallée du Chari (Guelendeng-Sarh)			
Vallée du Logone (Bongor-Doba-Moundou)		4835 (casier A, B, C, OMVSD, Koyom)	8185 (Casier A, B, C, aménagement taïwanais, aménagements zone Kim)
total	335 000	4835	10813
totales superficies aménagées: 1979-2008 (ha)		15648 (ha) soit 4,67 % du potentiel	

Nous présentons également les données rizicoles du Tchad sur les deux zones climatiques (zone sahélienne et zone soudanienne) (tableau 2-5).

Tableau 2-5 : Production du riz de 2010/2011 à 2015/2016 au Tchad [9]

Avec S : Superficie (ha) ; R : Rendement (kg/ha) ; P : Production (t)									
Campagne agricole	zone sahélienne			zone soudanienne			Total		
	S	R	P	S	R	P	S	R	P
2010/2011	15062	11200	45054	123138	9031	141064	138740	20231	186118
2011/2012	7330	13920	19994	113461	9192	152693	120791	23112	172687
2012/2013	11439	14074	27256	134121	9883	161656	145560	23957	161656
2013/2014	12576	15001	32181	202570	10451	346064	215146	25452	378246
2014/2015	20172	8833	36111	173545	10878	268000	193717	19711	304112
2015/2016	23329	12706	37966	148683	8820	205513	172012	21526	243478

Au Tchad, les possibilités de valorisation de paille de riz sont limitées par les moyens financiers et le développement technologique. Elle ne sera valorisée que dans deux domaines :

- Elevage (nourriture et litière) : Pour les animaux, la paille de riz n'est pas intéressante ni pour l'alimentation ni pour la litière. Les agriculteurs ont déclaré, je cite « la paille

de riz n'apporte pratiquement rien comme énergie aux animaux, en plus elle n'est pas appétissante ».

- Construction : La voie de valorisation dans la construction semble beaucoup plus prometteuse.

Cette option cadre bien avec notre travail de recherche. La paille de riz sera valorisée dans la construction. Elle sera écrasée à des dimensions allant de 3 à 6 cm et mélangée avec de l'argile pour fabriquer les blocs de terre compressés (BTC).

2.4. Choix du liant

Nombre d'éléments de stabilisation et de renfort sont utilisés dans la construction pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité. A partir des données bibliographiques, nous allons choisir un liant de stabilisation de nos matériaux s'appuyant sur des critères mécaniques, économiques et environnementaux.

Par définition, un liant est un produit qui sert à agglomérer en masse solide des particules solides sous forme initiale de poudre ou de granulats.

2.4.1. Différents liants couramment utilisés

Deux types de liants sont couramment utilisés dans la préparation des bétons et des mortiers (C.Maginot, 2010)[11] :

- Les liants hydrauliques, sous forme de poudre. Mélangés à l'eau, il se forme une pâte qui prend prise et durcit à l'air libre ou dans l'eau. Les liants minéraux tels que le ciment et la chaux hydraulique naturelle ont pour code produit NHL.
- Les liants aériens sont également des liants minéraux. Mélangés à l'eau ils forment une pâte plastique. La prise et le durcissement se font à l'air libre grâce au dioxyde de carbone de l'air. Il s'agit de la chaux grasse et de la chaux aérienne éteinte utilisées dans le bâtiment. Son code produit est CL, anciennement CAEB.

Le mortier de chaux grasse fait prise en contact avec de l'air. Il durcit en surface et reste souple à l'intérieur de la maçonnerie. Cette qualité en fait un mortier qui reste élastique et donc qui ne fissure pas. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques, mais il ne doit pas être utilisé en milieu humide (cave, mur souterrain, etc.).

Le mortier de chaux hydraulique est fabriqué à partir de calcaires argileux. Il fait sa prise aussi bien en contact avec l'air ou sous l'eau. Il est employé en maçonnerie traditionnelle de

pierres ou de briques. Il a deux avantages : le mortier de chaux hydraulique est perméable à la vapeur d'eau. Il peut donc réguler l'humidité ambiante. Il est également plus flexible que le mortier de ciment. Sa mise en œuvre est lente et exige des conditions de températures et d'hygrométrie plus étroites (néanmoins courantes en zone tempérée).

Le mortier de ciment est plus résistant que les mortiers de chaux mais il reste imperméable à l'air. Par conséquent, il maintient l'humidité dans une maçonnerie traditionnelle de pierres qui doit toujours être aérée. Ce mortier doit être utilisé uniquement pour la maçonnerie des blocs de bétons ou autrement dit de parpaings en ciment. Sa rigidité en fait un matériau qui a tendance à fissurer sous l'action des écarts de température, notamment alternances gel et dégel, tandis que son imperméabilité l'expose aux moisissures. En revanche, il est plus facile, rapide, et tolérant à mettre en œuvre.

Le mortier bâtard (le mélange de ciment et de la chaux) permet d'avoir un ciment qui respire un peu sans trop absorber l'eau ; il convient bien pour crépir et ne se fissure pas comme un ciment fort. De plus, la chaux augmente le pouvoir collant du mortier, ce qui est appréciable en enduit vertical.

2.4.1.1.Problème environnemental causé par la fabrication du ciment

Le ciment portland est le liant le plus utilisé dans le domaine de la construction malgré ses effets négatifs sur l'environnement. En particulier, à cause de l'émission de gaz à effet de serre associée à sa production

La fabrication industrielle du ciment dégage 5% de CO₂ dans l'atmosphère et consomme 2% de l'énergie primaire totale [10]. Cet impact environnemental devient de plus en plus inquiétant et des plaintes sont adressées à l'endroit des industries cimentières, imposent aux fabricants de revoir leurs méthodes d'élaboration. Une solution pourrait être la réduction du ratio clinker/ciment [11]. Ces dix dernières années, l'émission de CO₂ de ciment a diminué. En 2006, la tonne de ciment produisait 660 kg de CO₂ dans l'atmosphère dans le monde [12], contre 890 kg en 1990 [13].

D'après Gartner [14], les liants alternatifs qui semblent les plus prometteurs sont :

- **les pouzzolanes activées par de la chaux aérienne** : pour ce liant, le problème se trouve au niveau de la cinétique des réactions, il en résulte d'un durcissement lent, donc incompatible pour une utilisation dans le bâtiment.

- **les pouzzolanes activées par des silicates alcalins** : également appelé géo-polymères. Ce type de liant provient de la réaction des pouzzolanes riches en aluminium (comme le métakaolin) et des solutions aqueuses de silicates alcalins. L'utilisation de ce liant donne un durcissement rapide et une résistance élevée. Son inconvénient se trouve au niveau de la réaction de géopolymérisation qui demande cependant une température de cure élevée alors que l'ouvrabilité de la pâte est relativement courte ;
- **les ciments sulfoalumineux** : fabriqués à base de sulfoaluminates de calcium. L'hydratation de ce ciment se fait en combinant avec de CASH, CAH et AH mais le phénomène « d'expansion lié à la formation d'ettringite pose problème »,
- **les laitiers activés par du gypse et de la chaux** : c'est l'application connue des mélanges sulfoalumineux. La réaction d'activation concerne un faible taux de ciment ou de chaux dans un mélange de laitiers et de 10 à 20% de gypse. La cinétique de croissance des résistances de ces mélanges reste lente et le développement rapide de la carbonatation conduit à des problèmes de corrosion et de baisse de résistance ;
- **les plâtres** : ce sont des liants obtenus à partir de gypse. Ils sont généralement utilisés pour enduire les murs. Son utilisation à la place de clinker donne une faible durabilité dans l'ambiance extérieure à cause de sa forte solubilité de gypse. De même, son stockage en fin de vie pose problème (déchets non inertes et difficilement recyclables).

Pour préserver l'environnement, nous proposons d'étudier le comportement d'un matériau stabilisé par un liant végétal « la gomme arabique ». Il s'agit de biomasse, qui peut être utilisée en remplacement de liants minéraux. La gomme arabique est un produit disponible et sans problème environnemental.

Dans la partie suivante, nous développons les différents atouts de la gomme arabique pour une meilleure compréhension, en vue de son utilisation en substitution des liants minéraux dans la construction.

2.4.2. La gomme arabique

La gomme arabique est la plus connue et la plus utilisée parmi les autres gommes (figure 2-4). Elle est nommée « kami » par les égyptiens qui l'utilisaient depuis 2650 avant JC. La gomme arabique a servi pour assurer la cohésion des bandages des momies [15]. Les piroguiers européens ont pour la première fois utilisé la gomme arabique comme nourriture sur les côtes du Sénégal et de la Mauritanie actuelle en XV^e siècle. La France a obtenu le monopole de la gomme arabique suite à une guerre sanglante au XVIII^e siècle.



Figure 2-4 : gomme arabique

2.4.2.1. Provenance de la gomme arabique

La gomme arabique est une variété, obtenue par un exsudat de sève solidifiée (figure 2.4). Il consiste à créer une blessure sur le tronc et les branches des acacias par (incision ou arrachement de l'écorce). Plus le nombre d'incisions augmente, meilleur est le rendement. Elle est produite généralement en Afrique saharienne (Egypte, Maghreb, Mali, Nigéria, Soudan, Tchad...etc.) et sa récolte s'effectue entre décembre et juin.

2.4.2.2. Les propriétés de la gomme arabique

La gomme arabique est un polysaccharide acide fortement ramifié qui se présente sous la forme de mélanges de sels de potassium, de magnésium et de calcium. Les éléments monomères de l'acide libre (acide arabique) sont les : D-galactose ($C_6H_{12}O_6$), L-rhamnose ($C_6H_{12}O_5$) et acide D-glucuronique ($C_6H_{10}O_7$).

Les gommés arabiques se composent au minimum de deux fractions de polysaccharides de structures différentes. La fraction de masse moléculaire supérieure contient une part d'acides aminés modeste mais déterminante pour ses propriétés. Environ 2% de la gomme arabique est une protéine qui est riche en hydroxyprolyl, prolyl et seryl [16]. Sa composition chimique varie légèrement avec la source, le climat, la saison, l'âge de l'arbre, etc. Les données analytiques sont données dans le (tableau 2-6).

Tableau 2-6 : Caractérisation de gomme arabique originaire d'Acacia seyal et Acacia Sénégal [17]

Paramètres	Acacia Sénégal	Acacia seyal
Galactose (%)	44	38
Arabinose (%)	27	46
Rhamnose (%)	13	4
Acide glucuronique (%)	14.5	6.5
Acide 4-O-méthyl-glucuronique	1.5	5.5
Azote (%)	0.36	0.15
Rotations spécifiques (degrés)	-30	+51
Masse moléculaire moyenne (kDa)	380	850

La gomme arabique est commercialisée sous la forme de poudre ou de cristaux non moulus, plus ou moins ronds, de couleur jaune pâle à jaune brunâtre. La surface extérieure des cristaux est mate et fendillée et leur cassure est vitreuse. La gomme est fade, inodore et sa couleur à l'état étant ne permet pas de prévoir la couleur de la solution.

2.4.2.2.1. Solubilité et viscosité

La gomme arabique est insoluble dans la plupart des solvants organiques et également dans l'huile. Elle est lentement soluble dans la glycérine et complètement soluble dans l'eau.

La viscosité de la gomme dépend de sa variabilité. Elle est faible pour la gomme arabique. La gomme arabique est utilisée comme émulsifiant dans les industries de la saveur et de l'huile essentielle. Selon Randall [18], l'AGP (arabinogalactane-protéine complexe) représente le composant essentiel pour stabiliser les émulsions par combinaison de la composante de protéine amphiphile AGP avec la surface de gouttelettes d'huile. Tandis que la fraction d'hydrate de carbone hydrophile est orientée vers la phase aqueuse, empêchant l'agrégation des gouttelettes par répulsion électrostatique.

2.4.2.2.2. Toxicité

La gomme arabique est un produit non toxique et non inflammable. Par contre si elle est en poudre, la gomme arabique provoque de l'asthme en passant dans les narines.

Les propriétés physico-chimiques de la gomme arabique d'Acacia Sénégal qui servent de paramètres de qualité internationales sont présentées dans le tableau 2-7.

Tableau 2-7 : Spécifications internationales de qualité de la gomme arabique [19]

Propriétés	Valeur
Humidité (%)	13-15
Teneur en cendres (%)	2-4
Energie interne (%)	30-39
Matières volatiles (%)	51-65
Rotation optique (degré)	(-26)-(-3)
Teneur en azote (%)	0.26-0.39
Composition cationique de cendres totales à 550°C	
Cuivre (ppm)	52-66
Fer (ppm)	730-2490
Manganèse (ppm)	69-117
Zinc (ppm)	45-111

2.4.2.3. Utilisation de la gomme arabique

Dans les pays de production, la gomme arabique est utilisée en pâtisserie, pour le traitement des textiles ou à des fins médicinales (maladie de peau, dysenterie, blessures, lèpres...).

Mélangée avec de l'argile et de l'eau, la gomme arabique sert à imperméabiliser les toitures. Mélangée avec de la chaux, elle est utilisée pour peindre les murs de la maison.

La gomme arabique est normalisée en Europe comme l'épaississant alimentaire avec son code alimentaire E 414 [20, 17, 15].

2.4.2.4. La Production et le commerce de la gomme arabique

L'Afrique a exporté en 12 ans, un surplus de 14 000 tonnes de gomme arabique brute vers l'Amérique, l'Europe et l'Asie. Elle constitue une hausse de 28%, voir la figure 2-5.

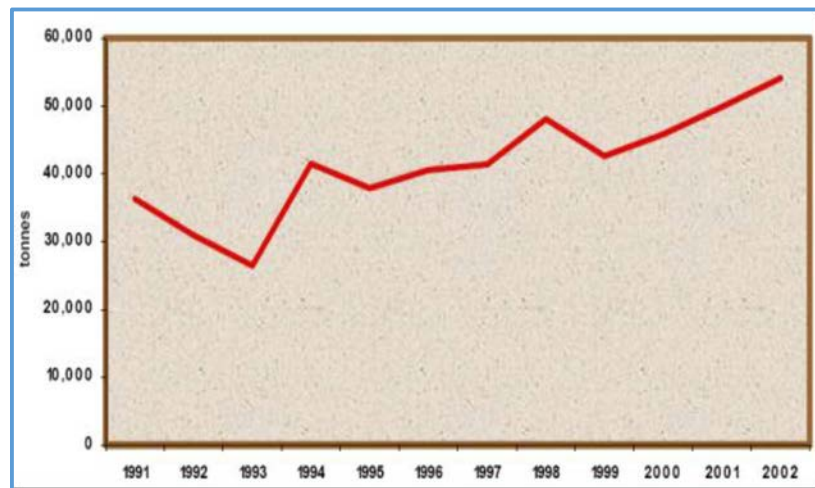


Figure 2-5 : Exportation de Gomme arabique brute d'Afrique [21]

Les pays producteurs de gomme arabique sont le Soudan, le Nigeria et le Tchad qui exportent eux seuls 95% de la gomme arabique pour le marché mondial. Le Soudan dépasse 50% d'exportation sur le marché mondial et l'exportation du Nigeria avoisine les 20%. Le Tchad rehausse sa production qui passe de 10% à 25% en dix ans (1991-2002). Ce qui permet au à ce dernier d'occuper la deuxième place sur l'exportation de la gomme arabique après le Soudan. Les autres pays africains partagent le 5% restants.

La France est toujours à la tête des pays importateurs et ré-exportateurs de gomme arabique dans le monde (voir figure 2-6).

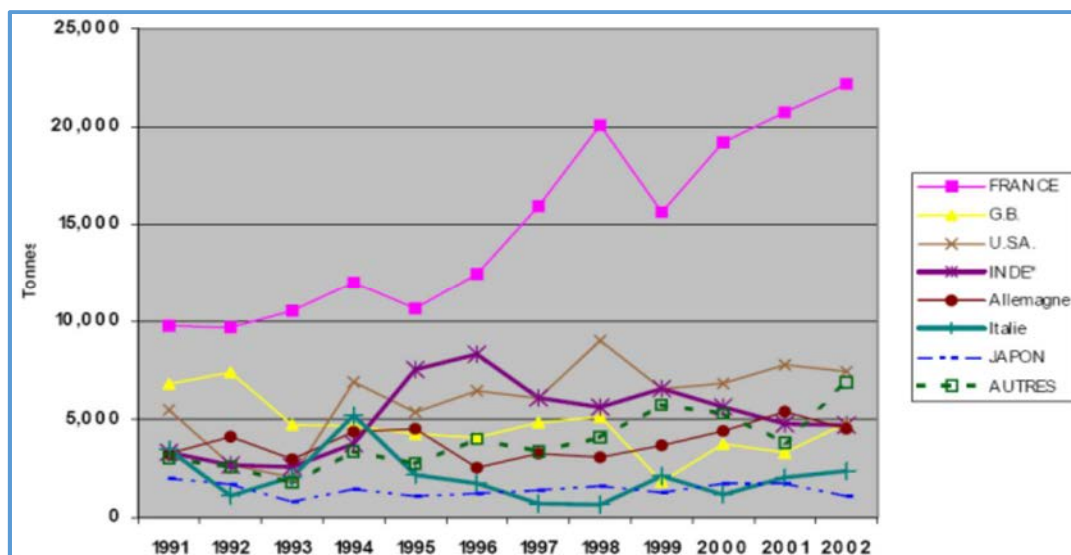


Figure 2-6 : Importation de gomme arabique par pays [21]

Par ailleurs, la France occupe la première place sur l'importation à hauteur de 40% de gomme arabique brute sur une période de 10 ans. Suivie par les autres pays tels que le royaume uni avec 10%, l'Italie et l'Allemagne se partagent 10%. De même, les Etats Unies, le Japon et l'Inde partagent 25% du marché. Le Tchad met en place des partenariats commerciaux avec plus de 12 pays dans le commerce de la gomme arabique. Par contre le Soudan développe des relations commerciales avec plus de 30 pays. Au Nigeria la production de gomme arabique a baissé suite à la menace terroriste Boko haram. Elle développe un partenariat commercial avec moins de 10 pays.

Les industries liées à la gomme arabique sont situées en Europe. Principalement en France, en Allemagne et au Royaume-Uni. Ces trois pays ont réexporté plus de 25 000 tonnes de gomme arabique en 2002. La France à elle seule a mis au marché plus de 48% de gomme arabique réexportée dans le monde. Le reste est partagé entre le Royaume-Uni, l'Allemagne, les Etats Unis et les autres pays européens.

2.5. Conclusion

Dans nos travaux de recherche, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'environnement, nous avons choisi les matériaux locaux, sains et biodégradables en fin de vie. Il s'agit de l'argile, de la paille de riz, de la gomme arabique et du sable.

Dans cette partie, nous avons présenté les potentialités de paille de riz et son usage dans le monde en général et au Tchad en particulier. D'abord, la paille de riz est disponible en quantité suffisante au Tchad. Pour la nourriture des animaux, la paille de riz n'est pas nutritive et n'est

pas non plus appétissante. Pour sa valorisation industrielle, son taux élevé de cendre constitue un frein. Par conséquent, l'orientation de la paille de riz vers la construction est bien justifiée.

Nous avons également présenté les potentialités en gomme arabique. Son utilisation comme liant dans la construction est rendue possible grâce à sa substance collante qui permet d'enrober les grains pour les assembler et former un bloc résistant. Les liants minéraux ont montré leurs preuves dans la construction pour améliorer les caractéristiques mécaniques et la durabilité. En ce qui concerne les matériaux (gomme arabique et paille de riz), il est nécessaire de préparer des éprouvettes et de procéder à des mesures de caractéristiques mécaniques, thermiques et de durabilité pour confirmer leurs utilisations dans le bâtiment. Ceci est notre objectif majeur dans ce travail de recherche.

2.6. References bibliographies

- [1] Hamit A, Moumtaz R : Etude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad), 28-29, vol 324, 2012.
- [2] Kaou B. Rapport de synthèse sur le système agriculture-élevage au Tchad, 12 p, 1997 ;
- [3] DSEED/ONDR. Direction de la Statistique des Etudes Economiques et Démographiques/L'Office National du Développement Rural, 1997 ;
- [4] ADER : Action pour le développement rural, 1997 ;
- [5] CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, février 2002 ;
- [6] Christelle M, Jean-Claude M & Roy H : riziculture Camarguaise. La paille de riz. Pratiques au champ et filières de valorisation pour un développement durable. Etats des lieux, retours d'expériences débat participatifs, voies de valorisation. Page 36, 2009 ;
- [7] Bodineau L, Pouet J C, ADEME, 2006 : Etude bibliographique sur la combustion de produits issus de culture annuelle (blé, paille, maïs), page 73, 2006 ;
- [8] Moundibaye D A, Gaourang D, Mbanguio K. Analyse de contraintes paysannes et amélioration variétale participative avec les riziculteurs de Mala-Lai au Tchad. Acte du colloque, 27-31 mai 2002, Garoua, Cameroun ;
- [9] DSA/DPAS. Division de la statistique agricole et Direction de la production agricole et de la statistique, 2016) ;
- [10] Hendriks C A . Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry C.A. Hendriks, E. Worrell, D. de Jager, K. Blok, P. Riemer Greenhouse, gases control technologies conference, Août 2004;

- [11] Maginot C. Mémoire de thèse à Toulouse. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, v 343, 2010,;
- [12] Cement Industry Energy and CO₂ performance “Getting the numbers right” Publication of World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 30 juin 2009;
- [13] Toward a sustainable cement industry Publication of World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), mars 2002;
- [14] Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements E. Gartner Cement and Concrete Research, Volume 34 (2004) 1489-1498;
- [15] Whistler R.L, BeMiller J.N. Industrial gums: polysaccharides and their derivatives, 3rd ed. Academic Press, San Diego, CA, 1993;
- [16] Al-Assaf, S., Phillips G.O., Williams P.A., 2005a. Studies on acacia exudate gums. Part I: the molecular weight of Acacia Senegal gum exudate. Food Hydrocolloids 19, 647–660;
- [17] Phillips G.O., Williams P.A., 2000. Gum Arabic, in: Handbook of Hydrocolloids. Woodhead Publishing in Food Science, Technology and Nutrition, pp. 155–168;
- [18] Randall R.C., Phillips G.O., Williams, P.A., 1988. The role of the proteinaceous component on the emulsifying properties of gum Arabic. Food Hydrocolloids 2, 131–140;
- [19] FAO, specifications for identity and purity of certain food additives. Food and Nutrition Paper 49;
- [20] Montenegro M.A., Boiero, M.L., Valle, L., Borsarelli, C.D. Gum Arabic: More Than an Edible Emulsifier, in: Verbeek, C. (Ed.), Products and Applications of Biopolymers. InTech, 2012 ;
- [21] Muller D., Okoro C. Production and marketing of Arabic gum. NGARA Publication Séries 2. 2004;

**CHAPITRE 3 : CARACTERISATION
EXPERIMENTALE DES MATERIAUX D'ETUDE**

3.1.Introduction

L'état de l'art présenté dans les paragraphes précédents a mis en évidence l'importance des caractéristiques physiques et chimiques des matériaux de base quant au comportement final de nos matériaux destinés à la construction des habitations. Nous nous intéressons plus particulièrement à la détermination des caractéristiques mécaniques, thermiques ainsi qu'à la durabilité des matériaux pour valider leur utilisation comme matériau de construction.

Pour les essais mécaniques (compression et traction) nous avons utilisé des éprouvettes de dimension normalisée 4 x 4 x 16 cm et des blocs de BTC de dimension 30 x 15 x 8 cm. Les mesures de conductivité thermique sont également réalisées sur des blocs normalisés, cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur. L'influence de la paille de riz et de la gomme arabique sur les caractéristiques mécaniques et thermiques est mesurée sur plusieurs formulations comportant de l'argile, de la gomme arabique, de la paille de riz et du sable.

3.2.Matériaux utilisés

Les matériaux de base utilisés pour confectionner les différentes éprouvettes sont : la terre argileuse, le sable de grosseur moyenne, la gomme arabique et la paille de riz qui proviennent du Tchad.

3.2.1. Les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux d'étude.

3.2.1.1.Caractéristiques physiques de la terre argileuse

La terre est le premier matériau de construction utilisé par l'homme. Elle est disponible partout dans le monde et obtenue à tarif réduit. A Ndjama le sol est argileux et lors de constructions d'infrastructures, de l'argile est décapée et mise en décharge. Ce gisement représente des volumes importants qui, même entassé, occupe une surface au sol importante dans la plupart des arrondissements. La valorisation de ce matériau permettrait de libérer ces arrondissements tout en créant des emplois aux riverains.

Les caractéristiques physiques sont déterminées à partir des essais géotechniques dans le but de proposer une classification à notre terre argileuse.

Un sol est constitué des grains solides, d'air et d'eau. Les différentes grandeurs sont notées comme suit (figure 3-1).

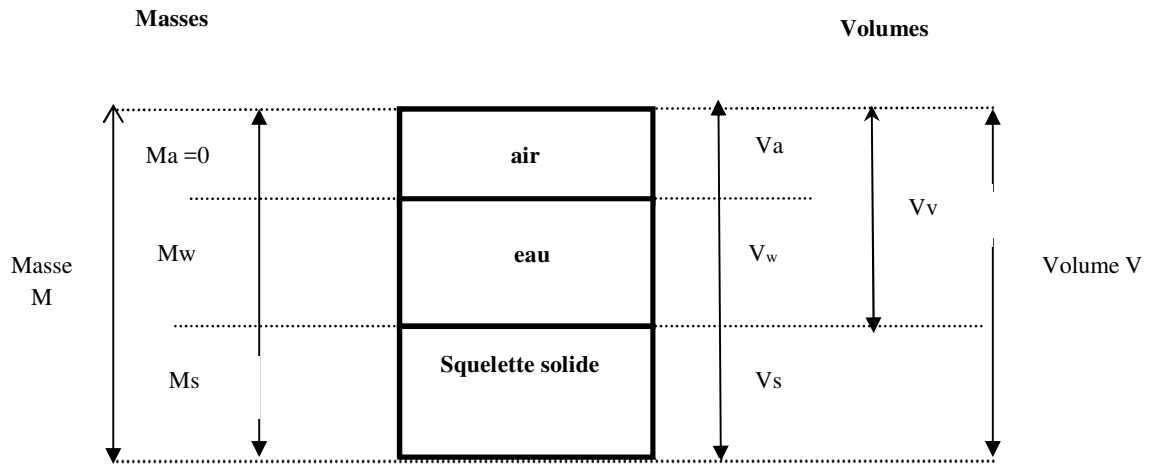


Figure 3-1 : Masses et volumes des constituants d'un sol

La nomenclature

$$V_V = V_a + V_w \quad (3.1)$$

$$V_T = V_V + V_S \quad (3.2)$$

$$M_T = M_w + M_S \quad (3.3)$$

Avec :

Les paramètres d'état

Ces paramètres indiquent dans quelles proportions existent les différentes phases d'un sol.

$$\text{La teneur en eau : } W(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Indice des vides : } e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.5)$$

$$\text{Le degré de saturation : } Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (3.6)$$

$$\text{La porosité : } n = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.7)$$

Tous ces paramètres ne sont pas indépendants. Ils sont reliés par des relations que l'on peut retrouver à l'aide du modèle élémentaire.

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{(1+w)} = \frac{\rho_s}{(1+e)} \quad (3.8)$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (3.9)$$

3.2.1.1.1. Essai de la teneur en eau

La quantité d'eau liquide présente dans un échantillon de sol est déterminée par étuvage selon la Norme NF P 94 050 [1].

3.2.1.1.1.1.Principe

Un échantillon prélevé est placé dans une tare et pesé (M_h). Ensuite il est introduit dans l'étuve pour séchage pendant 24 h à 105 °C. Une fois sec, il est de nouveau pesé (M_s). La masse de l'eau est déduite et la teneur en eau est calculée selon la relation 3.10. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3-1.

$$\text{La teneur en eau : } W (\%) = 100 \times \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (3.10)$$

Tableau 3-1 : Teneur en eau naturelle

échantillons	1	2	3	4
Tares (g)	22,35	22,26	22,56	22,59
Mh (g)	67,15	75,47	68,4	71,8
Ms (g)	62,59	70,24	63,8	66,9
Mw (g)	4,56	5,23	4,6	4,9
W (%)	11,33	10,90	11,15	11,05

3.2.1.1.2. Masse volumique des grains solides

La masse volumique de notre échantillon est mesurée conformément à la norme NF P 94-054 [2] avec un pycnomètre à eau. Cette méthode utilise des particules solides de sol dont la taille n'excède pas 2 mm de diamètre. La procédure est décrite dans le paragraphe 3.2.1.1.2.1.

3.2.1.1.2.1.Procédure d'essai au pycnomètre

- Le pycnomètre et son bouchon sont pesés (m_1), (figure 3-2) ;
- L'échantillon est introduit dans le pycnomètre et pesé avec le bouchon (m_2) ;
- Le pycnomètre est rempli d'eau distillée, jusqu'au repère. L'ensemble est agité pour obtenir un mélange homogène et pesé, après avoir laissé échapper toutes les bulles d'air (m_3) ;
- Enfin, le pycnomètre est vidé, nettoyé, séché et rempli d'eau jusqu'au repère de bouchon puis pesé (m_4).

La masse volumique est obtenue à partir de l'expression de la relation (3.11).

$$\rho_s = \rho_w * \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)} \quad (3.11)$$



Figure 3-2 : Pycnomètre à eau vide

La masse volumique des particules solides est obtenue en faisant la moyenne arithmétique de cinq mesures effectuées sur un échantillon de sol. Les valeurs de masse volumique sont présentées dans le (tableau 3.2).

Tableau 3-2 : Masse volumique de l'argile

Echantillons	1	2	3	4	5
ρ_s (kg/m ³)	2410	2480	2460	2402	2496

3.2.1.1.3. La granulométrie

L'essai a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles qui constituent un matériau (argile, limon, sable, gravier ou mélange), au moyen d'un tamis à mailles carrées de dimensions inférieures ou égales à 100 mm et supérieures à 80 µm, selon la norme NF P 94 -560 de mars 1996 [3].

Pour les particules < à 80 µm, le tamisage est pratiquement impossible. Dans ce cas, on utilise la sédimentométrie qui est mieux adaptée pour déterminer les proportions pondérales des grains, selon la norme NF P 94-057 du mai 1992 [4]. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes, qui exprime la vitesse de chute d'une particule sphérique dans un liquide visqueux.

3.2.1.1.3.1. Analyse granulométrique par tamisage

- Le principe de la méthode

Le matériau d'étude est argileux, donc extrêmement fin. Dans un premier temps, la terre est lavée sur un tamis de 0,080 mm pour récupérer le refus. Il est séché à l'étuve à $100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ puis passé sur une série de tamis : 1,6 mm ; 1mm ; 0,63mm ; 0,5 mm ; 0,4 mm ; 0,25 mm ; 0,2 mm ; 0,1 mm et 0,08 mm avec couvercle et fond de tamis (voir figure 3.3). Le tamisage est fait manuellement pendant environ une minute et le refus sur chaque tamis est pesé pour en déduire le pourcentage des passants. Nous constatons que plus de 50% des matériaux passent à travers le tamis de 0,08 mm. Dans ce cas, il s'agit des matériaux fins. L'analyse granulométrique par tamisage est complétée par la sédimentométrie pour la détermination des toutes les dimensions de nos grains.



Figure 3-3: Serie de tamis

3.2.1.1.3.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie

La sédimentométrie est complémentaire à l'analyse granulométrique par tamisage, dans le cas où la proportion de fines inférieures à 0,08 mm est importante. La courbe granulométrique de l'argile de Ndjamená est illustrée par (la figure 3-4).

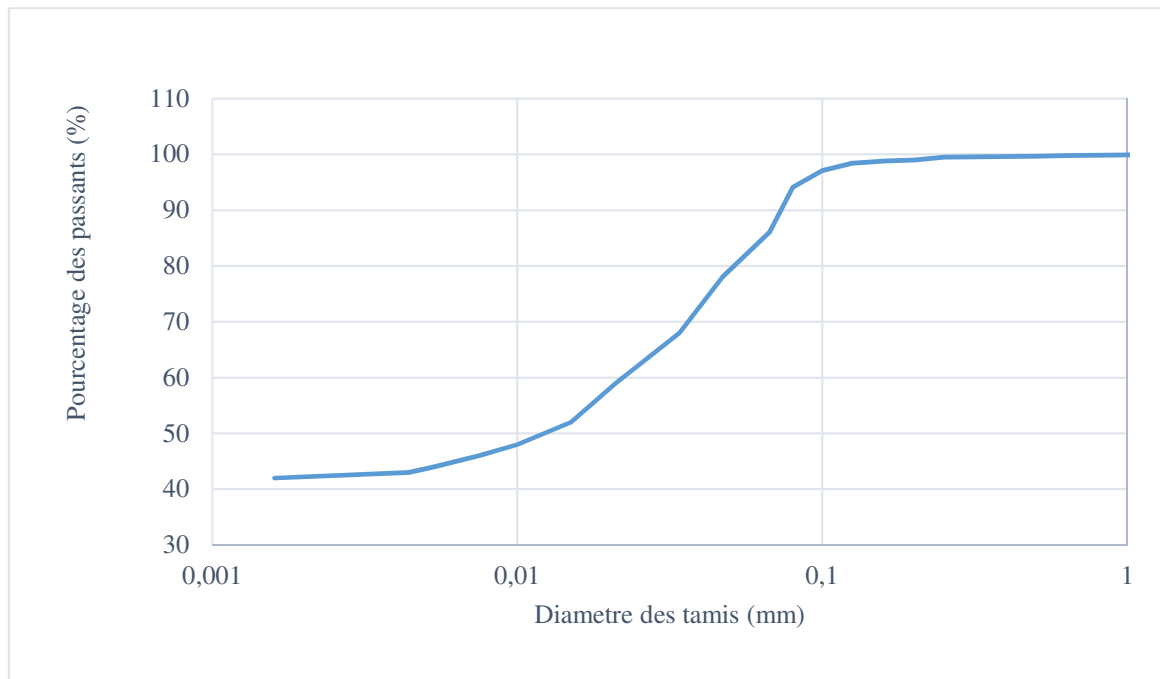


Figure 3-4 : Courbe granulométrique de matériau d'étude

La taille des grains de notre matériau varie de 1,6 mm à 0,00155 mm, avec un pourcentage de passants estimé à 95% à travers le tamis 0,08 mm. La terre argileuse comprend 41 % de sable ; 17% de limon et 42% d'argile.

Le matériau argileux de notre étude est constitué de grains de différentes tailles et un grand pourcentage est extrêmement fin. Il faut alors effectuer des essais de limites d'Atterberg sur la terre argileuse pour procéder à sa classification.

3.2.1.1.4. Limite d'Atterberg

3.2.1.1.4.1. Définition des différents états

- Un état liquide est une phase où l'échantillon a une teneur en eau élevée, il se laisse manier facilement et n'a aucune résistance face aux efforts extérieurs ;
- Un état plastique est une phase où l'échantillon commence à perdre sa teneur en eau. Il offre une meilleure résistance à la déformation, mais il est toujours fragile ;
- Un état solide correspond à une phase où l'échantillon a complètement perdu sa teneur en eau ou presque, donc il offre une résistance à la déformation assez élevée. En effet, le passage de l'état plastique à l'état solide s'effectue par la perte d'eau, diminution du volume (retrait) et ensuite, l'échantillon se stabilise par rapport à son volume (sans retrait).

Les teneurs en eau séparant les divers états de consistance du sol dépendent de sa nature. Elles sont représentées par la (figure 3-5).

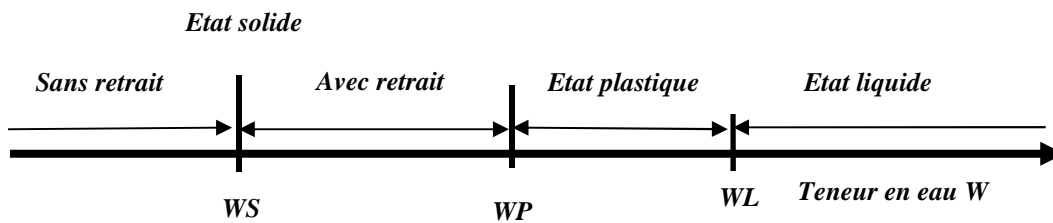


Figure 3-5 : Etat d'un matériau argileux en fonction de sa teneur en eau

3.2.1.1.4.2. Limite de liquidité

La limite de liquidité d'un sol (W_L) est déterminée à l'aide de la coupelle de Casagrande (figure 3-6). L'essai de limite de liquidité a été mené selon la norme NF P 94-051[5]. Cette norme est envisagée pour déterminer les deux limites (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau). La limite d'Atterberg est appliquée sur des sol fins dont les éléments passent à travers le tamis 0,4 mm.



Figure 3-6 : Coupelle de Casagrande

3.2.1.1.4.2.1. Exécution de l'essai

Le mélange bien homogénéisé est placé dans la coupelle et bien étalé à l'aide d'une spatule. L'épaisseur au centre du matériau doit être de 15 à 25 mm. Une rainure est appliquée sur le matériau avec un outil à rainurer par un mouvement unique (voir figure 3-7).

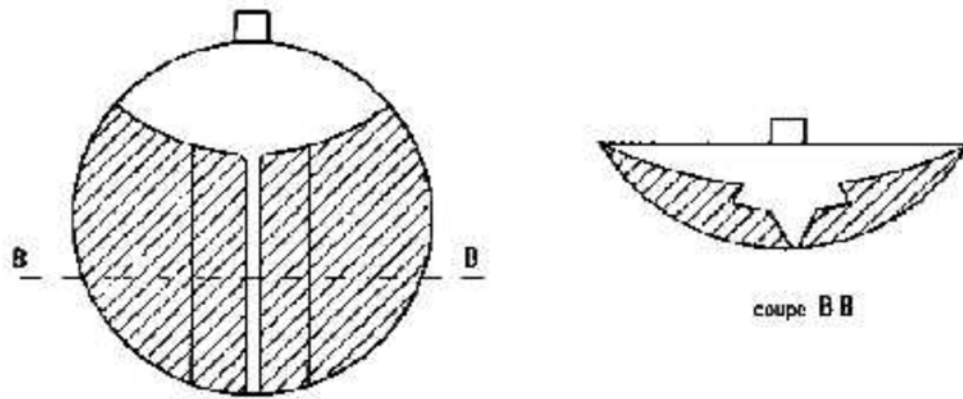


Figure 3-7: Une rainure pratiquée sur le matériau

Ensuite, il reçoit une série de coups réguliers à travers la coupelle de Casagrande. La fin de l'essai est annoncée lorsque la rainure se referme sur une longueur d'environ 12 à 13 mm. Le nombre de coups est noté et des échantillons sont prélevés au voisinage de la zone de fermeture, pour déterminer leurs teneurs en eau. (Voir figure 3-8).

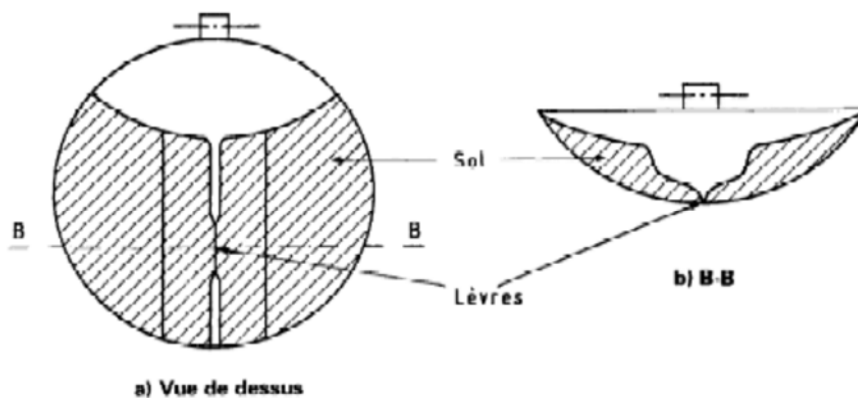


Figure 3-8 : Les lèvres se referment après quelques chocs pratiqués sur le matériau à l'aide de la coupelle

Pour une bonne représentativité, l'essai est repris trois fois tout en variant la teneur en eau dans le but de couvrir une plage de 15 à 35 coups.

Pour notre matériau, la fermeture des lèvres est obtenue à 17, 20 et 32 coups. Les échantillons prélevés à chaque fermeture de lèvres permettent de déterminer leurs teneurs en eau. Les résultats sont présentés dans le tableau 3-3.

Tableau 3-3 : les résultats des essais de la limite de liquidité

Nombre des coups	17				20				32			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4
Tares (g)	22,4	22,6	22,5	22,7	9,5	9,5	9,6	9,3	22,5	22,5	22,4	22,4
Mh (g)	32,9	36,1	36	37	23,4	24,6	23,3	22,7	38,5	36,2	37,8	36,8
Ms (g)	29,8	32,1	32	32,7	19,3	20,3	19,4	18,9	34,1	32,4	33,5	32,8
Mw (g)	3,1	4,0	4,0	4,3	4,1	4,3	3,9	3,8	4,4	3,8	4,3	4,0
W (%)	41,9	42,1	42	42,2	41	40	40	39,6	38	39	38,7	38,5
	42,2				40,2				38,6			

Nous pouvons alors tracer la courbe qui représente la teneur en eau en fonction du nombre de coups pour en déduire la teneur en eau de la limite de liquidité de notre matériau. La limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à 25 coups (voir la figure 3-9).

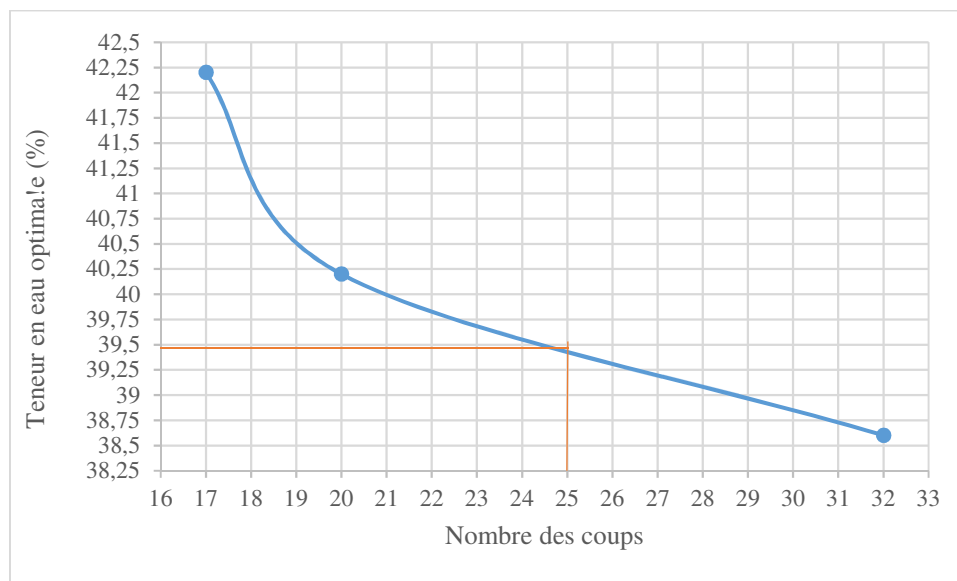


Figure 3-9 : Diagramme pour la détermination de la limite de liquidité

A partir de ce diagramme, la limite de liquidité (W_L) est déduite. Elle vaut 39,5 % à 25 coups. Dans la partie suivante, la limite de plasticité sera déterminée et l'indice de plasticité (I_P) sera déduit par (la relation 3.12).

$$I_P = W_L - W_P \quad (3.12)$$

3.2.1.1.4.3. La limite de plasticité

La limite de plasticité consiste à déterminer la teneur en eau d'un sol humide sous forme de rouleau, de diamètre ($\phi = 3 \text{ mm}$) et de longueur ($L=10 \text{ à } 15 \text{ cm}$), lors de son passage de l'état plastique à l'état solide selon la norme NF P 94-051 [5].

3.2.1.1.4.3.1. Principe de la méthode

L'échantillon est étalé sur une plaque en verre, pour lui faire perdre une certaine quantité d'eau et ensuite un rouleau sera réalisé. Si le rouleau se casse avant d'atteindre 3 mm de diamètre, sa teneur en eau est faible, il faut donc l'humidifier. Si le rouleau ne se brise pas même en le soulevant par son milieu jusqu'à 15 à 20 mm de hauteur, sa teneur en eau est trop élevée. Dans ce cas, il faut le déshydrater en l'étalant sur une plaque et attendre pendant quelques temps et ensuite reprendre l'essai. La limite de plasticité est obtenue lorsque la rupture a lieu pendant la préparation du rouleau ou au cours de son soulèvement. L'essai de limite de plasticité est illustré par la figure 3-10.



Figure 3-10 : Préparation d'un rouleau pour l'essai de plasticité.

Finalement des échantillons d'argile, prélevés de ces rouleaux sont séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 h pour déterminer leurs teneurs en eau. Les résultats sont présentés dans le tableau 3-4.

Tableau 3-4 : les résultats pour déterminer la limite de plasticité

limite de plasticité				
	1	2	3	4
tares	22,56	22,59	22,45	22,47
M_h (g)	25,84	27,36	26,49	25,56
M_s (g)	25,25	26,5	25,75	25
M_w (g)	0,59	0,86	0,74	0,56
w (%)	21,93	21,99	22,42	22,13

Les résultats d'essai des limites d'Atterberg sont récapitulés dans le tableau 3.5.

Tableau 3-5 : les résultats de limite d'Atterberg

W (%)	P _s (g/cm ³)	Limite d'Atterberg		
		W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)
11,12	2,45	39,5	22,1	17,4

Reportés sur le diagramme de Casagrande, I_P et W_L permettent de proposer une classification de notre sol d'étude.

3.2.1.1.5. Classification de la terre argileuse

Le diagramme de Casagrande est utilisé uniquement pour la classification des sols fins, (voir figure 3-11).

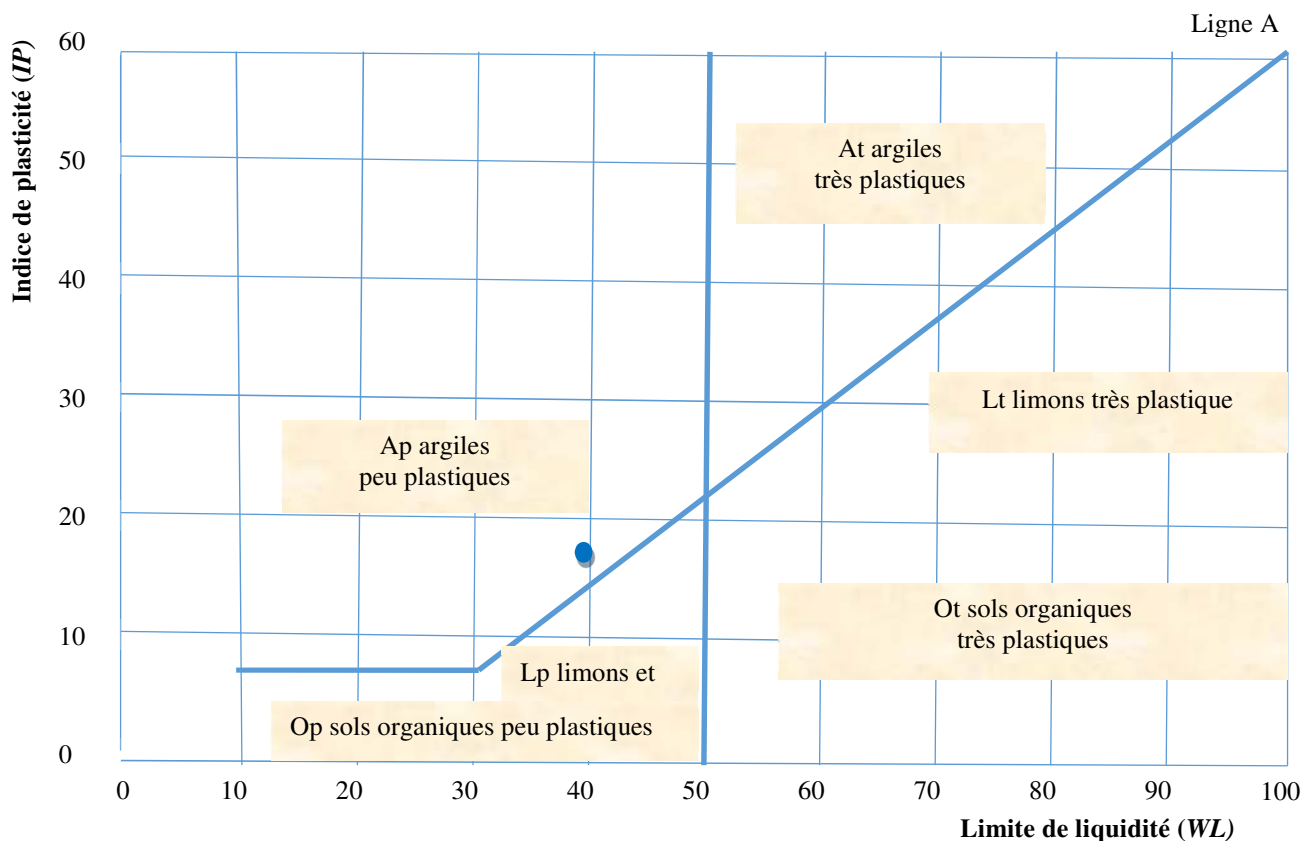


Figure 3-11: Diagramme de Casagrande

A partir de nos mesures, il ressort que notre matériau est **une argile peu plastique**.

D'autres outils ont été également utilisés afin de comparer les différents résultats. Il s'agit :

- L'abaque triangulaire de TAYLOR, qui utilise uniquement la granulométrie pour classer un sol (argile, limon, sable limoneux, limon-argilo-sableux.....etc.), (voir figure 3.12).
- Les classifications normalisées NF P 11-300 de septembre 1992 [6], qui remplacent l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) réalisée par le LCPC et le SETRA. Elle est très utilisée en géotechnique routière pour donner des renseignements pratiques sur l'aptitude des sols à être utilisés en remblais, (voir tableau 3-6) ;

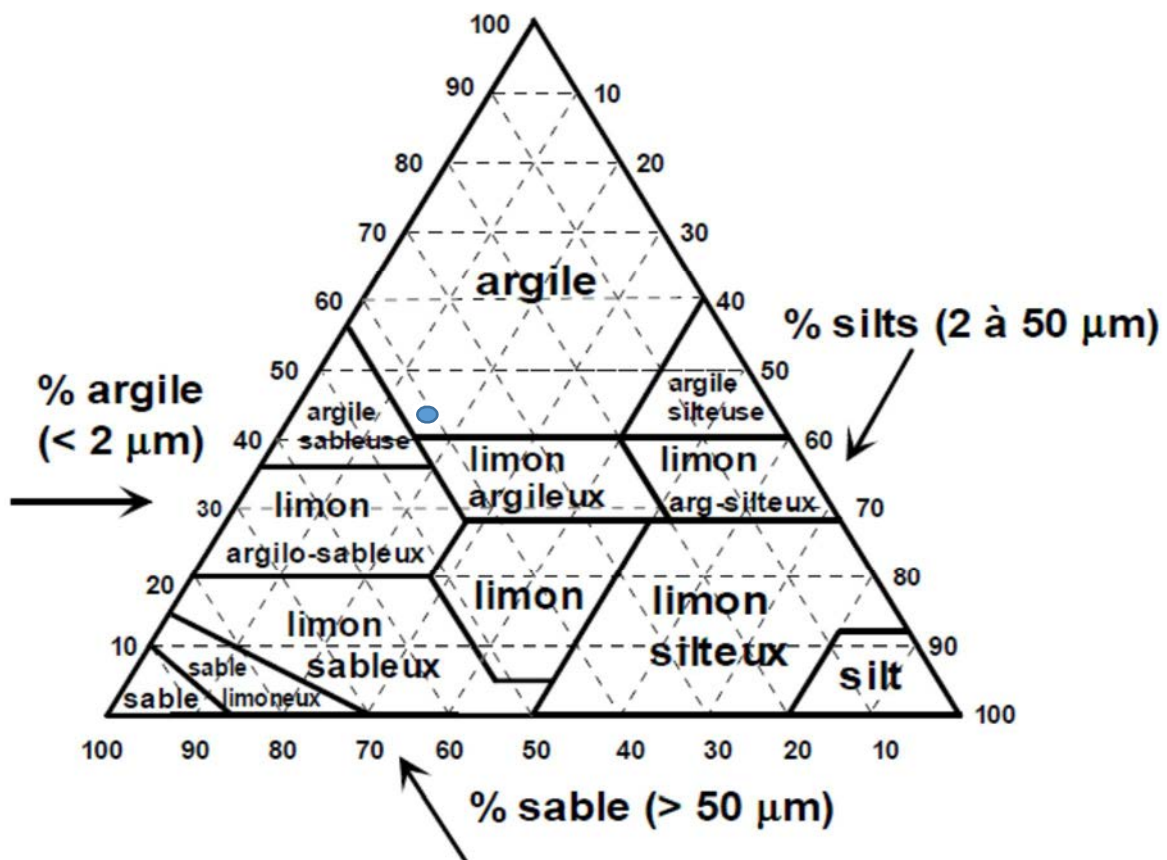


Figure 3-12 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% de matériau supérieur à 2 mm de diamètre).

Tableau 3-6 : Les classifications normalisées NF P 11-300 de septembre 1992 [6], qui remplacent l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers).

Sols fins A $D_{\max} \leq 50$ mm et $d_{35} < 0,08$ mm	$VBS \leq 2,5^*$ ou $I_p \leq 12$	A ₁ : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques
	$12 < I_p \leq 25^*$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	A₂ : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes.
	$25 < I_p \leq 40^*$ ou $6 < VBS \leq 8$	A ₃ : argiles et argiles marneuses, limons très plastiques
	$I_p \geq 40^*$ ou $VBS > 8$	A ₄ : argiles et argiles marneuses très plastiques
Sols sableux ou Graveleux avec fines B $D_{\max} \leq 50$ mm et $d_{35} \geq 0,08$ mm	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	B ₁ : sable silteux
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$	B ₂ : Sables argileux (peu argileux)
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	B ₃ : graves silteux
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$	B ₄ : graves argileux (peu argileux)
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$; $VBS \leq 1,5^*$ ou $I_p \leq 12$	B ₅ : sables et graves très silteux
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$; $VBS > 1,5^*$ ou $I_p > 12$	B ₆ : sables et graves argileux à très argileux
Sols comportant des fines et des gros éléments C $D_{\max} > 50$ mm	$d_{12} < 0,08$ mm ou $d_{12} > 0,08$ mm et $VBS > 0,1$	C : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières
Sols insensibles à l'eau D $VBS \leq 0,1$	$d_{\max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm	D ₁ : sables alluvionnaires propres, sable de dune
	$d_{\max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm	D ₂ : graves alluvionnaires propres, sables.

$d_{12} \geq 0,08 \text{ mm}$	$d_{\max} > 50 \text{ mm}$	D_3 : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires.
-------------------------------	----------------------------	--

Les deux outils à savoir, le triangle de Taylor et le tableau des classifications normalisées NF P 11-300 de septembre 1992 [6] ont confirmé les résultats de classification donnés par le diagramme de Casagrande, (voir les figures 3-11 et 3-12 et le tableau 3.6).

3.2.1.2. Caractéristiques physiques de sable

Le sable que nous avons utilisé est un matériau à grains moyen à gros. Leurs diamètres varient de (0,63 mm à 2 mm) dont nous allons déterminer la granulométrie, la masse volumique apparente et la masse volumique des grains solides.

3.2.1.2.1. La granulométrie

Nous utilisons la même procédure que le paragraphe 3.2.1.1.3.1 pour déterminer la granulométrie de notre sable. La courbe granulométrique est illustrée par la figure 3-13

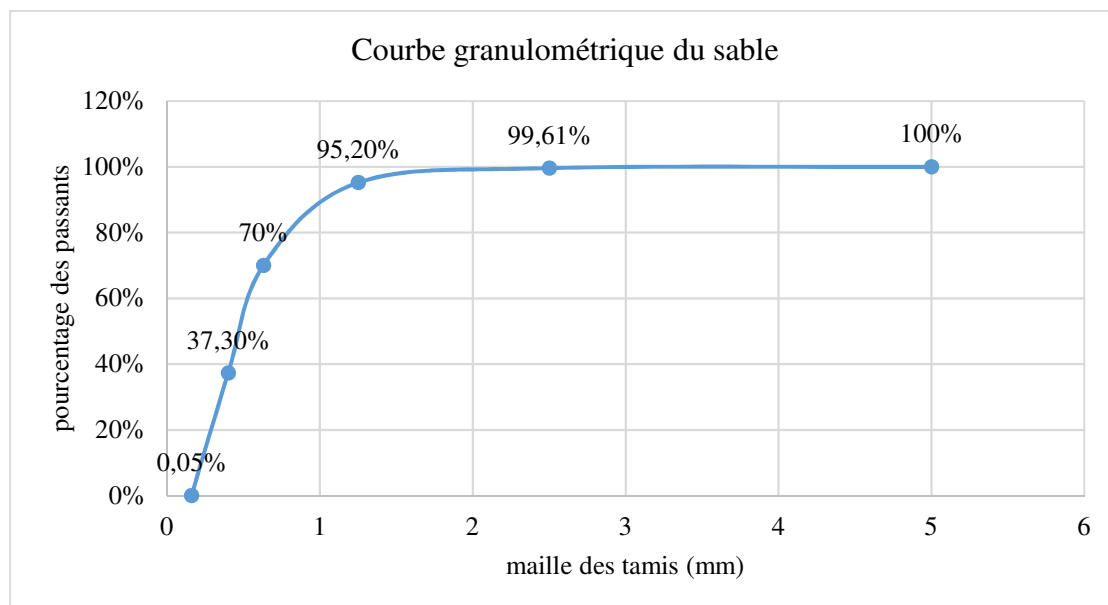


Figure 3-13 : Courbe granulométrique du sable

3.2.1.2.2. La masse volumique des grains solides

Nous utilisons le pycnomètre à eau selon la norme NF P 94-054 [2] pour la détermination de la masse volumique des grains solides du sable.

3.2.1.2.3. La masse volumique apparente du sable

L'essai consiste à peser un échantillon de sable dans un volume connu et déduire la masse de l'éprouvette. Cet essai est effectué selon la norme NF EN 1097 – 3 [7]. La valeur de la masse volumique apparente est donnée par la relation 3.13.

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (3.13)$$

Les résultats des caractéristiques physiques du sable sont récapitulés dans le tableau 3-7

Tableau 3-7 : Caractéristiques physiques du sable

ρ_{app} (g.cm ⁻³)	ρ_{relle} (g.cm ⁻³)	Distribution de la taille des grains					
1,5	2,7	0,16 mm	0,4 mm	0,63 mm	1,25 mm	2,50 mm	5 mm
		0,35%	12,55%	32,6%	88,2%	99,6%	100%

Le sable que nous avons utilisé dans notre étude est constitué des grains de taille moyenne. Dans la partie suivante, les caractéristiques physiques de pailles seront déterminées.

3.2.1.3. La paille de riz.

La culture de riz est bien développée au Tchad. Elle est principalement pratiquée dans la zone soudanienne à cause de son exigence en termes de pluviométrie, et dans une moindre mesure dans la zone sahélienne. Le résidu issu de cette culture est valorisé énergétiquement. Il est utilisé aussi comme nourriture pour les animaux et peut être utilisé pour la construction des habitations. Dans ce travail de recherche, la paille de riz est utilisée comme renfort dans le matériau terre pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et thermiques.

3.2.1.3.1. Caractéristiques expérimentales

La paille de riz utilisée a été caractérisée à travers sa masse volumique apparente, son humidité initiale (W) et sa composition chimique (cendres, extractibles, lignine, holocellulose (cellulose + hémicellulose) et sucre simple).

3.2.1.3.1.1. Caractéristiques physiques de paille de riz

3.2.1.3.1.1.1. Masse volumique

Pour les matériaux bio-sources tels que la paille de riz, la détermination de la masse volumique se fait de manière indirecte selon la norme NF P 94-064 [8]. Compte tenu de son pouvoir

absorbant, la paille de riz est couverte d'huile de paraffine afin de la protéger de la pénétration d'eau, (voir figure 3-14). Ensuite, nous procédons par des pesées hydrostatiques.

Un échantillon de paille de riz est séché à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures et pesé. Puis introduit dans un récipient (tare) et imprégné avec de l'huile de paraffine. L'échantillon est alors pesé à l'air libre lorsque sa température avoisine la température ambiante et puis complété par des pesées hydrostatiques (voir figure 3-15).



Figure 3-14 : Paille de riz imprégnée dans l'huile de paraffine

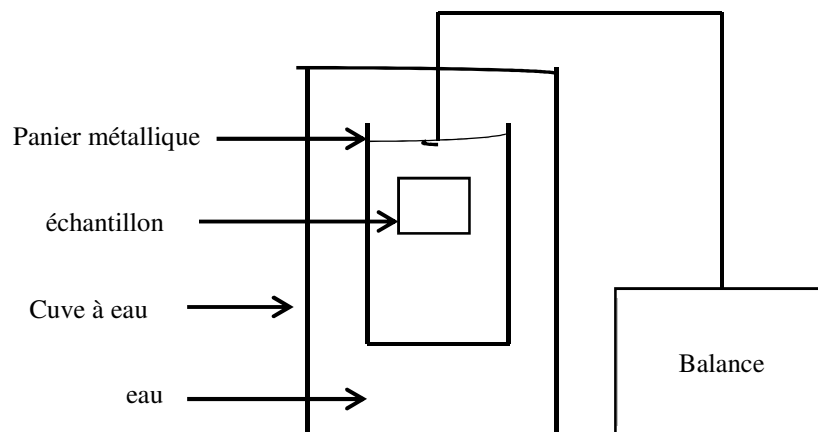


Figure 3-15 : Dispositif des pesées hydrostatiques

Le calcul de la masse volumique est déterminé comme suit :

$$\text{Masse anhydre de l'échantillon : } m_S = m_{(S+ta)} - m_{ta} \quad (3.14)$$

$$\text{Masse de paraffine : } m_P = m_{(S+P)} - m_S \quad (3.15)$$

$$\text{Volume de paraffine : } V_P = \frac{m_P}{\rho_P} \quad (3.16)$$

$$\text{Pesée hydrostatique : } m_T = \frac{m_{(S+P)}}{1} - \frac{m_{h(S+P)}}{1} \quad (3.17)$$

$$\text{Volume total : } V_T = \frac{m_T}{\rho_w} \quad (3.18)$$

$$\text{Volume de l'échantillon : } V_s = V_T - V_p \quad (3.19)$$

$$\text{La masse volumique de l'échantillon : } \rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.20)$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau 3-8.

Tableau 3-8 : Résultats de masses volumiques de paille de riz

Essais	1	2	3	4
ρ_s (kg.m ⁻³)	462	460	465	469

La masse volumique en vrac de la paille de riz est de 30 kg.m⁻³. Nous constatons que les valeurs de masse volumique sont faibles comparées à l'argile. Cela est dû à la porosité élevée qui représente 93 % du volume total. A partir de la formule géotechnique la porosité est déterminée par la relation 3.21.

$$n(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_s}\right) \quad (3.21)$$

D'autres résultats sont obtenus par Céline LA ROSE [9] sur les feuillus et les résineux. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que la masse volumique des pailles de riz, voir tableau 3-9.

Tableau 3-9 : La densité du bois [9]

Matériaux	Densités (kg.m ⁻³)
Feuillus	650
Résineux	450

3.2.1.3.1.1.2. Absorption d'eau

Les matériaux bio-sourcés ont un pouvoir absorbant très élevé. Ce caractère hydrophile est dû à la présence de molécules polysaccharides (hémicellulose et cellulose) qui ont une aptitude à fixer des molécules d'eau. Pour son utilisation comme granulat, il faut comprendre sa capacité et sa cinétique d'absorption d'eau afin de proposer des solutions.

Pour ce faire, nous avons pris 35 g de paille de riz, séchée à l'étuve à 105 °C pendant deux jours pour obtenir des granulats secs. Cette température est souvent utilisée sur le bois pour obtenir une évaporation complète de l'eau [10]. Nous nous sommes basés sur les travaux de Tai Thu [11] pour déterminer les taux d'absorption de la paille de riz, (voir relation 3.22). La procédure est la suivante.

$$A(t) = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (3.22)$$

Les particules séchées à l'étuve sont immergées dans l'eau avec des temps de séjour de 5 minutes à 48 heures (tableau 3-10).

Tableau 3-10 : Taux d'absorption de paille de riz

Durée (min)	Masses (g)	Absorption (%)
0	35	0
5	107	206
30	117	234
60	127	263
120	130	271
150	140	300
240	148	323
360	150	329
480	151	331
1400	154	340
2800	157	348

Nous constatons que la capacité d'absorption d'eau de la paille de riz est de 206 % à 5 min. Elle est trop élevée par rapport à la plupart des matériaux de construction.

Tai Thu [11] a effectué un test d'absorption sur des particules de chènevottes. Il constate que le taux d'absorption atteint 70 % à partir de 5 min d'immersion des particules dans l'eau, et

pendant 48 heures d'immersion le taux d'absorption atteint 406%. Par rapport à la paille de riz, les particules de chènevottes ont une cinétique d'absorption lente au départ, car la paille de riz atteint un taux d'absorption de 206 % à 5 min d'immersion. Par contre à partir de 48 heures d'immersion les deux matériaux atteignent un taux d'absorption relativement proche. En construction, le caractère hydrophile constitue un défaut majeur. Il faut immerger la paille de riz dans l'eau jusqu'à saturation avant de la mélanger avec le liant ou la terre, sinon elle absorbera toute l'eau de gâchage engendrant ainsi un produit difficilement utilisable.

3.2.1.3.1.2. Composition chimique

La biomasse végétale est constituée de deux types de molécules :

- des molécules ayant une faible masse molaire, soit organiques (les extractibles), soit minérales (les cendres) ;
- des molécules ayant une masse molaire élevée voir très élevée à savoir des polymères que l'on peut classer en trois grandes familles : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine.

Nous allons donc caractériser la composition chimique d'une paille de riz provenant de la zone soudanienne du Tchad et proposer des solutions pour son utilisation dans la réalisation de matériaux de construction pour le bâtiment.

3.2.1.3.1.2.1. Taux de cendres

Par définition, le taux de cendres α_A est le rapport entre la masse de sels minéraux d'une biomasse sur la masse anhydre de ladite biomasse.

$$\alpha_A = 100. \frac{m_A}{m_s} \quad (3.23)$$

La détermination de cette teneur est relativement aisée. Un échantillon de masse anhydre connue est placé dans un creuset en céramique et déposé dans un four alimenté en air. On chauffe progressivement l'échantillon jusqu'à une température de 600 °C. Toute la matière organique se consume, lorsque la combustion est totalement terminée, il ne reste plus que la matière minérale dans le creuset dont la masse est mesurée après avoir ramené le creuset à la température ambiante.

3.2.1.3.1.2.2. Extractibles

Les extractibles sont des substances organiques de faibles masses molaires (quelques dizaines à quelques centaines de g/mol). Ils se trouvent dans la structure poreuse du bois. Les extractibles sont solubles dans les différents solvants organiques (hexane, dichlorométhane, acétone,

toluène, éthanol, méthanol...) ou dans l'eau et cela à des températures modérées (souvent moins de 100 °C).

Le dispositif le plus souvent utilisé pour déterminer le taux d'extractibles d'une biomasse est un Soxhlet.

Nous avons utilisé la méthode d'extraction à chaud à l'aide d'un Soxhlet avec de l'acétone comme solvant. Cet appareil permet d'extraire les molécules organiques à l'aide d'un solvant donné. Il nécessite la répétition d'un certain nombre de cycles relativement lents.

Le protocole expérimental est décrit comme suit :

Un échantillon de paille de riz est finement broyé ($d < 40 \mu\text{m}$) puis séché dans une étuve à 105°C pendant 24 h. La poudre anhydre est alors introduite dans une cartouche d'extraction en cellulose pure que l'on place ensuite dans le réservoir du Soxhlet (cf figure 3-16). Ce réservoir est situé au-dessus d'un ballon rempli au trois quart de son volume d'acétone qui est chauffée jusqu'à ébullition. Les vapeurs d'acétone montent jusqu'au condenseur puis retombent sous forme liquide dans le réservoir du Soxhlet. Les extractibles sont petit à petit dissouts dans le solvant, au fur et à mesure que le niveau d'acétone monte dans le réservoir en question. Lorsque ce réservoir est rempli, le solvant et les extractibles qu'il contient s'écoulent dans le ballon par effet de vase communicant. Le même cycle se répète jusqu'à ce que le contenu du réservoir devienne clair.

La cartouche est alors retirée du dispositif puis séchée à l'étuve à 105 °C pour être enfin pesée.

De même que pour le taux de cendres, le taux d'extractibles α_E est défini par rapport à la masse anhydre de la biomasse étudiée (voir la relation 3.24).

$$\alpha_E = 100. \frac{m_E}{m_S} \quad (3.24)$$

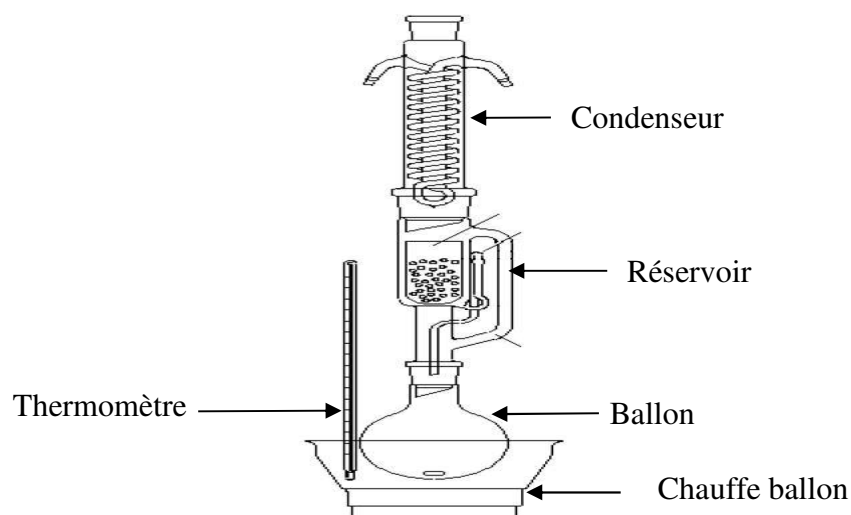


Figure 3-16 : Dispositif d'extraction à l'aide d'un SOXHLET

3.2.1.3.1.2.3. Lignine organosolv

Le procédé Organosolv est une opération qui permet de déterminer la quantité de lignine soluble dans l'éthanol. Le protocole expérimental consiste à broyer d'abord un échantillon de paille de riz. La masse anhydre de cet échantillon est déterminée en le plaçant dans un four à 105 °C.

La poudre de biomasse anhydre est placée ensuite dans un réacteur batch de 600 ml équipé d'un régulateur de température et d'une agitation à vitesse variable. On y ajoute une phase liquide dont la masse est égale à 10 fois celle de la masse anhydre de biomasse.

La composition volumique de cette phase liquide est de 65 % d'éthanol et 35 % d'eau distillée. On y ajoute également une faible quantité d'acide sulfurique (132 µL d'acide 4N pour 100 mL de liquide) qui jouera le rôle de catalyseur.

Le mélange réactionnel est chauffé à une température opératoire de 170 °C. Lorsque cette température est atteinte, un dispositif de régulation la maintient constante pendant 1 heure à l'issue de laquelle le mélange réactionnel est brutalement refroidi (la température chute à moins de 100 °C en une minute). On trouvera une illustration du réacteur sur la figure 3-17a.

Le mélange réactionnel est alors retiré du réacteur puis filtré sur papier (filtre Whatman) (figure 3-17b). Le solide récupéré sur le papier filtre est lavé avec 75 ml d'un liquide chauffé à 60 °C et dont la composition volumique est : 65 % d'éthanol + 35 % d'eau distillée chauffé à 60 °C.

Le résidu solide est alors déposé dans une étuve à 105 °C pour la détermination de sa masse anhydre. On ajoute trois volumes d'eau distillée à la phase liquide ce qui précipite les lignines organosolv. Le solide qui a précipité dans cette phase liquide est récupéré par centrifugation

(4000 Tr/min pendant 20 min) (voir figure 3-17c) puis séché dans une étuve. Le produit ainsi récupéré est la lignine organosolv (LO).

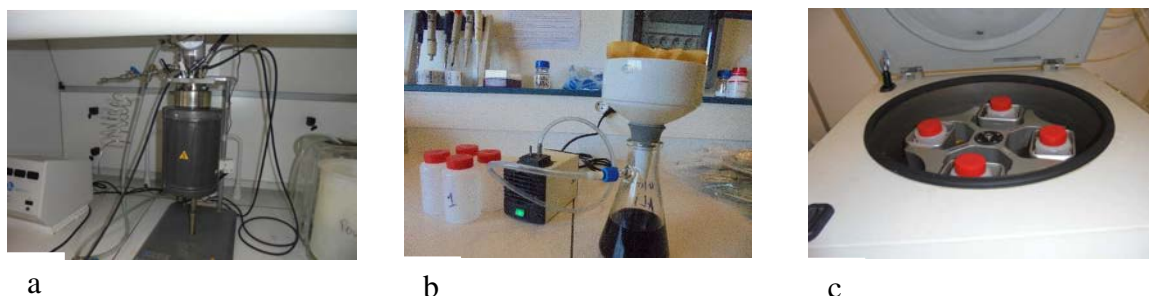


Figure 3-17 : (a : Reacteur à Batch, b : Opération de filtration, c : Centrifugeuse)

3.2.1.3.1.2.4. Lignine de Klason

La méthode généralement utilisée pour évaluer la teneur en lignine consiste en fait à déterminer la quantité de lignine dit « lignine de Klason ». Il s'agit de dissoudre une masse anhydre de 175 mg de poudre de biomasse dans 1,5 ml d'acide sulfurique concentré à 72 %.

Le mélange est maintenu à 30 °C pendant 1 heure à l'issue de laquelle on ajoute 42 ml d'eau distillée. On place alors l'échantillon dans une étuve à 121 °C pendant 1 heure. On obtient le solide en suspension dans la phase liquide. C'est la lignine de Klason. On sépare enfin par filtration le solide de la phase liquide. Le solide est placé dans un four à 105 °C pour mesurer la masse anhydre de ce solide.

Une fois que les taux de cendre, des extractibles et des lignines sont déterminés, nous allons déduire le taux de holocellulose (hémicelluloses et cellulose) par la relation 3.25. Les résultats d'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau 3-11.

$$\alpha_F = 100 - \alpha_E(\%) - \alpha_A(\%) - \alpha_L(\%) \quad (3.25)$$

Tableau 3-11 : Compositions chimiques de paille de riz

Echantillon	$\alpha_E(\%)$ extractibles	$\alpha_A(\%)$ cendres	$\alpha_L(\%)$ lignines	$\alpha_F(\%)$ holocellulose
Paille de riz	2	17.56	18.63	61,81

Les résultats obtenus par Sun et Cheng [12] sur la biomasse végétale sont dans les mêmes ordres de grandeur que nos résultats obtenus sur les pailles de riz, (voir tableau 3-12).

Tableau 3-12 : Composition de biomasse lignocellulosique [12]

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Bois dur	40-55 %	24-40 %	18-25 %
Bois tendre	45-50 %	25-35 %	25-35 %
Pailles	30-43 %	22-35 %	15-23 %
Herbes	25-40 %	35-50 %	10-30 %

3.2.1.3.1.2.5. Quantification des sucres simples [13]

La Chromatographie ionique (CI) est la technique d'analyse pour séparer les constituants d'un mélange en phase aqueuse. Elle comporte une colonne qui contient une résine chargée positivement pour attirer les cations ou négativement pour attirer les anions. Les anions et les cations séparés sont emportés par l'éluant. En fonction de l'interaction électrostatique qui existe entre la résine de la colonne et les ions à séparer, la séparation se fera plus ou moins facilement. Le principe de la (CI) est fondé sur des échanges d'ions à travers la résine. La phase mobile entraîne les ions et la phase stationnaire les sépare.

Par la même procédure, les sucres simples se trouvant dans la biomasse sont séparés et quantifiés à l'aide d'une chromatographie ionique de type (Dionex ICS-3000), (figure 3-18). Ce dispositif est muni d'un pompage, d'un auto-injecteur, d'un détecteur électrochimique avec une électrode en or, une électrode de référence Ag/AgCl et un logiciel d'analyse et de traitement chromeleon version 6.8 (Dionex corp., USA). La phase stationnaire est constituée d'une pré-colonne (4 x 50 mm, Dionex) reliée à une colonne Carbopac PA1 (4 x 250 nm, Dionex).



Figure 3-18 : Chromatographie ionique Dionex ICS-3000

L'éluant est représenté par une solution d'hydroxyde de Sodium. Sa préparation consiste à la dilution de NaOH (46-48%) dans l'eau ultra-pure qui est dégazée par l'introduction d'hélium pendant 20 min. La colonne est lavée avec une solution de NaOH (200 mM) durant 10 min et la remise du dispositif dans les conductions opératoires de départ.

La préparation des échantillons a suivi les étapes suivantes :

- 1^{ère} étape : réalisation d'un mélange de 175 mg de paille de riz broyée anhydre dans 100 ml d'eau distillée ;
- 2^e étape : dilution du mélange à 1/100^{ème}, c'est-à-dire 1 ml du mélange dans 100 ml d'eau ultra-pure ;
- 3^e étape : remplissage des fioles de chromatographie avec 1,5 ml de la solution diluée ;
- 4^e étape : analyse de 20 μ l de la solution.

Les échantillons (20 μ l) sont introduits automatiquement. L'opération de séparation des sucres se déroule à 25°C avec un débit de 1 ml/min. Au préalable, un étalonnage est nécessaire avec des solutions étalon (Xylose, arabinose, galactose, mannose et glucose) (voir figure 3-19). Les résultats sont présentés dans le tableau 3-13.

Tableau 3-13 : Sucre simple de paille de riz et les acides glucuroniques

Arabinose (%)	Galactose (%)	Glucose (%)	Xylose (%)	Mannose (%)	Acide.galacturonique (%)	Acide.glucuronique (%)
2,11	0,73	74,13	22,83	0	0,108	0,092

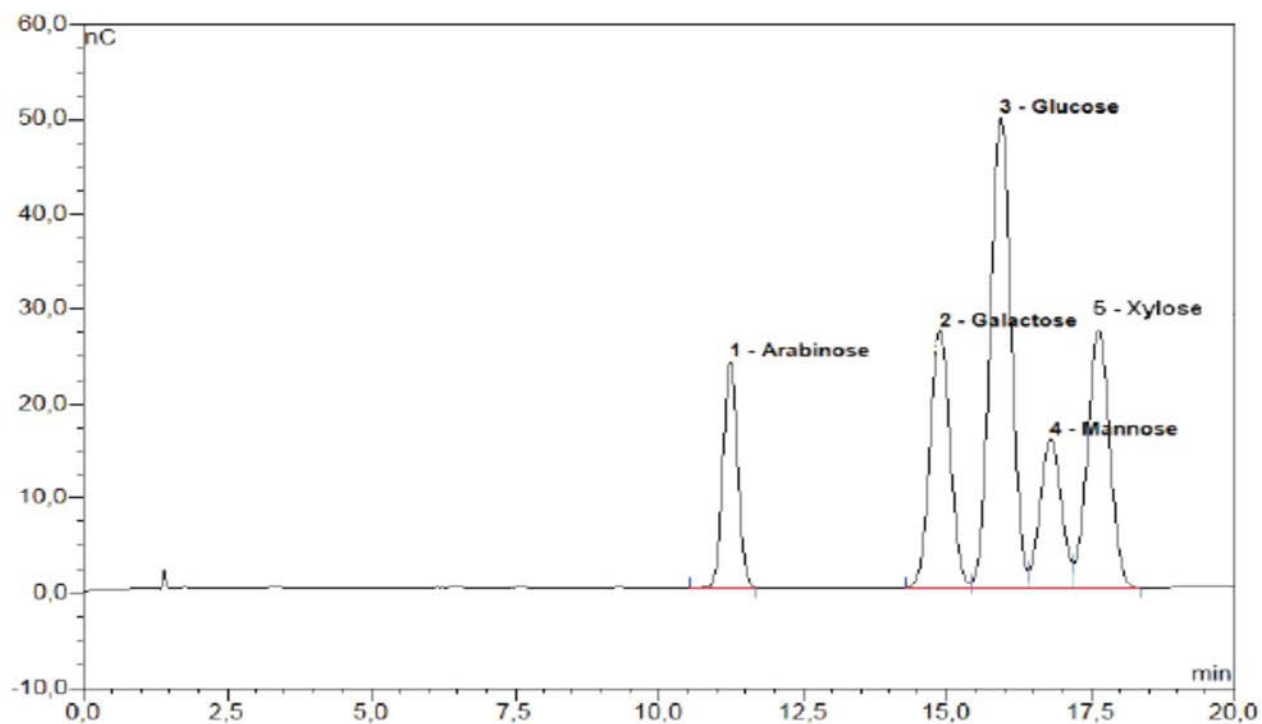


Figure 3-19 : Chromatogramme obtenu par Chromatographie ionique Dionex ICS-3000

3.2.2. Résultats et discussions

Les caractéristiques physiques telles que la masse volumique et le taux d'absorption de la paille de riz sont déterminés. Les résultats montrent que la masse volumique de la paille de riz est très faible (460 kg.m^{-3}). Cette faible valeur est due à la porosité intrinsèque de la paille. Avec une faible masse volumique, l'utilisation de la paille de riz dans la construction allège l'ouvrage. Ce qui permet de faire des économies sur les coffrages et les ferrillages des éléments de la structure.

Le taux d'absorption de la paille est trop élevé. Pendant 5 min d'immersion dans l'eau, le taux d'absorption est de 206 %. A 48 heures d'immersion, il atteint 348 %. Le comportement hydrophile de la paille de riz est dû à leurs porosités élevées et à la présence des molécules hydrosolubles (hémicellulose et cellulose) dans cette dernière. La porosité totale des pailles de riz est estimée à 93 %. Il est impératif de pré-humidifier la paille de riz jusqu'à saturation avant de l'ajouter au mélange, sinon, la paille de riz à l'état sec absorberait toute l'eau de gâchage et par conséquent le composite cimentaire manquerait d'eau pour son hydratation.

Les essais chimiques ont décelé du sucre simple dans la paille de riz, réparti comme suit : 74,13% de glucose et 22,83% de xylose (tableau 3-13). La littérature relative à la valorisation de la biomasse est unanime sur l'existence du sucre dans cette dernière. Il génère un retard de

prise et de durcissement du composite cimentaire. Jusqu'alors les solutions proposées se sont focalisées sur des traitements physiques et chimiques des granulats végétaux. Quant à nous, nous adoptons un traitement par pré-mouillage prolongé en se référant sur les travaux des auteurs (Lo Y *et al*) [141].

3.2.3. Conclusion

Comme les autres fibres lignocellulosiques, la paille de riz présente une masse volumique très faible, due à sa porosité intrinsèque élevée. La faible valeur de la masse volumique de la paille permet de réaliser des économies de coffrage et de ferrailage des infrastructures. La paille de riz possède également un taux d'absorption d'eau jusqu'à 348 % de sa masse. Pour son utilisation comme matériau de construction, il faudrait d'abord l'imprégner dans l'eau.

Les caractéristiques chimiques sur les pailles de riz ont décelé du sucre hydrosoluble. Ce dernier est à l'origine de retard de prise et de durcissement des composites. La solution proposée est le pré-mouillage prolongé des pailles de riz dans l'eau. Cette solution permettra de résoudre le problème d'absorption de paille de riz et en même de réduire considérablement le taux de sucre qu'elle en contient.

Sur la partie suivante nous allons décrire les différents liants utilisés dans la construction. Par la suite, nous choisissons un liant qui respecte nos critères de choix pour nos travaux de recherche.

3.2.4. Les liants

Le GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), classe le bâtiment comme étant un des secteurs d'activité parmi les plus gros consommateurs d'énergie [14]. Cela comporte les charges énergétiques pour l'exploitation du bâtiment, et l'industrie cimentière qui dégage 5% des émissions mondiales de CO₂ en consommant 2% de l'énergie primaire mondiale [15]. Le matériau ciment ne peut donc pas être considéré comme un matériau durable. En remplacement, nous proposons d'utiliser la gomme arabique qui est une biomasse sans problème environnemental, économique et disponible.

3.2.4.1. La gomme arabique

La gomme arabique est un exsudat de sève solidifié, prélevé sur le tronc et au pied d'arbres de la famille des acacias. Elle est récoltée en Afrique subsaharienne (Egypte, Maghreb, Mali, Sénégal, Soudan, Tchad, etc.).

Dans le commerce, la gomme arabique se trouve sous forme de poudre ou de cristaux. Elle est de couleur jaune pâle à jaune brunâtre, inodore, soluble dans l'eau et insoluble dans l'alcool, mais elle est soluble dans le glycérol et le propylène glycol avec un chauffage prolongé. La partie visible des cristaux est « mate » et présente de fines fissures difficilement visibles à l'œil nu [16].

3.2.4.1.1. Les propriétés de la gomme arabique

Les propriétés physiques de la gomme arabique sont présentées dans le tableau 3-14.

Tableau 3-14 : Propriétés physiques de la gomme arabique

ρ_s (kg.m ⁻³)	ρ_{app} (kg.m ⁻³)	Masse moléculaire (kilo daltons)
1350	415	200-300

Les propriétés physiques essentielles font que la gomme arabique ressemble aux liants minéraux (ciment et chaux) même si le processus de durcissement est différent. Elle se dissout dans l'eau et assemble les grains avec son comportement adhésif pour former une agglomération. Par la suite la prise et le durcissement vont suivre. Son utilisation comme liant en substitution des liants minéraux entre dans une démarche de développement durable car elle constitue une matière première renouvelable et sans danger pour l'environnement [17].

Pour vérifier les informations obtenues sur l'article de Bozabé [17] relatives à l'existence du sucre dans la gomme arabique, nous avons mené des analyses chimiques sur la gomme arabique en utilisant la chromatographie à échange d'anion en milieu fortement basique, couplée à la détection par ampérométrie pulsée (HPAE-PAD). Cet appareil est généralement utilisé pour la quantification des monosaccharides et des acides uroniques. Les analyses chimiques sont réalisées par la même procédure que celle décrite en paragraphe (3.2.1.3.1.2.5). Les résultats sont présentés dans le tableau 3-15.

Tableau 3-15 : Constituants chimiques de la gomme arabique

N°	Rhamnose	Arabinose	Galactose	Glucose	Acide glucuronique
	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	26,5949	24,2831	10,4654	21,5959	1,0824
2	25,8056	24,1674	10,6771	22,2690	0,8678
3	26,1375	24,3845	10,6706	21,7140	0,9182
4	26,0787	24,3538	10,9191	21,9844	0,9601
5	24,7922	23,2866	9,9996	20,3935	0,8269

L'analyse chimique effectuée sur la gomme arabique révèle bien la présence des sucres et des acides uroniques. Ce sucre est à l'origine du retard de prise et de durcissement des matériaux de construction. Pour mettre en évidence le problème du sucre sur les matériaux de construction, nous avons fabriqué des éprouvettes en BTC en utilisant différents pourcentages de gomme arabique, et nous avons suivis la cinétique de séchage à la température ambiante du Laboratoire de l'ENSTP jusqu'à leurs stabilisations dans le séchage. (Voir figure 3-20).

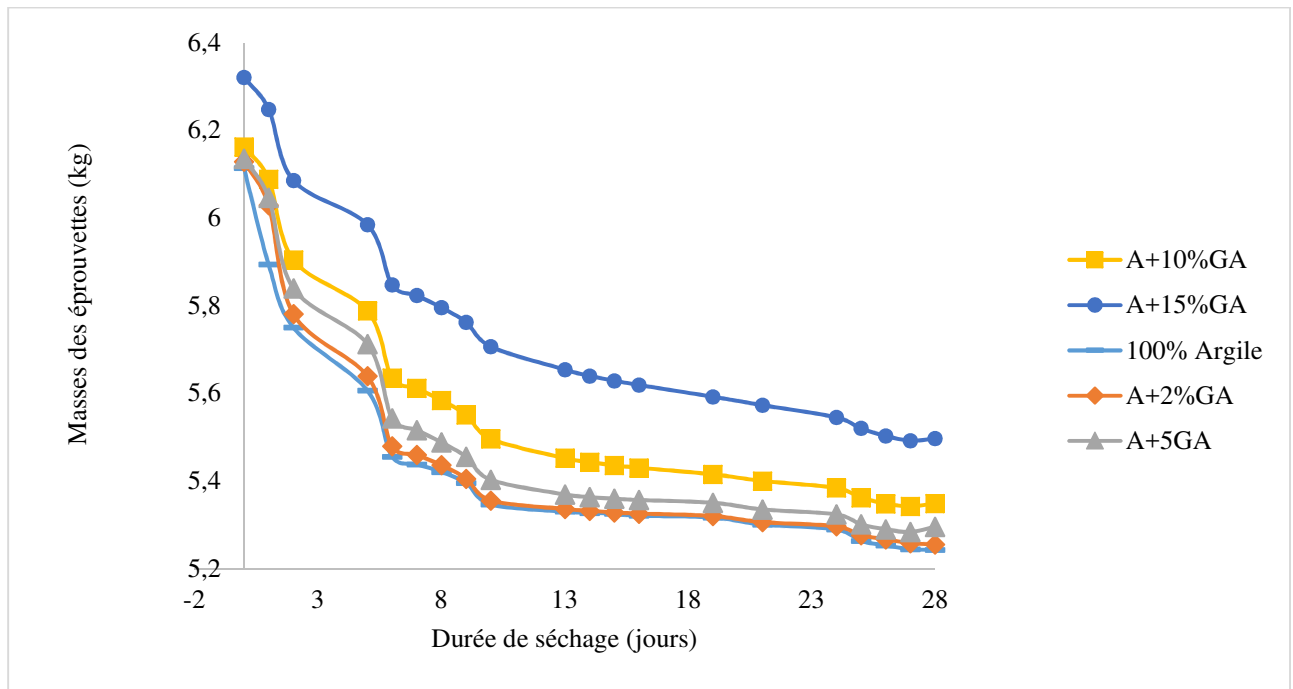


Figure 3-20 : Cinétique de séchage des blocs de terre comprimés

Nous constatons qu'à partir de 10 jours, la plupart des éprouvettes se sont stabilisées dans leurs processus de séchage. Par contre, l'éprouvette fabriquée avec un taux de 15% de gomme arabique conserve une humidité supérieure jusqu'au 25^e jour. Ceci peut s'expliquer par le fait que la gomme arabique conserve l'eau à travers les sucres qu'elle contient. A Ndjama, nous avons suffisamment du soleil pour de séchage des matériaux de construction. Il suffit de bien choisir la période de production (novembre-mai).

3.3.Caractéristiques thermiques

Pour compléter l'étude mécanique des matériaux présentées dans les chapitres suivants, nous nous sommes intéressés à leurs propriétés thermiques et plus particulièrement à leur pouvoir isolant au travers de la mesure de leur conductivité thermique. De nombreuses méthodes de mesure sont disponibles, cependant il convient d'identifier celle qui conviendra le mieux à nos matériaux.

Nous nous limiterons à une mesure de conductivité thermique à température ambiante. Les matériaux considérés sont voués à une utilisation en couche épaisse (minimum 20 cm), de telle sorte que les méthodes de caractérisation spécifiques aux couches minces ne sont pas exposées ici.

Après avoir rappelé les principales propriétés thermiques, nous décrirons la démarche classique basée sur une identification explicite des propriétés thermiques à partir des mesures, et la méthodologie moderne basée sur le principe de minimisation de la différence entre modèles et mesures. Nous essayerons de dégager les avantages et les inconvénients des méthodes classiques les plus connues.

3.3.1. Propriétés thermiques

D'un point de vue strictement thermique, la connaissance de la conductivité thermique et de la capacité thermique permet d'évaluer la diffusivité et l'effusivité thermique du produit.

3.3.1.1. La conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$. Pour un corps donné, sa valeur peut être influencée par la température et par la présence d'impuretés.

Pour le cas d'un matériau homogène et isotrope, la loi de Fourier présente la densité de flux thermique selon la relation 3.26 :

$$\vec{\varphi} = -\vec{\lambda} \times \overrightarrow{grad}T \quad (3.26)$$

3.3.1.2. La capacité calorifique

La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps à absorber ou à restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. Elle s'exprime en $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Elle correspond à l'énergie qu'il faut apporter à un corps de masse unité pour augmenter sa température de un Kelvin. C'est une grandeur extensive : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande.

La capacité thermique apparaît par fois en capacité volumique, qui s'exprime en $J.m^{-3}.K^{-1}$, dans ce cas la masse volumique ρ du matériau intervient.

3.3.1.3. La diffusivité thermique

La diffusivité thermique (a , qui a pour unité $m^2.s^{-1}$) est une propriété spécifique des matériaux caractérisant la conduction de chaleur non constante. Cette valeur décrit comment un matériau réagit rapidement face à un changement en température.

Cette grandeur peut être reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique massique par la relation (3.27):

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3.27)$$

3.3.1.4. Effusivité

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Elle s'exprime en $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-(1/2)}$

Cette grandeur relie la conductivité thermique à la capacité thermique par la relation (3.28)

$$E = \sqrt{\lambda \times \rho \times c} \quad (3.28)$$

3.3.2. Les propriétés thermiques de quelques matériaux

Le tableau 3-16 présente les propriétés thermo-physiques de quelques matériaux.

Tableau 3-16 : Conductivités thermiques de quelques matériaux [18].

Matériaux	λ ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	Matériaux	λ ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
Polyuréthane	0,025	Vermiculite exfolié	0,05 à 0,07
Polystyrène extrudé	0,03	Panneau de bois	0,14
Laine de verre	0,034 à 0,056	Brique de chanvre	0,12
Laine de lin	0,035 à 0,038	Brique monomur	0,11 à 0,18

Ouate de cellulose	0,035 à 0,040	bois	0,12 à 0,23
Laine de roche	0,038 à 0,047	Béton cellulaire	0,16 à 0,24
Chanvre en vrac	0,05 à 0,07	Bloc de terre comprimé	1,05
Polystyrène expansée	0,04	Brique de terre crue	1,1
Perlite exfoliée	0,05	Brique de terre cuite	1,15
Laine de coco	0,05	Béton plein	1,75
Liège expansé	0,05	Pierre lourde	2,1 à 3,5
Panneaux de fibre de bois	0,05	Acier	52

3.3.3. Classification des méthodes de caractérisation thermique [19]

3.3.3.1. Le régime

Il intervient pendant la phase de l'exploitation du système sous différentes formes. Il peut être :

- **Transitoire** : les réponses sont souvent données dans un bref délai ou sur un intervalle de mesure à partir du point initial. Les méthodes de mesure en régime transitoires sont : la méthode de flash ou celle de la tri-couche.
- **Quasi-établi** : les mesures sont établies sans prendre en considération la phase transitoire ni encore que le système ne soit totalement en régime établi. La méthode du fil chaud peut être employée en régime quasi-établi.
- **Permanent** : Seules les données à l'état final sont prises en compte. C'est une méthode qui donne seulement la conductivité thermique comme grandeur de mesure. Il s'agit de la méthode de la plaque chaude gardée ou celle de la mini plaque chaude qui fonctionnent en régime permanent.
- **Période établie** : pour cette méthode, la réponse des matériaux est donnée sous forme d'oscillation périodique. C'est le cas de la méthode de 3w qui est utilisée pour le régime périodique établi.

3.3.3.2. La géométrie

En fonction des différentes hypothèses formulées pour les mesures de grandeurs thermiques, trois géométries sont souvent utilisées :

- **La géométrie sous forme de prisme droite (mur)** : cette forme pourrait simplifier les démarches pour s'adapter à un cas unidirectionnel. L'hypothèse du mur semi-infini est souvent énoncé pour faciliter les conditions au limite.
- **La géométrie cylindrique** : cette forme permet une diffusion longitudinale et radiale de la chaleur pour prendre en compte les pertes latérales.
- **La géométrie sphérique** : dans ce cas, les transferts de chaleur prennent toutes les directions dans l'échantillon.

En fonction des hypothèses énoncées, une méthode peut être exploitée sur deux géométries différentes.

3.3.3.3. Le type de mesure

Les mesures de grandeurs font parties également de critères de classification. Il s'agit :

- Une température,
- Un flux,
- Une température et un flux,
- Deux ou plusieurs températures.

De même, la façon dont les valeurs de températures sont considérées (valeurs moyennes ou localisées) et d'autre part, sur quelle partie de l'échantillon les mesures sont prises:

- A l'endroit de perturbation ;
- En dehors de perturbation ;
- Ou bien pour les deux cas précédents (sur et hors perturbation)

3.3.4. Synthèse des différentes méthodes :

3.3.4.1. En régime permanent

- **Plaque chaude gardée :**

Cette méthode est absolue et offre de très bons résultats pour les matériaux isolants dans la mesure où les résistances de contact sont négligeables. Ses seuls inconvénients sont d'une part la durée de la mesure inhérente aux méthodes en régime permanent et d'autre part la nécessité

d'avoir des échantillons de relativement grande taille. Par ailleurs, dans le cas de matériaux très peu denses, cette méthode souffrirait d'imprécision sur la mesure de la température à la surface des échantillons.

En régime permanent et en transfert unidirectionnel, l'expression du flux net Φ traversant la surface S d'un mur d'épaisseur e s'exprime comme suit.

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dz} \quad (3.29)$$

D'où l'expression de la conductivité thermique :

$$\lambda = \frac{\Phi_1 e_1}{S \Delta T_1} = \frac{\Phi_2 e_2}{S \Delta T_2} \quad (3.30)$$

3.3.4.2. Les méthodes en régime transitoire

- Le fil chaud

La méthode du fil chaud possède des nombreux avantages comme sa simplicité, sa rapidité. Le fait d'être applicable non seulement aux solides mais aussi aux liquides et aux matériaux pulvérulents et enfin la possibilité d'extension aux matériaux conducteurs en assurant et modélisant la température non plus sur le fil mais à une distance donnée de son centre [20, 21, 22, 23].

La seule limite des méthodes avec fil chaud est la contrainte liée à la taille de l'échantillon disponible. Celle-ci doit être suffisamment conséquente pour que l'hypothèse du milieu semi-infini soit valable pendant la durée de l'exploitation.

En se plaçant dans le cas d'un transfert radial dans un milieu semi-infini, le formalisme des quadripôles dans le domaine de Laplace permet aux temps longs d'approcher la température $T_1(t)$ du fil de longueur L par la relation 3.31:

$$T_1(t) = \frac{\Phi}{4\pi\lambda L} \ln t + Cte \quad (3.31)$$

La pente α de la partie linéaire de la courbe $T_1(\ln(t))$ de la relation (3.31) permet d'obtenir la conductivité thermique comme suit.

$$\lambda = \frac{\Phi}{4\pi L \alpha} \quad (3.32)$$

3.3.4.3. Le hot disc

L'originalité de cette méthode tient dans le fait que la mesure de la température $T_1(t)$ s'effectue par la mesure de la résistance électrique du circuit parcourant la sonde. De ce fait, le circuit d'alimentation en énergie sert également de circuit de masse. L'avantage par rapport au fil chaud ou au plan chaud est qu'aucune partie de l'élément chauffant n'est soumise aux effets de bords dus aux pertes latérales car celui-ci se trouve entièrement au cœur du matériau.

Cependant, étant donné les petites dimensions du hot disc, la connexion filaire servant à alimenter celui-ci en énergie peut être génératrice de perturbations et introduire un biais dans la modélisation de sa température. Ce biais ne pouvant qu'être accentué dans le cas de matériaux très isolants tels que les aérogels et d'autant plus qu'un faible diamètre du hot disc devrait être envisagé pour ces matériaux.

Les paramètres tels que la diffusivité thermique et la conductivité thermique ne sont pas connus de ce modèle. Ils sont déterminés par processus d'itération des moindres carrés non-linéaires.

3.3.4.4. La méthode de flash

La très populaire, la méthode flash [24, 25, 26, 27] repose sur l'interprétation de la réponse aux temps courts d'un échantillon soumis à un flux de chaleur quasi-impulsionnel. La méthode flash s'adapte parfaitement aux matériaux conducteurs et isolants lourds. Les très bons isolants légers sont les seuls matériaux qui résistent aux méthodes flash. Les causes sont d'abord l'hypothèse d'absorption surfacique du flux qui devient fautive pour les matériaux hautement poreux. Ensuite, la mesure de température de surface n'est pas possible par des méthodes optiques pour les mêmes raisons. De même que la mesure par thermocouple devient également imprécise. Enfin, l'hypothèse d'égalité des coefficients d'échange entre la face avant et la face arrière est contestable pour un matériau très isolant voire super-isolant et la séparation de ces coefficients dans le modèle conduit généralement à des corrélations avec les propriétés thermiques.

3.3.5. Conclusion

- Les méthodes en régime permanent nécessitent des tailles d'échantillon relativement grandes pour être insensibles aux pertes latérales. Qui, par ailleurs seraient complètement corrélée donc indiscernable de la conductivité thermique.
- Les méthodes à sonde faisant l'hypothèse d'un milieu semi-infini comme le plan chaud, le fil chaud, le ruban chaud ou le hot disc sont difficilement applicables. D'une part un matériau

très isolant implique une prise en compte très difficile des transferts dans les sondes. Celles-ci sont hétérogènes et plus conductrices que l'échantillon, impliquant une influence accrue des pertes et rendant inapplicables des modèles simples. D'autres part, dans le cas d'un matériau très peu dense, la capacité calorifique volumique de la sonde n'est plus négligeable devant celle du matériau. Elles risquent donc de se révéler corrélées entre elles.

- La mesure de température en surface d'un matériau très léger est imprécise et l'hypothèse d'un flux incident absorbé en surface étant fautive dans le cas de la méthode flash, cette dernière n'est pas adaptée à un système monocouche. Par ailleurs, sa modélisation même dans le cas d'un système tri-couche implique des corrélations entre le flux incident, les pertes et la conductivité thermique.

Toutes ces méthodes présentent des difficultés expérimentales telles que :

- l'existence de résistances de contact,
- les fuites radiales et axiales,
- les difficultés de mesure de la température,
- homogénéité du champ de températures, etc.

Pour limiter l'influence de certains de ces paramètres, nous avons retenu de réaliser nos mesures en géométrie cylindrique avec un flux de chaleur imposé suivant la direction axiale. Cette géométrie présente un meilleur rapport section / surface latérale ($0,04 \text{ m}^2 / 0,16 \text{ m}^2$) et permet donc de limiter les pertes axiales. De plus, les deux sections du cylindre seront isolées du milieu ambiant par 2 blocs de polystyrène de 150 mm d'épaisseur. Le transfert de chaleur devrait alors être exclusivement radial.

La source de chaleur en position axiale est une cartouche chauffante ACIM JOUANIM spéciale inox de 50 W de puissance et de 10 mm de diamètre. Un tube en cuivre de 10/12 mm de diamètre sert d'interface entre la cartouche et l'échantillon. Son rôle est d'uniformiser la température sur la face interne de l'éprouvette. Pour limiter la résistance de contact cuivre-argile, le tube est inséré dans le moule avant la terre qui sera ensuite compactée. Le bon contact thermique cartouche chauffante-cuivre est quant à lui assuré par une huile conductrice.

L'argile a une conductivité thermique de l'ordre de $0,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ qui peut varier avec son humidité et la contrainte de compactage. Pour vérification, nous prévoyons des mesures sur un

bloc de PVC identique en taille et dont la conductivité thermique est donnée à $0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Les résultats sont présentés dans le tableau 3-17

Tableau 3-17 : Mesure des conductivités thermiques de PVC

Valeurs mesurées							Calcul de $\lambda = f(\text{rapport de diamètre})$						
Tcu	T1	T2	Tp	Tamb	I(A)	U(V)	d1/dcu	d2/dcu	dp/dcu	d2/d1	dp/d1	dp/d2	Moyenne
53,4	33,7	27,1	26,4	21,0	0,0596	62,3	0,178	0,179	0,179	0,173	0,172	0,166	0,175
38,0	29,3	26,5	26,2	24,0	0,04	40	0,177	0,176	0,176	0,175	0,175	0,173	0,175
81,0	41,0	28,0	26,7	26,3	0,081	88,56	0,173	0,172	0,172	0,170	0,170	0,173	0,171

3.3.6. Conductivité thermique d'une paroi cylindrique

En régime stationnaire, dans un système de coordonnées cylindriques, l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\Delta T \equiv \nabla^2 T = 0 \quad (3.32)$$

$$\text{Soit : } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (3.33)$$

En considérant le cylindre infini, ce qui se justifie par la pose d'isolant sur les 2 sections, le problème devient unidimensionnel :

$$T(r, \theta, x) = T(r) \quad (3.34)$$

$$\text{L'équation devient alors : } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.35)$$

Pour une géométrie cylindrique en régime stationnaire sans production de chaleur, la répartition de la température radiale se déduit de l'équation :

$$T(r) = A \ln(r) + B \quad (3.36)$$

A et B sont déterminées par les conditions aux limites du problème :

$$T(r = r_i) = T_i \quad T(r = r_e) = T_e$$

$$\text{Soit : } A = \frac{T_i - T_0}{\ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right)} \quad B = T_i + \frac{T_i - T_0}{\ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right)} \ln r_i$$

L'intégration de l'équation entre les rayons r_1 et r_2 revient à écrire la conservation de la chaleur comme suit :

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{-2\pi L \lambda}{\Phi} dT \quad (3.37)$$

Finalement, la valeur de la conductivité thermique s'exprime en fonction du flux thermique, des températures et des grandeurs géométriques :

$$\lambda = \frac{\Phi \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi L (T_1 - T_2)} \quad (3.38)$$

Application :

$$\lambda_1 = \frac{\Phi \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi L (T_1 - T_2)} \quad \text{et} \quad \lambda_2 = \frac{\Phi \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \pi L (T_2 - T_3)}$$

Avec : $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = \frac{\Phi \ln\left(\frac{r_3}{r_1}\right)}{2 \pi L (T_1 - T_3)}$ en régime permanent.

3.3.6.1. Fabrication des éprouvettes

Un moule métallique de 16 cm de diamètre sur 32 cm de hauteur et une presse hydraulique de compactage de 12 tonnes sont utilisés pour la confection des éprouvettes. La teneur en eau est appréciée pendant la préparation des éprouvettes. Une fois que le mélange est bien homogénéisé, il est introduit dans le moule et soumis à une pression de 2 MPa pour obtenir une éprouvette cylindrique (voir figure 3-21). Il est séché dans un premier temps à la température ambiante du Laboratoire LERMAB pendant une semaine puis à l'étuve pendant 3 jours à 60°C. Les éprouvettes sont disposées pour la mesure de la conductivité selon le paragraphe (dispositif expérimental ci-dessus) et les résultats sont présentés dans le tableau 3-18 et la figure 3-21.



Figure 3-21: Fabrication des éprouvettes

Huit éprouvettes sont fabriquées à raison d'une éprouvette par formulation pour déterminer leurs conductivités thermiques.

3.3.6.2. La masse volumique

La masse volumique des éprouvettes est déterminée comme suit :

Une fois que les éprouvettes sont démoulées et séchées jusqu'à la stabilisation de leurs masses, elles sont pesées sur une balance électronique de 30 kg avec une précision de 0,001 g et leurs dimensions sont déterminées pour calculer leurs masses volumiques selon la relation 3.39.

$$\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{m}{v} \quad (3.39)$$

Les résultats des masses volumiques sont présentés dans le tableau 3-18.

Tableau 3-18 : Formulations pour le calcul de conductivité thermique

Formulations	Masses volumiques (kg/m ³)	W (%)	Nombre
100%A	1888	14	1
99,5%A-0,5%P	1759	14	1
99%A-1%P	1644	13	1
98,5%A-1,5%P	1606	12	1
70%A-30%S	1977	13	1

65%A-30%S-5%GA	2033	12	1
60%A-30%S-10%GA	1980	11	1
55%A-30%S-15%GA	1925	10	1

Avec A : argile ; P : paille de riz et GA : gomme arabique

3.3.6.3. Dispositif expérimental

Les caractérisations thermiques ont été effectuées au Laboratoire LERMAB. Le schéma du dispositif expérimental est illustré par la figure 3-22. Il se compose :

- D'une cartouche chauffante ACIM JOUANIM spéciale inox de 50 W de puissance et de 10 mm de diamètre.
- D'un tube de cuivre de 10/12.
- De thermocouples type K, chemisés de 0,5 mm de diamètre avec soudure chaude isolée. L'acquisition de données (températures) se fait par l'intermédiaire d'une centrale d'acquisition ALMEMO 2290-8 qui a été préalablement étalonnée.
- Tension et courant sont mesurés par un multimètre de précision BBC M 2042.
- La tension est ajustée par une résistance variable de type « Variac ».

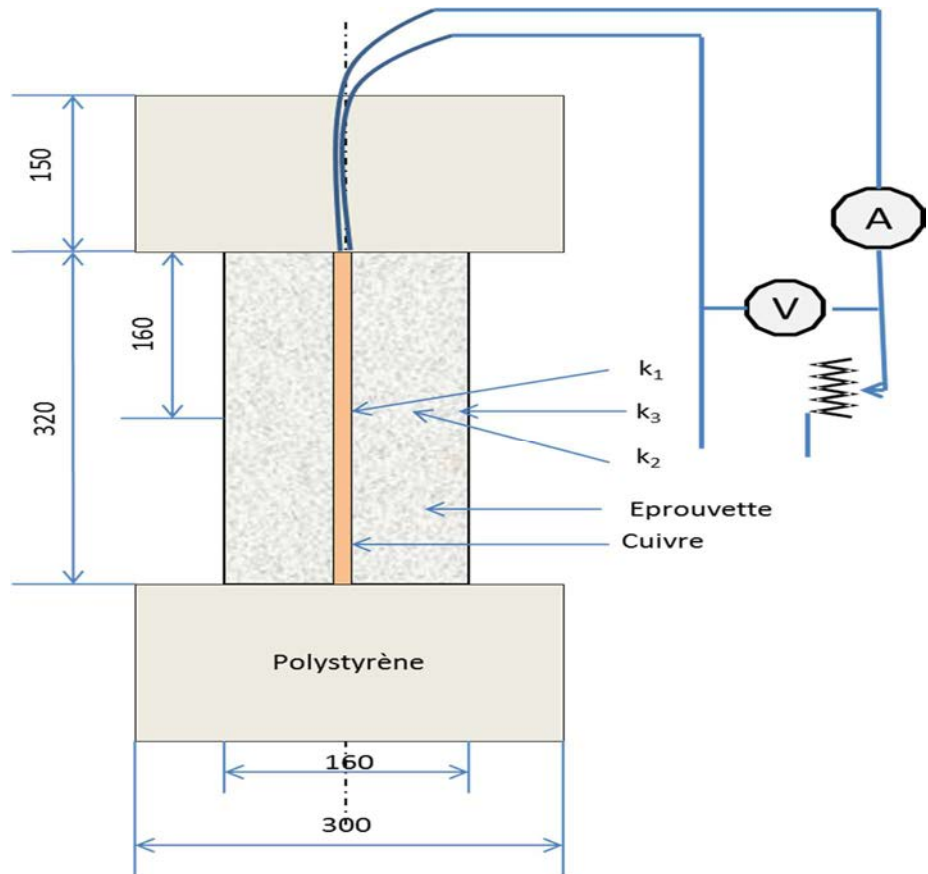


Figure 3-22 : Dispositif expérimental

Les mesures de températures sont réalisées avec des thermocouples type K, chemisés de 0,5 mm de diamètre avec soudure chaude isolée. La position des thermocouples, est représentée par la figure 3-23 et la photographie du dispositif expérimental est représentée par la figure 3-24.

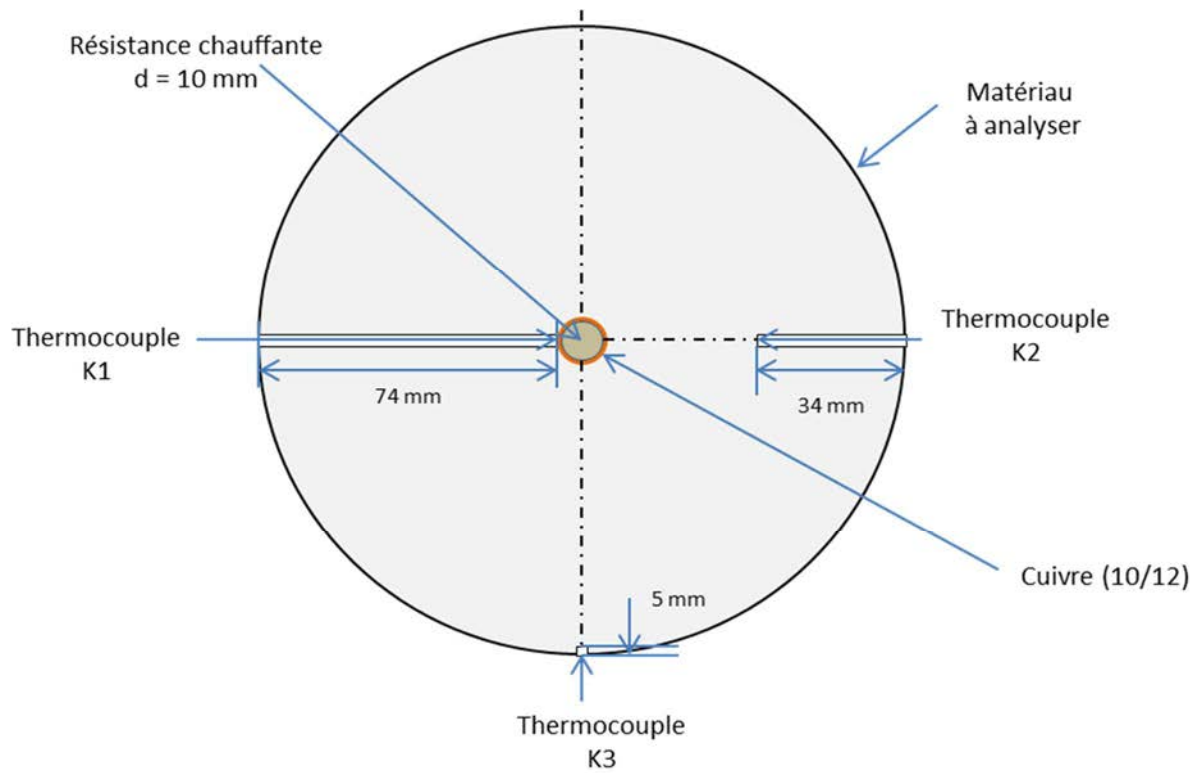


Figure 3-23 : Position des thermocouples

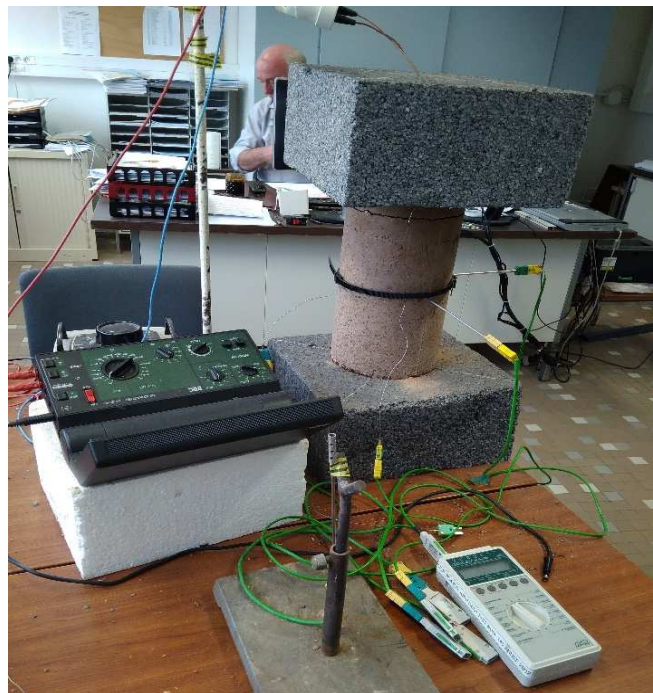


Figure 3-24 : Photographie du dispositif expérimental

3.3.6.4. Etalonnage de la cartouche chauffante

Nous avons procédé à des relevés de température afin de réaliser un bilan de flux échangé par la surface du cuivre. D'abord la puissance de la cartouche chauffante est déterminée par la relation :

$$P(W) = U(V) \times I(A) \quad 3.40$$

les résultats sont récapitulés dans les tableaux 3-19

Tableau 3-19 : les éléments de mesure de la cartouche chauffante

U (V)	I (A)	P (W)	T _{cu} (°C)	T _{amb} (°C)
20	0,0344	0,688	26,8	21
40	0,0511	2,060	32,5	21
60	0,0678	4,068	39	21
80	0,0894	7,152	58,3	21
100	0,1066	10,66	71,6	21
120	0,1192	14,304	80,3	21
140	0,1369	19,166	94,3	21
160	0,1567	25,072	110	21
180	0,177	31,86	130	21
200	0,2018	40,36	150	21
220	0,2181	47,982	163	21
230	0,2212	50,876	178	21

Le constructeur donne 50 W de puissance sous 230 V. nous avons vérifié par calcul que la puissance fournie était bien cédée à l'air par rayon considéré. Les résultats sont donnés dans le tableau 3-20.

$$P'(W) = \Phi_{cv} + \Phi_{rad} \quad 3.41$$

Le coefficient d'échange par convection est déterminé comme suit :

$$\Phi_{cv} = h_{cv} \cdot S \cdot (T_P - T_{air}) \text{ avec } N_U = \frac{h_{cv} \times L}{\lambda_{air}} \text{ or } N_U = f(G_R \cdot P_r),$$

$$P_r = \frac{c_p}{\lambda_{air}} \times \mu \text{ et } G_R = \beta \times g \times \frac{\rho^2}{\mu^2} \times L^3 \times (T_{cu} - T_{air}), R_a = P_r - G_R,$$

$$\text{Si } R_a < 10^9, N_U = 0,52 \times R_a^{1/4}; \text{ Si } R_a > 10^9, N_U = 0,104 \times R_a^{1/3},$$

A partir de cette relation, on tire le coefficient d'échange par convection h_{cv} pour calculer le flux radiatif.

N_U = nombre de Nusselt; P_r = nombre Prandtl; G_R = nombre de Grashof

R_a = nombre de Rayleigh. Leurs valeurs sont présentées dans le tableau 3-20.

Les propriétés thermophysiques de l'air sont évaluées à la température du film. Avec $T_{film} = \frac{T_{cu} + T_{air}}{2}$

Tableau 3-20 : Tableau : Echanges convectifs par la surface de cuivre

U (V)	T _{film}	G _R	Pr	N _U	h _{conv}	Φ _{conv}
20	296,9	963	0,70	2,65	6,29	0,44
40	299,75	1890	0,70	3,14	7,45	1,03
60	303	2930	0,70	3,50	8,31	1,80
80	312,65	5880	0,70	4,17	9,90	4,45
100	319,3	7810	0,70	4,47	10,62	6,48
120	323,65	9030	0,70	4,64	11,02	7,88
140	330,65	10900	0,70	4,86	11,55	10,22
160	338,5	13000	0,70	5,08	12,06	12,94
180	348,5	15400	0,70	5,30	12,59	16,56
200	358,5	17700	0,70	5,49	13,04	20,29
220	365	19200	0,70	5,60	13,30	22,78
230	372,5	20800	0,70	5,71	13,57	25,69

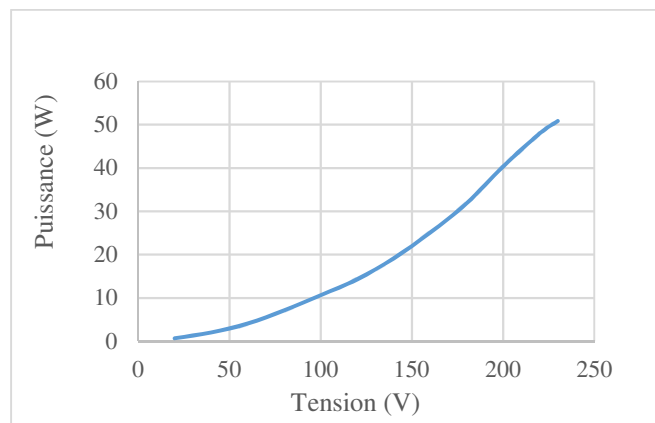


Figure 3-25 : puissance en fonction de la tension du courant

Le flux radiatif est déterminé comme suit :

$$\Phi_{rad} = \Phi_{net}(cuivre \rightarrow \infty) \equiv \Phi_{perdu\ cu} - \Phi_{gagné\ cu=perdu\ \infty}$$

$$\Phi_{perdu\ cu} = \varepsilon_{cu} \times \sigma \times S_{cu} \times T_{cu}^4 \times f_{cu \rightarrow \infty}$$

$$\Phi_{gagné\ cu} = \varepsilon_{\infty} \times \sigma \times S_{\infty} \times T_{\infty}^4 \times f_{s \rightarrow cu}$$

Par une réciprocité :

$$S_i \times f_{ij} = S_j \times f_{ji} \leftrightarrow f_{\infty \rightarrow cu} \times S_{\infty} = S_{cu} \times f_{cu \rightarrow \infty} \equiv f_{\infty \rightarrow cu} = \frac{S_{cu}}{S_{\infty}} \times f_{cu \rightarrow \infty} \text{ et } f_{cu \rightarrow \infty} = 1$$

$$\Phi_{net} = \varepsilon_{cu} \times \sigma \times S_{cu} \times T_{cu}^4 \times 1 = \varepsilon_s \times \sigma \times S_{\infty} \times T_{\infty}^4 \times \frac{S_{cu}}{S_{\infty}} = S_{cu} \times \sigma \times (\varepsilon_{cu} \times T_{cu}^4 - \varepsilon_s \times T_{\infty}^4)$$

$$\Phi_{net} = S_{cu} \times \sigma \times (\varepsilon_{cu} \times T_{cu}^4 - \varepsilon_{\infty} \times T_{\infty}^4) \equiv \text{la salle est considérée comme un corps noir}$$

et le cuivre est peint en noir mat d'où ($\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{\infty} = 1$)

$$\sigma = \text{constante de Stefan – Boltzmann} = 5,67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

le flux échangé avec l'air ambiant sont récapitulés dans les tableaux 3-21.

Tableau 3-21 : flux échangés avec l'air ambiant

U (V)	h_{conv}	Φ_{conv}	Φ_{rad}	P'(W)	P (W)
20	6,29	0,44	0,42	0,86	0,688
40	7,45	1,03	0,85	1,88	2,060
60	8,31	1,80	1,37	3,18	4,068
80	9,90	4,50	3,13	7,58	7,152
100	10,62	6,48	4,54	11,02	10,66
120	11,02	7,88	5,55	13,43	14,304
140	11,55	10,22	7,34	17,55	19,166
160	12,06	12,94	9,61	22,55	25,072
180	12,59	16,56	12,93	29,49	31,86
200	13,04	20,29	16,79	37,08	40,36
220	13,30	22,,78	19,61	42,39	47,982
230	13,57	25,69	23,19	48,88	50,876

Nous notons un écart maximal de 4 % entre la valeur mesurée de la puissance de la cartouche (P(W)) et le flux échangé avec l'air ambiant (P'(W)) sur la plage de tension que nous avons utilisée (100-230V).

3.3.6.5. Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique de nos échantillons est déterminée en prenant en compte les caractéristiques géométriques de l'échantillon, les variations des températures et le flux de chaleur selon la relation (3.38). Les différentes grandeurs sont présentées dans les tableaux 3-21 et 3-22. Les valeurs de températures utilisées pour le calcul de λ , sont prises en régime permanent (voir figure 3-26).

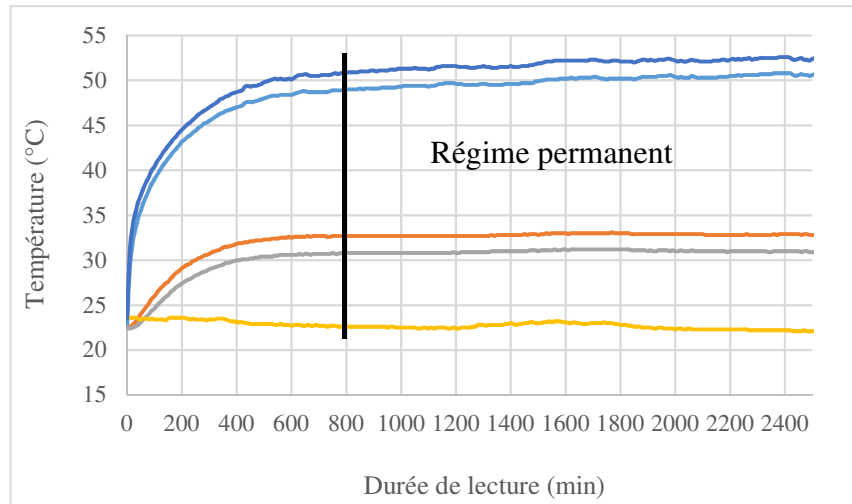


Figure 3-26 : courbe de température

Tableau 3-22 : les éléments de mesure

échantillons	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T _p (°C)	T _{amb} (°C)	U(V)	I(A)
70%A-30%S	38,3	33,4	31,9	31	24,4	101,6	0,0915
65%A-30%S-5%GA	47,3	34,3	31,5	29,3	23	107,7	0,0985
60%A-30%S-10%GA	49,1	37,4	34,9	34,2	26,4	109,6	0,0996
55%A-30%S-15%GA	47,1	37,5	33,7	33,1	25,2	110,3	0,102
100%A	54,5	33,3	31,5	28,5	20,2	151,2	0,1372
99,5%A-0,5%P	48,7	38,3	35,1	32,2	24	111,6	0,1014
99,5%A-1%P	48	40	35,9	33,1	24,5	112,1	0,1036
99,5%A-1,5%P	41,5	34,7	29,8	28,3	19,5	110,7	0,1011

Tableau 3-23: Caractéristiques géométriques

échantillons	D _i (m)	D ₁ (m)	D ₂ (m)	D ₃ (m)	D _e (m)	hb (m)	hc (m)
70%A-30%S	0,012	0,02	0,094	0,15	0,16	0,31	0,32
65%A-30%S-5%GA	0,012	0,016	0,088	0,14	0,16	0,29	0,32
60%A-30%S-10%GA	0,012	0,018	0,104	0,148	0,16	0,315	0,32
55%A-30%S-15%GA	0,012	0,016	0,078	0,152	0,16	0,29	0,32
100%A	0,012	0,023	0,091	0,135	0,155	0,3	0,32
99,5%A-0,5%P	0,012	0,015	0,085	0,145	0,155	0,315	0,32
99%A-1%P	0,012	0,022	0,082	0,14	0,157	0,31	0,32
98,5%A-1,5%P	0,012	0,023	0,077	0,133	0,157	0,31	0,32

Après calcul, les résultats de conductivité thermique sont présentés dans le tableau 3-24 et illustrés par la figure 3-27.

Tableau 3-24 : Conductivités thermiques des échantillons étudiés

Diamètres	Conductivité thermique λ (W/m.K)						Ecart type	Moyennes
	(D ₂ /D _i)	(D ₃ /D _i)	(D ₂ /D _i)	(D ₃ /D _i)	(D ₃ /D ₂)	(D ₆ /D _i)		
100%A	0,632	0,68	1,126	1,127	1,13	0,999	0,23	0,95
99,5%A-0,5%P	0,764	0,761	0,781	0,771	0,750	0,765	0,01	0,765
99%A-1%P	0,697	0,703	0,692	0,701	0,743	0,689	0,02	0,704
98,5%A-1,5%P	0,654	0,665	0,648	0,664	0,702	0,672	0,019	0,668
70%A-30%S	1,442	1,442	1,46	1,456	1,441	1,317	0,054	1,426
65%A-30%S-5%GA	0,67	0,701	0,692	0,724	0,875	0,741	0,07	0,723
60%A-30%S-10%GA	0,803	0,798	0,814	0,806	0,766	0,796	0,017	0,797
55%A-30%S-15%P	0,911	0,929	0,923	0,94	0,982	0,92	0,025	0,935

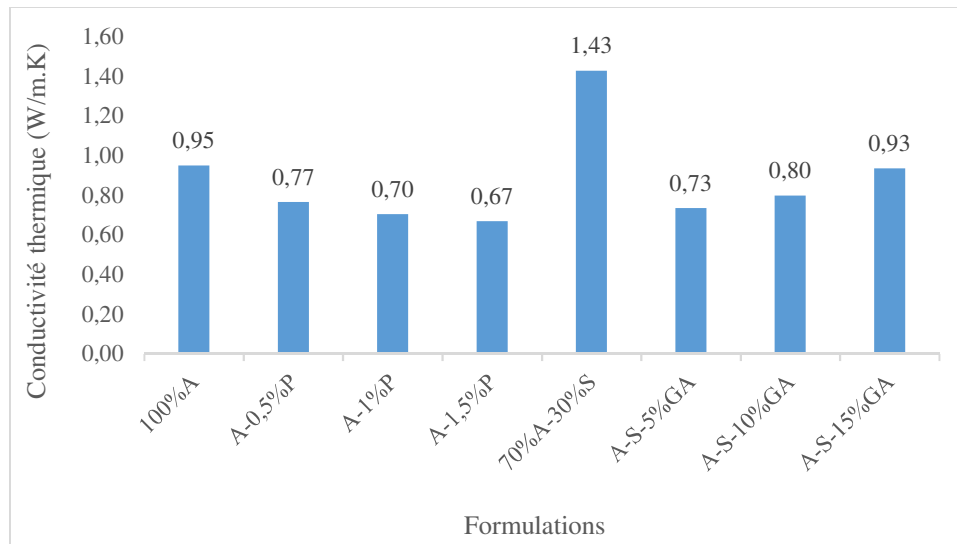


Figure 3-27 : Valeurs des conductivités thermiques des formulations

Le tableau 3-24 présente les résultats de conductivité thermique calculés sur 6 rapports de diamètres différents pour les échantillons étudiés. Ils présentent une certaine dispersion plus ou moins importante en fonction de formulations. Les valeurs des écart-types varient de 0,01 à 0,054. La température ambiante peut influencer sur les résultats de λ . Par exemple, une différence de $\pm 1^\circ\text{C}$ lors de la manipulation, pourra modifier les résultats de λ jusqu'à 4%. De même, une erreur de 1 cm sur le diamètre des échantillons, modifie les résultats de λ à hauteur de 6%.

Ces résultats seront analysés et interprétés dans le chapitre 4.

3.4. Caractéristiques mécaniques

Des blocs en BTC de dimension 30 x 15 x 8 cm, appelé (brique en BTC) et des éprouvettes de dimensions 4 x 4 x 16 cm, appelé (épreuve) sont fabriquées avec des matériaux locaux en utilisant plusieurs formulations. Les détails sont donnés dans les paragraphes ci-dessous.

3.4.1. Les formulations des matériaux

Les mêmes formulations sont utilisées pour toutes les éprouvettes étudiées dans ce travail. Elles sont préparées avec un mélange d'argile, de sable, de gomme arabique, de paille de riz et d'eau en proportions variées. Une fois les éprouvettes séchées, elles sont testées en compression et en traction pour estimer leur résistance mécanique.

Le mélange est préparé comme suit :

Les passants au tamis de 5 mm pour l'argile et les passants de 2 mm pour la gomme arabique sont retenus pour la préparation des éprouvettes. Le mélange est constitué à sec entre l'argile, la gomme arabique et le sable. Comme la paille de riz possède un taux d'absorption élevée, elle est d'abord immergée dans l'eau jusqu'à la saturation et puis ajoutée au mélange. Ensuite l'eau est complétée. Cette procédure de préparation des matériaux est valable pour les différentes méthodes de fabrication des éprouvettes. Les dimensions de pailles de riz retenues pour ce travail sont : (longueur 3 à 8 cm et diamètre 2 à 4 mm).

3.4.2. La teneur en eau optimale (TEO)

La teneur en eau est déterminée par la méthode de compactage statique avec une presse manuelle de BTC qui consiste à préparer plusieurs éprouvettes avec des teneurs en eau différentes en exerçant une pression de 2 MPa sur les briques en BTC afin de déterminer la masse volumique sèche. La teneur en eau optimale (TEO) correspond à la valeur la plus élevée de la masse volumique sèche, appelée masse volumique sèche optimale.

La même démarche est effectuée pour déterminer la teneur en eau optimale des éprouvettes, mais avec une presse hydraulique qui consiste à fabriquer des éprouvettes par extrusion avec une contrainte de compactage de 6,13 MPa.

Les courbes de teneur en eau optimale (TEO) pour les éprouvettes fabriquées avec de l'argile et de l'eau sont présentées par la figure 3-28.

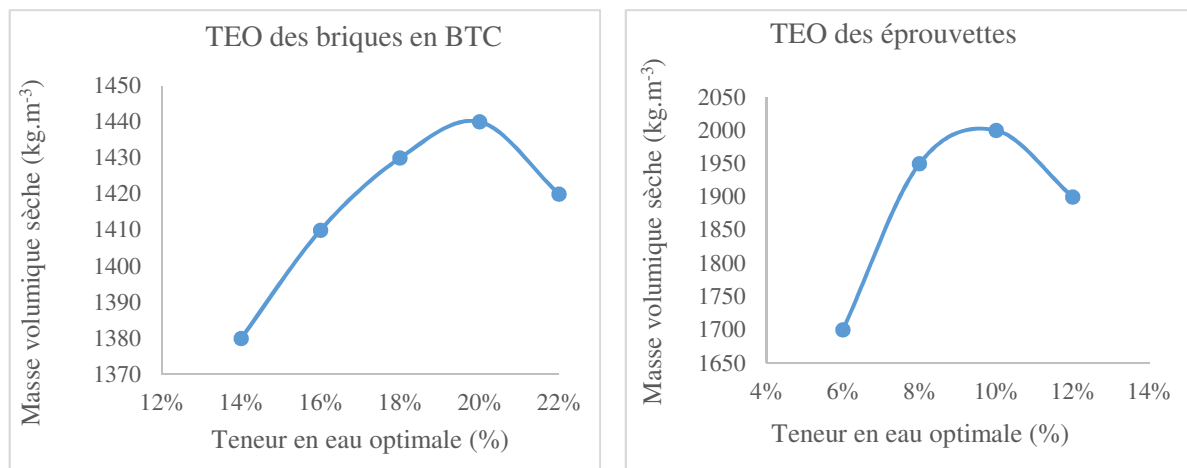


Figure 3-28 : courbe de teneur en eau optimale (TEO)

Cette figure montre que pour une faible teneur en eau, le matériau est sec et manque de cohésion (densité sèche faible). Pour une teneur en eau plus élevée, l'eau absorbe une partie de l'énergie de compactage ce qui donne aussi une faible densité sèche. La teneur en eau optimale permet de donner une densité sèche élevée. Pour les briques en BTC fabriquées avec 100% d'argile (B100%A), la teneur en eau optimale est de 20%. Par contre, pour celle des éprouvettes, elle est de 10%. Cette différence de teneur en eau peut s'expliquer par la différence de pression de compactage.

3.4.3. La préparation des mélanges

D'après Michel [27] pour préparer un bon malaxage, il faut disposer d'un matériau sec. Les échantillons sont séchés dans l'étuve à 65°C pendant 24h. Le mélange (argile + gomme arabique + sable) est préparé à sec. La paille de riz est imprégnée dans de l'eau pendant 5h et ajoutée au mélange (voir figure 3-29). Ensuite, l'ensemble est malaxé avec de l'eau manuellement. La masse du mélange sec pour fabriquer une brique en BTC est de 6,50 kg et pour une éprouvette, elle est de 0,65 kg.



Figure 3-29 : Paille de riz imprégnée dans l'eau

Plusieurs formulations sont proposées. Pour faciliter la lecture, les formulations sont nommées par des abréviations en se basant sur le taux d'argile (A), de sable (S), de gomme arabique (GA) et de pailles de riz (P), soit : I% A – J% S -K% GA – L% P. Le détail est donné dans le tableau 3-25 pour les briques en BTC et pour les éprouvettes dans le tableau 3-25.

Tableau 3-25 : Formulations de briques en BTC

N°	Désignation	W(%)	Signification
1	B100%A	20	Bloc de terre comprimé avec 100% d'argile seule
2	B95%A-5%GA	16	Bloc de terre comprimée avec 95% d'argile 5% de gomme arabique
3	B90%A-10%GA	15	Bloc de terre comprimée avec 90% d'argile 10% de gomme arabique
4	B85%A-15%GA	14	Bloc de terre comprimée avec 85% d'argile 15% de gomme arabique
5	B94,5%A-5%GA-0,5%P	16	Bloc de terre comprimée avec 94,5% d'argile 5% de gomme arabique et 0,5% de paille
6	B94%A-5%GA-1%P	14	Bloc de terre comprimée avec 94% d'argile 5% de gomme arabique et 1 % de paille
7	B93,5%A-5%GA-1,5%P	13	Bloc de terre comprimé avec 93,5% d'argile 5% de gomme arabique et 1,5% de paille
8	B89,5%A-10%GA-0,5%P	15	Bloc de terre comprimée avec 89,5% d'argile 10% de gomme arabique et 0,5% de paille
9	B89%A-10%GA-1%P	14	Bloc de terre comprimée avec 89% d'argile 10% de gomme arabique et 1% de paille

10	B88,5%A-15%GA-1,5%P	13	Bloc de terre comprimée avec 88,5% d'argile 10% de gomme arabique et 1,5% de paille
11	B84,5%A-15%GA-0,5%P	14	Bloc de terre comprimée avec 84,5% d'argile 15% de gomme arabique et 0,5 % de paille
12	B84%A-15%GA-1%P	13	Bloc de terre comprimée avec 84% d'argile 15% de gomme arabique et 1 % de paille
13	83,5%A-15%GA-1,5%P	12	Bloc de terre comprimée avec 83,5% d'argile 15% de gomme arabique et 1,5% de paille
14	B65%A-30%S-5%GA	14	Bloc de terre comprimée avec 65%A 30% de sable et 5% de gomme arabique
15	B60%A-30%S-10%GA	13	Bloc de terre comprimée avec 60%A 30% de sable et 10% de gomme arabique
16	B55%A-30%S-15%GA	12	Bloc de terre comprimée avec 55%A 30% de sable et 15% de gomme arabique

3.4.4. Préparation des briques en BTC

Dès que le mélange est préparé, il est placé dans un sac en plastique pendant environ 4h pour une bonne imprégnation. La presse utilisée pour la fabrication des briques en BTC est une presse manuelle. Le mélange des matériaux préparés est versé dans le moule et le lourd couvercle de la presse est rabattu afin d'obtenir des BTC réguliers de dimension : 30 x 15 x 8 cm. La contrainte de compactage est de 2 MPa. La procédure de fabrication est illustrée par la figure 3-30. Après démoulage, les briques sont séchées dans le laboratoire de l'ENSTP de Ndjamenana pour éviter le séchage rapide.

Au total, 160 briques ont été fabriquées (10 éprouvettes par formulation). La moitié est testée en flexion « trois points » et l'autre moitié en compression, après séchage à l'air libre complété par un passage à l'étuve pour les stabiliser complètement.



Figure 3-30 : Procédure de préparation des briques en BTC

1-2 : Préparation des matériaux ; 3-4 : Passage à la presse ; 5-6 : Fabrication des éprouvettes

3.4.5. Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes sont également fabriquées afin de donner une grande légitimité à la valorisation des matériaux locaux. Pour la préparation de ces éprouvettes, une presse hydraulique d'atelier, de 12 tonnes a été utilisée. La procédure de fabrication consiste à faire passer le matériau préparé, dans un tube de 4 x 4 x 36 cm et exercer une pression de 6,13 MPa. Une fois les éprouvettes fabriquées, elles sont déposées sur une paille pour un séchage à la température ambiante et ensuite, le séchage des éprouvettes est stabilisé par une étuve. La procédure est illustrée par la figure 3-31.

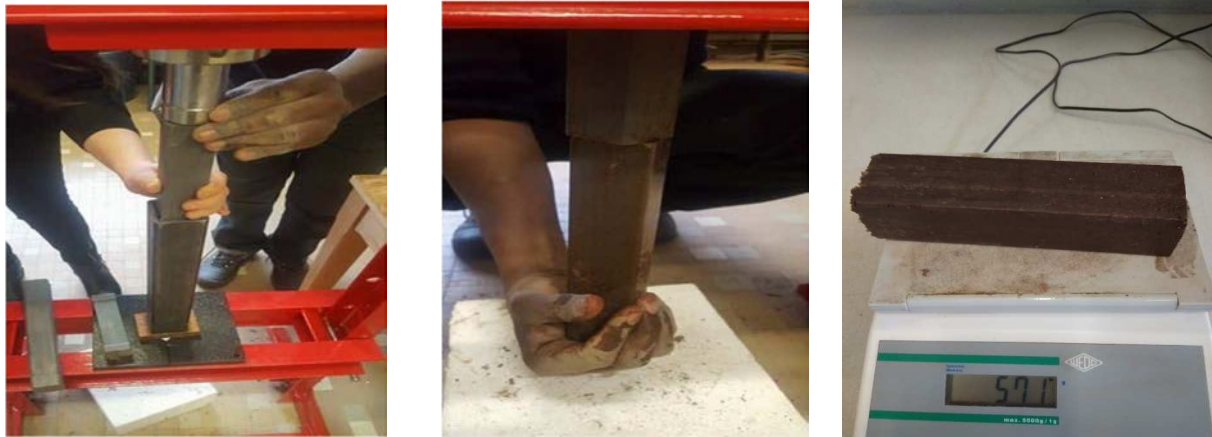


Figure 3-31 : fabrication par extrusion des éprouvettes (4 x 4 x 16 cm)

Nous avons préparé au total 44 éprouvettes par extrusion à raison de 4 éprouvettes par formulation (voir tableau 3-26).

Tableau 3-26 : Formulations des éprouvette (4 x 4 x 16 cm)

N°	Désignation	W(%)	Signification
1	B100% A	10	Bloc de terre comprimé avec 100% d'argile seule
2	B95%A-5%GA	10	Bloc de terre comprimée avec 95% d'argile 5% de gomme arabique
3	B90%A-10%GA	9	Bloc de terre comprimée avec 90% d'argile 10% de gomme arabique
4	B85%A-15%GA	8	Bloc de terre comprimée avec 85% d'argile 15% de gomme arabique
5	B70%A-30%S	10	Bloc de terre comprimée avec 70% d'argile et 30% de sable
6	B65%A-30%S-5%GA	9	Bloc de terre comprimée avec 65%A 30% de sable et 5% de gomme arabique
7	B60%A-30%S-10%GA	8	Bloc de terre comprimée avec 60%A 30% de sable et 10% de gomme arabique
8	B55%A-30%S-15%GA	8	Bloc de terre comprimée avec 55%A 30% de sable et 15% de gomme arabique
9	B99,5%A-0,5%P	10	Bloc de terre comprimée avec 99,5%A et 0,5% de paille
10	B99%A-1%P	9	Bloc de terre comprimée avec 99%A et 1% de paille
11	B98,5%A-1,5%P	8	Bloc de terre comprimée avec 98,5%A et 1,5% de paille

Les différents essais de caractérisation mécaniques sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.4.6. Les essais mécaniques

Pour les caractéristiques mécaniques, l'essai de traction est réalisé en premier lieu. Ensuite, les morceaux sont récupérés et assemblés par un mortier de 1 cm d'épaisseur pour être écrasés en compression uni-axiale pour les briques en BTC. Par contre, pour les éprouvettes, on récupère le bon morceau après l'essai de traction, l'écraser en compression. Les procédures sont décrites ci-dessous.

3.4.6.1. Essai de flexion 03 points des briques en BTC

La résistance à la traction des échantillons en argile est généralement faible. Les ouvrages en terre ne sont sollicités qu'en compression. En cas de besoin, elle est déterminée par des essais indirects tels que la « flexion trois points ». La procédure est la suivante : l'éprouvette est placée dans le dispositif de caractérisation, qui est constitué de deux pistons. Un piston supérieur sur lequel est fixé un capteur de force de 100 kN et un comparateur de déplacement. Le piston inférieur monte avec l'éprouvette jusqu'au contact avec le piston supérieur. Le capteur de force enregistre les efforts exercés sur l'éprouvette. La mesure de la résistance à la traction est donnée par la relation 3.40. Le dispositif d'essai est illustré par la figure 3-33a.

$$\sigma_t = \frac{3F_{tmax}.L}{2.b.h^2} \quad (3.40)$$

3.4.6.2. Essais de compression uni-axiale des briques en BTC

La procédure de l'ENTPE-RILEM est utilisée pour la caractérisation en compression des échantillons. Elle consiste à appliquer une force de compression sur deux demi-briques reliées par un mortier de 1 cm d'épaisseur. Cette méthode a été développée à l'ENTPE OLIVIER et al [28] et est reprise dans la norme française (XP 13-901) [29] et décrite dans CDE [30] (voir figure 3-32). Le même dispositif pour l'essai de traction est utilisé pour la caractérisation en compression, (voir figure 3-33b). Les valeurs des résistances sont données par les relations 3.41 et 3.42.

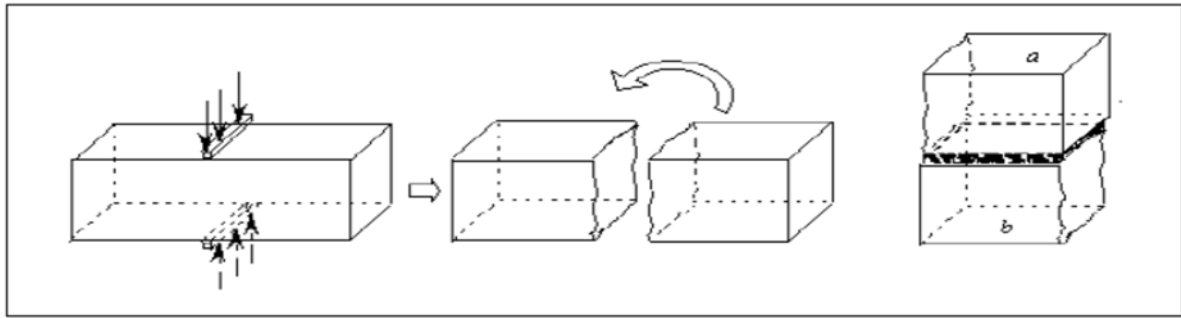


Figure 3-32 : A partir d'un essai flexion 3 points, on obtient deux demi-blocs qui seront testés en compression uni-axiale (XP 13-901) [29]

$$\sigma_c = \frac{Fr}{s} \quad (3.41)$$

$$E = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} \quad (3.42)$$



a



b

Figure 3-33 : Dispositif de caractérisation (a : essai de traction ; b : essai compression uni-axiale).

Les résultats de caractérisation mécanique sont récapitulés dans le tableau 3-27.

Tableau 3-27 : Résultats des Caractéristiques mécaniques des briques en BTC

Formulations	σ_c (MPa)	Ecart type	σ_t (MPa)	ρ_{app} (kg/m ³)	E (MPa)
B100% A	0,28	0,019	0,07	1460	7,9
B95% A-5% GA	0,38	0,011	0,21	1464	9,4
B90% A-10% GA	1,05	0,04	0,23	1466	14,85

B85% A- 15% GA	1,27	0,05	0,25	1469	17
B65%A-30%S-5%GA	1,53	0,022	0,33	1500	32
B60%A-30%S-10%GA	2,22	0,054	0,38	1523	34,9
B55%A-30%S-15%GA	2,43	0,029	0,51	1532	36,45
B94,5%A-5%GA-0,5%P	0,55	0,027	0,19	1338	12
B94%A-5%GA-1%P	0,51	0,011	0,10	1224	7,85
B93,5%A-5%GA-1,5%P	0,43	0,055	0,11	1218	5,52
B89,5%A-10%GA-0,5%P	0,74	0,042	0,26	1291	10,23
B89%A-10%GA-1%P	0,62	0,042	0,21	1168	8,44
B88,5%A-10%GA-1,5%P	0,53	0,05	0,22	1088	6,63
B84,5%A-15%GA-0,5%P	0,93	0,026	0,25	1335	10,23
B84%A-15%GA-1%P	0,81	0,023	0,26	1223	8,44
B83,5%A-15%GA-1,5%P	0,67	0,042	0,31	1203	6,63

Nos mesures montrent que la résistance en compression augmente avec le taux de gomme arabique. Par contre, la présence de paille de riz permet de chuter sa résistance mécanique ainsi que sa masse volumique. Ceci est dû à la faible masse volumique de la paille de riz. Elle de l'ordre de 460 kg.m^{-3} . Les résultats des caractéristiques mécaniques sont illustrés par les figures 3-34 ; 3-35 et 3-36.

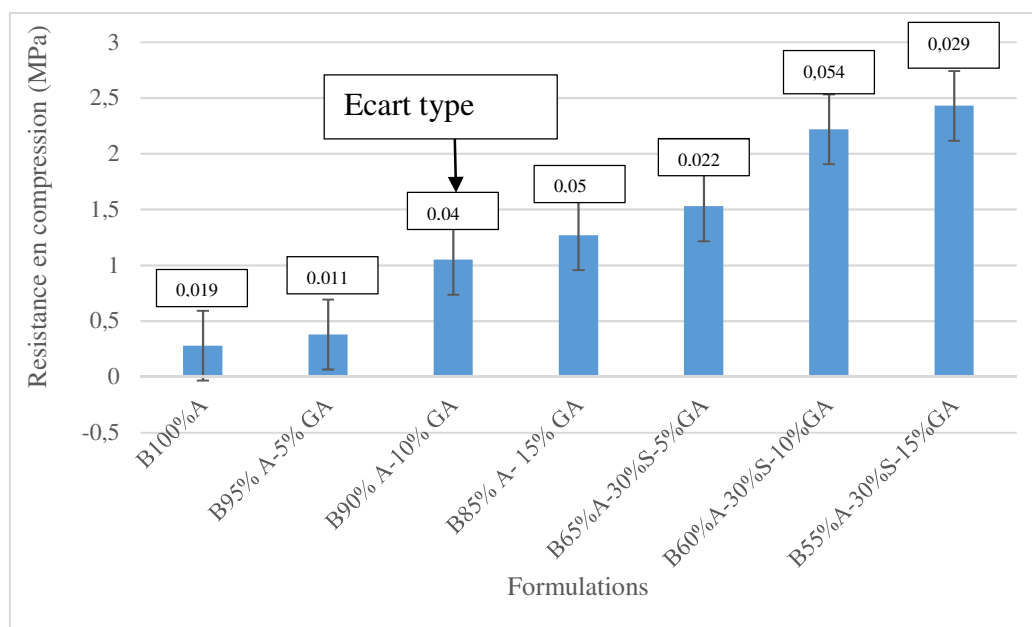


Figure 3-34 : Valeurs de résistance en compression des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile, de sable et de gomme arabique

La figure 3-34 présente les résistances en compression des éprouvettes des différentes formulations. Nous constatons que la gomme arabique améliore la résistance en compression.

De même, l'ajout de sable dans le mélange conduit à une augmentation significative de la résistance. Elle est due au renforcement de la structure solide par ajout de sable.

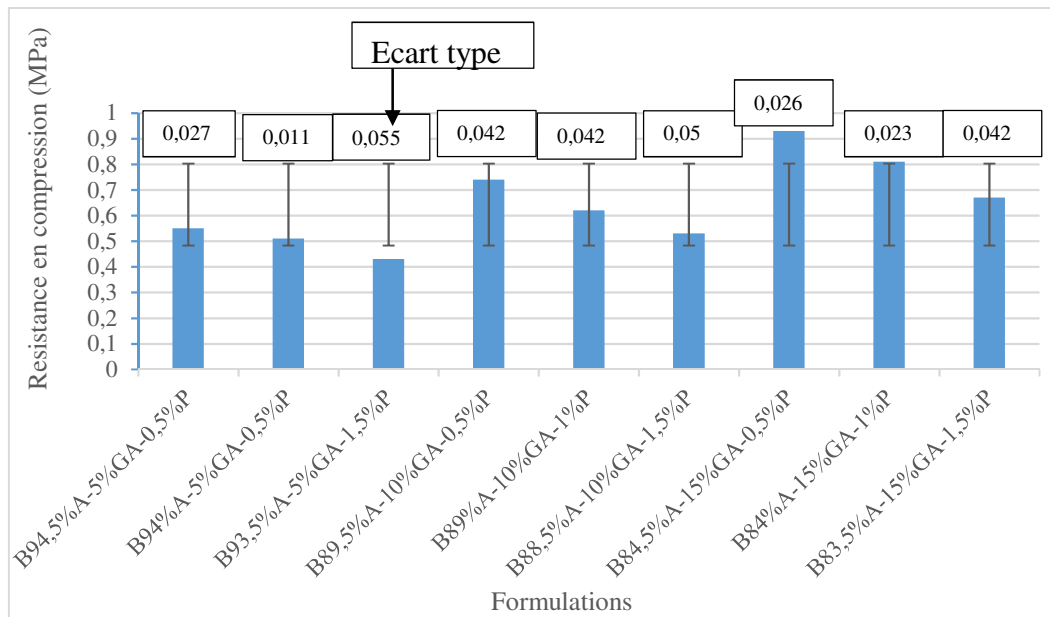


Figure 3-35 : Résistance en compression des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile de gomme arabique et de paille de riz

La figure 3-35 présente les résultats en compression des éprouvettes renforcées avec de la paille de riz. Nous remarquons que la présence de paille de riz n'améliore pas la performance mécanique, plutôt elle contribue à la baisse de la résistance. Dans la littérature, l'amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux de construction avec l'ajout des fibres n'est pas unanime. Certains travaux témoignent d'une amélioration de résistance mécanique et d'autres prouvent le contraire.

Le tableau 3-26 présente les résultats de résistances en traction des briques en BTC. Ils sont très faibles par rapport aux résultats des matériaux conventionnels (béton). Toutefois, nos résultats sont dans les mêmes ordres de grandeur que les résultats de résistance en traction présentés par quelques pays. Par exemple, la Nouvelle Zélande impose que la valeur minimale obtenue sur une moyenne de 5 échantillons ne doit pas être inférieure à 0,25 MPa. La norme australienne propose une résistance de traction nulle par absence d'essai [31].

Nous présentons également les résultats des masses volumiques des briques en BTC dans les figures 3-36 et 3-37.

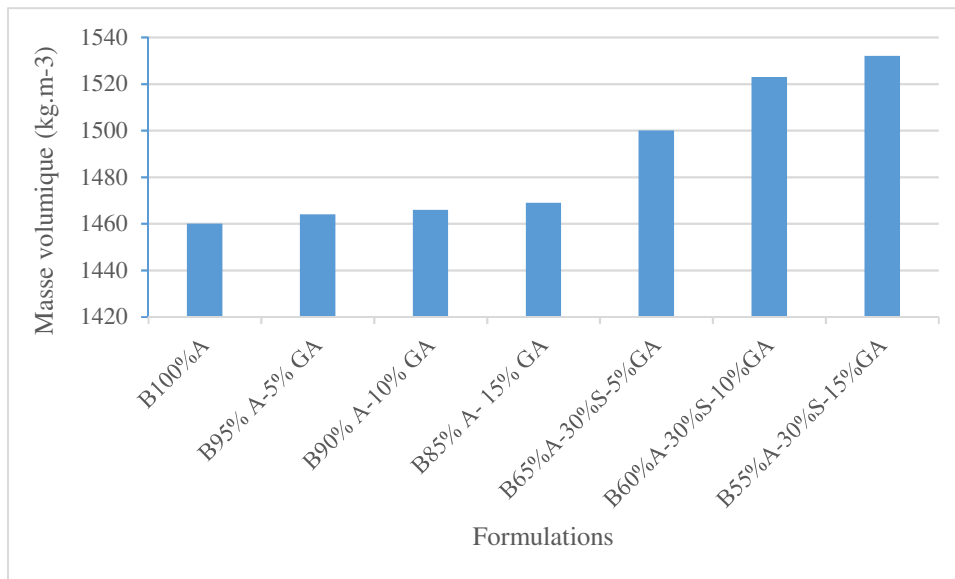


Figure 3-36 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile, de gomme arabique et de sable

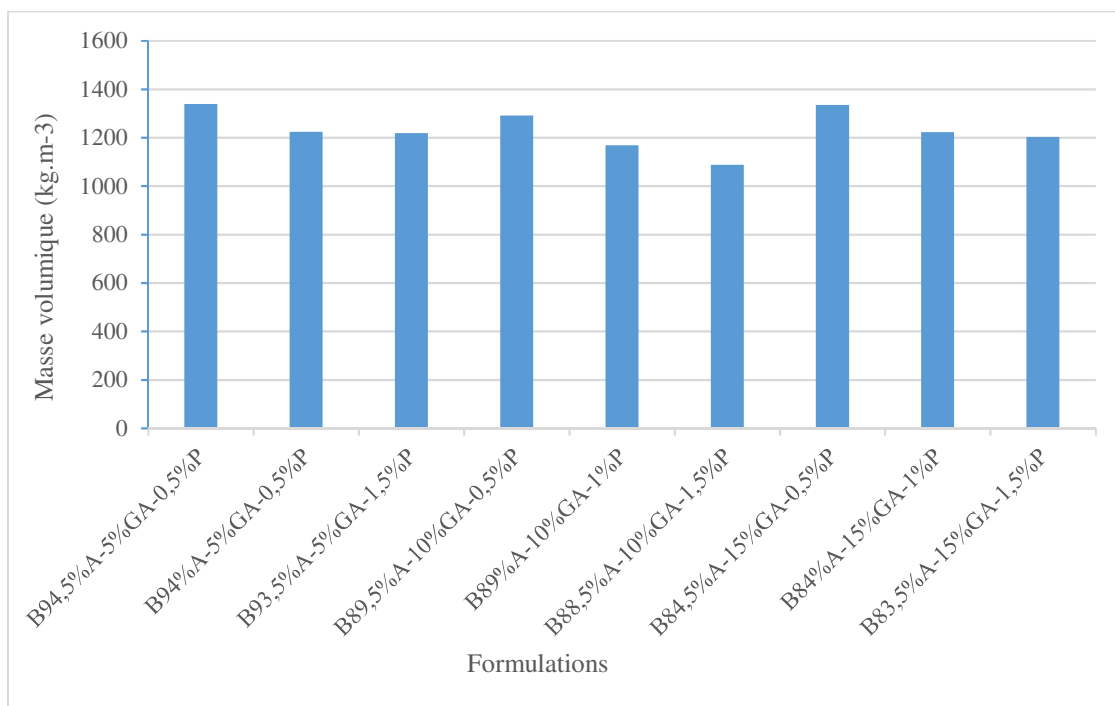


Figure 3-37 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile de gomme arabique et de paille de riz

Les résultats de masses volumiques des éprouvettes en BTC, présentés dans la figure 3-36 et la figure 3-37 montrent que la paille de riz contribue à alléger les matériaux de construction à cause de sa faible masse volumique.

3.4.6.3. Caractéristiques mécaniques des éprouvettes

Pour les caractéristiques mécaniques des éprouvettes, les procédures sont les mêmes mais l'outil de caractérisation est différent (figure 3-38). Il s'agit d'un dispositif automatique, équipé d'un logiciel qui traite et affiche les résultats de résistance mécanique sur un ordinateur. Les résultats sont récupérés et analysés par la suite. Pour les caractéristiques mécaniques des éprouvettes, après l'écrasement en flexion « trois points », on récupère l'un des deux morceaux pour l'écraser en compression. Les résultats sont présentés dans le tableau 3-28 et la figure 3-39.

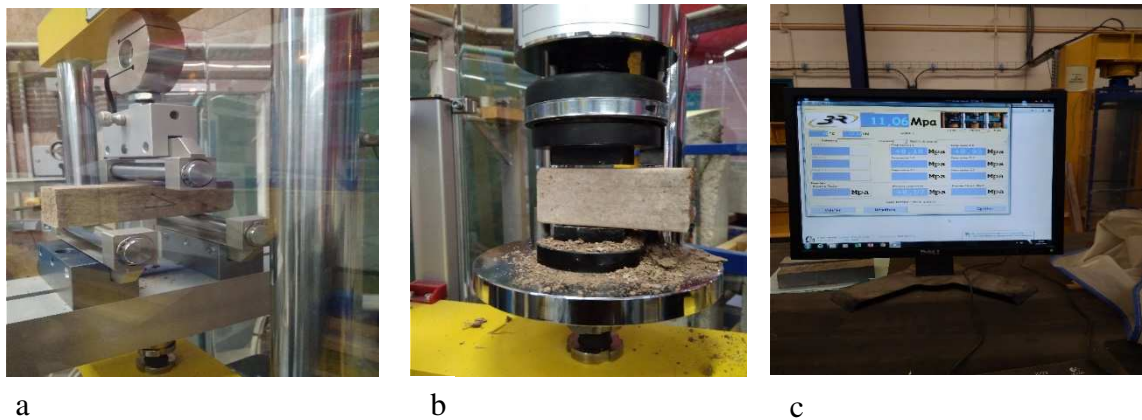


Figure 3-38 : (a-essai de traction ; b – essai de compression ; c – logiciel qui récupère les résultats)

Tableau 3-28 : les caractéristiques mécaniques des éprouvettes

Formulations	Résistance en traction		Résistance en compression		ρ_{app} (kg/m ³)	Ecart type
	σ_t (MPa)	Ecart type	σ_c (MPa)	Ecart type		
B100%A	1	0,28	3,525	0,27	1929	2,17
B95%A-5%GA	1,2	0,18	6,4875	0,36	1921	1,25
B90%A-10%GA	2,675	0,12	8,3	0,6	1927	2,82
B85%A-15%GA	2,4	0,28	12,12	0,73	1916	2,34
B70%A-30%S	0,55	0,06	4,525	0,28	1934	2,75
B65%A-30%S-5%GA	1,35	0,53	6,1425	0,33	1934	2,9
B60%A-30%S-10%GA	1,725	0,48	9,775	0,31	1932	2,26
B55%A-30%S-15%GA	3,175	0,29	13,175	0,22	1931	2,34
B99,5%A-0,5%P	0,45	0,1	3,625	0,43	1921	2
B99%A-1%P	0,4	0,29	3,575	0,34	1916	3,26
B98,5%A-1,5%P	0,25	0,06	2,425	0,15	1910	7,2

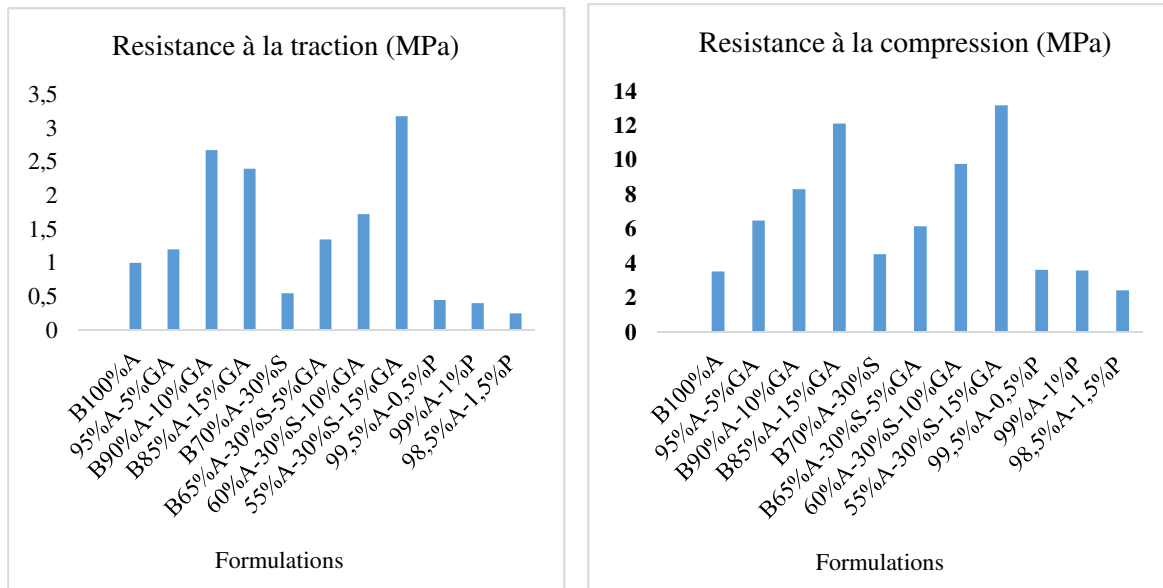


Figure 3-39 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes

Les résultats sont très intéressants. La contrainte de compactage lors de la fabrication des éprouvettes améliore nettement la résistance mécanique du matériau. La résistance à la compression passe largement au-delà de 6 MPa, soit un facteur de 10 par rapport aux briques en BTC.

Les masses volumiques des éprouvettes sont bien plus importantes que les briques en BTC. Par ailleurs, la présence de paille de riz contribue à abaisser leurs masses volumiques et en même de chuter leurs résistances de la même manière que les briques en BTC (figure 3-40, 3-41, 3-42).

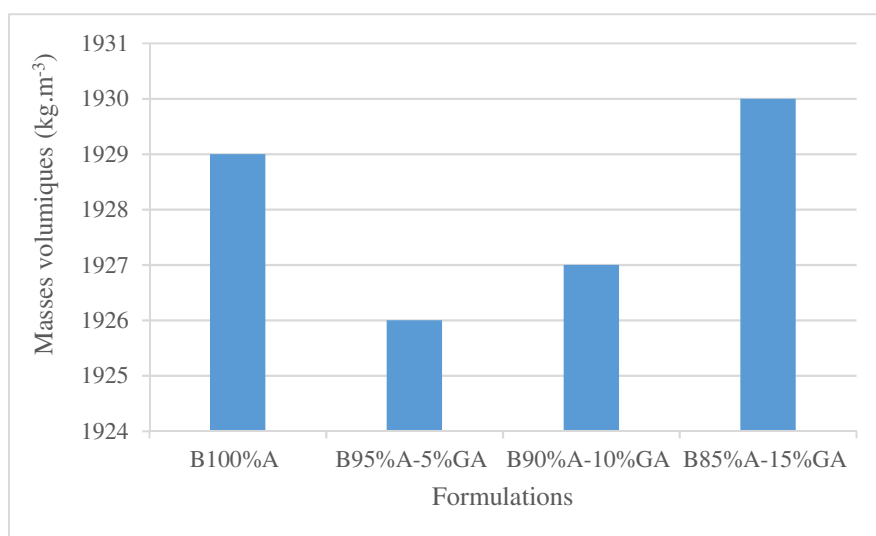


Figure 3-40 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d'argile et gomme arabique

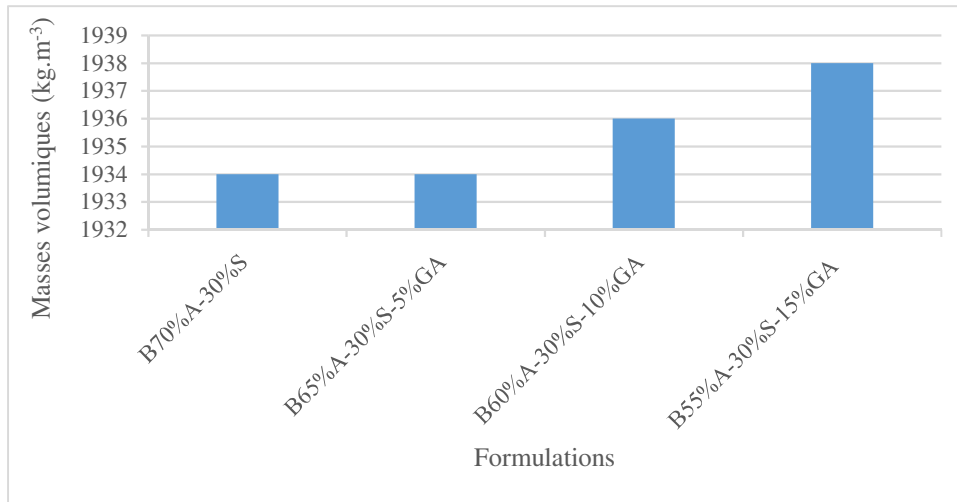


Figure 3-41 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d'argile, du sable et de gomme arabique.

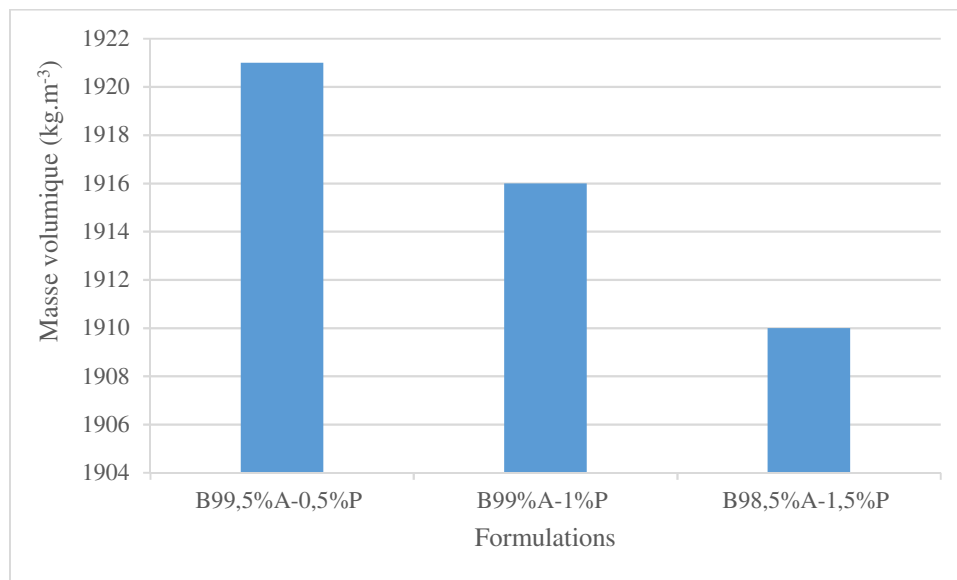


Figure 3-42 : Masses volumiques des éprouvettes fabriquées avec d'argile et de paille de riz

3.5. Test de durabilité à l'eau

La Région de N'Djamena reçoit, en saison de pluie, de 500 à 700 mm de pluie (Météo Tchad). La durabilité par rapport à l'eau fait partie également de la qualité des matériaux de construction.

Nous avons exposé des éprouvettes aux aléas climatiques (pluie, humidité et soleil) pendant un mois. Au cours de cette période, nous avons constaté que les éprouvettes non stabilisées par la gomme arabique sont dégradées (figure 3-43a). Par contre, celles qui sont stabilisées par la gomme arabique ont conservé leur bonne tenue aux aléas climatiques (figure 3-43b). Nous avons fait subir les cas les plus extrêmes aux éprouvettes. C'est-à-dire qu'elles reçoivent les

pluies sur tous les côtés. En réalité, dans la construction les briques reçoivent les pluies que sur une face. Toutes les autres parties sont protégées par les autres briques (figure 3-44). Nous pouvons dire que la stabilisation des matériaux de construction par gomme arabique, n'améliore pas seulement la résistance mécanique mais contribue également à une bonne résistance à l'eau de pluie.

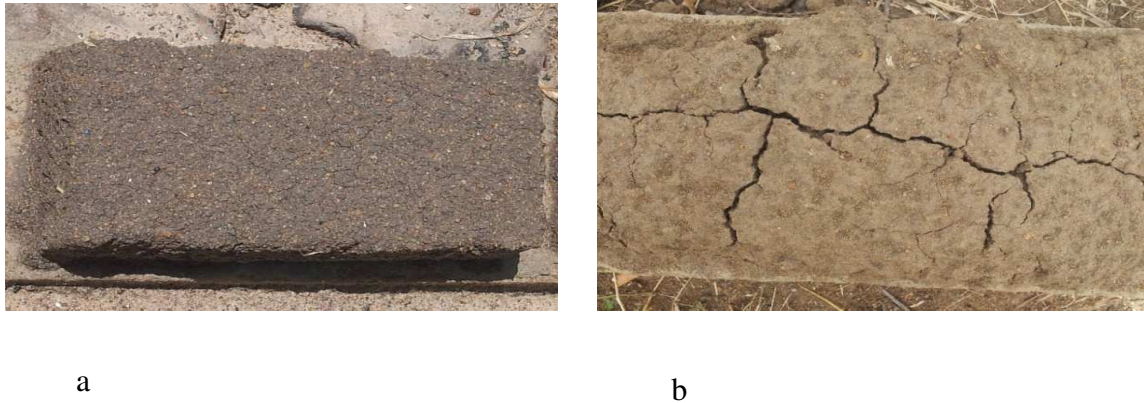


Figure 3-43 : Epreuves exposées sous pluie (a : sans stabilisant ; b : avec stabilisant par gomme arabique)

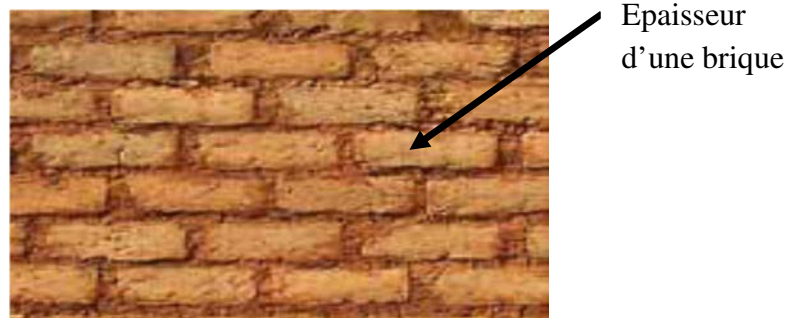


Figure 3-44 : mur en brique de terre moulée (adobe)

Cette fois ci, nous avons totalement immergé les BTC stabilisés par la gomme arabique pendant 1 heures. A partir de 15 min d'immersion, toutes les épreuves sont complètement diluées dans l'eau, (voir figure 3-45). Cette détérioration est due au fait que l'argile et la gomme arabique sont deux matériaux qui ont une grande sensibilité à l'eau. L'eau qui pénètre dans les épreuves détruit la cohésion qui existe entre l'argile et la gomme arabique et les épreuves sont délitées dans le bassin. Les BTC fabriquées avec de l'argile et de la gomme arabique ne peuvent donc pas servir de fondation aux bâtiments.



Figure 3-45 : Eprouvettes cylindriques en mélange d'argile - gomme arabique immergées dans

3.6.Conclusion.

Dans ce chapitre, les caractéristiques physiques et chimiques des matières premières qui ont permis la préparation des échantillons sont présentées. Il s'agit du sol argileux, du sable de carrière, de la gomme arabique et de la paille de riz provenant du Tchad.

Nos résultats expérimentaux sont comparés à ceux issus de la littérature. De même, nous avons présenté les différentes formulations et matériels expérimentaux utilisés dans ce travail de recherche.

Dans la partie suivante, nous analysons nos résultats mécaniques et thermiques pour dégager l'influence de la gomme arabique, de la paille de riz, du sable et de la contrainte de compactage. La maîtrise de ces paramètres doit permettre une meilleure application dans la construction.

3.7. Références bibliographiques

- [1] NF P 94-050 : détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux, (1995).
- [2] NF P 94-054 : détermination de la masse volumique des particules solides des sols méthode du pycnomètre à eau, (1991).
- [3] NF P 94-056 : Analyse granulométrique ; méthode par tamisage à sec après lavage, (1996).
- [4] NF P 94-057 : analyse granulométrique des sols, méthode par Sédimentométrie, (1992).
- [5] NF P 94-052-1 : Limite d'atterberg ; limite de liquidité à la coupelle-limite de plasticité au rouleau, (1993).
- [6] Les classifications normalisées (NF P 11-300) de septembre 1992, qui remplace l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) réalisée par le LCPC et le SETRA.
- [7] NF EN 1097-3 : essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire, Août 1998.
- [8] NF P 94-064 : Reconnaissance et Essais – Masse volumique sèche d'un élément de roche – Méthode par pesée hydrostatique, Novembre 1993.
- [9] LA Rose. C, Arnaud. L. M. Contribution aux mesures mécaniques sur la construction paille selon la technique du G.R.E.B. 2008.
- [10] Trouy-Triboulot M.-C., Triboulot P., CMatériaux bois – Structure et caractéristiques. C 925, 2001, 26 p.
- [11] Thu Nguyen. T. Mémoire de thèse : Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'élément de construction en béton de chanvre, vol 168, 2010.
- [12] Sun. Y & Cheng. J « Hydrolysis of lignocellulose materials for Ethanol Production: a Review »: Bioressource vol. 83, N°1, pp.1-11, 2002.
- [13] El Hage. R, Nicolat. B, Laurent. C. Mémoire de thèse : prétraitement du Miscanthus x giganteus. 151p, 95-97. 2010.
- [14] Pachauri R K & Reisinger A, « Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », (publié sous la direction-)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

- [15] Hendriks C.A, Worrell E, De Jager D, Blok K, Riemer P. Greenhouse; Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry gases control technologies conference, (Août 2004).
- [16] Phillips, G.O., Williams, P.A., (2000). Gum Arabic, in: Handbook of Hydrocolloids. Wood head Publishing in Food Science, Technology and Nutrition, pp. 155–168.
- [17] Bozabé K, Toukourou C. A, Gbguidi G. A & Hounkonnou M. N « article scientifique sur des Caractéristiques physico-chimique des tuiles en micro-béton fabriquées localement à base de la gomme arabique », Ecole Polytechnique d’Abomey Calavi, 4-5, vol 1-15, p 15 (2013).
- [18] Azoumah. Y. « Cours de transfert thermique ».
- [19] Vincent. F., Alain. D, Yves. J. Mémoire de thèse « Catactériastion Thermique des Matériaux Isolants Legers ». Application à des Arérogels de Faible Poids Moleculaires. 44-58, 185, 2011.
- [20] Nagazaka.Y., Nagashima A., Simultaneous measurement of the thermal conductivity and the thermal diffusivity of liquids by the transient hot-wire method. *Rev. Sci. Instrum.* 1981. 52 (2), pp.229-232.
- [21] Coquard. R., Baillis, D., Quenard, D., Experimental and theoretical study of the hotwire-method applied to low-density thermal insulators. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2006. Vol. 49 (23-24), pp. 4511-4524.
- [22] Davis. W. R., Hot-wire method for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials. *Compendium of thermophysical property measurement methods.* 1984., vol. 1, Ed. Maglic et al. Plenum Press, New York & Londres.
- [23] Zhang. X., Degiovanni, A., Maillet, D., Hot-wire measurement of thermal conductivity of solids : a new approach, *High Temperatures – High Pressures.* 1993. Vol. 25, pp. 577-584.
- [24] Parker W. J., Jenkins, W., Abott, J., Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity. *J. Appl. Phys.* 1961. Vol. 32 (9), pp. 1679-1684.
- [25] Degiovanni, A., Diffusivité et méthode flash. *Revue Générale de Thermique.* 1977. N° 185, pp. 420-441.
- [26] Degiovanni, A., Une nouvelle technique d’identification de la diffusivité thermique par la méthode flash. *Revue Phys. Appl.* 1986. Vol. 21, p. 229-237.

- [27] Hay. B., Filtz, J. R., Batsale, J.-C., Mesure de la diffusivité thermique par la method flash. *Techniques de l'Ingénieur*. 2002. R 2995.
- [28] Olivier. M, Mesbah. A, Elegarbi. Z & J-C Morel : Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. *Matériaux et construction*, vol 30 : pp515-517, (Novembre (1997)).
- [29] NF XP P 13-901 : Association Française de Normalisation. Blocs de terre comprimée pour murs et cloison. PARIS : AFNOR. (2001).
- [30] (CDE) : Centre pour le développement de l'entreprise. Blocs de terre comprimée : Procédures d'essais. Série technologies n°16. Cratère-EAG, ENTPE, p. 121, (1982).
- [31] Maniatidis. V., Walker. P.J. A review of rammed earth construction. Report for DTi Partners in Innovation Project 'Developing Rammed Earth for UK Housing'. Natural Building Technology Group, University of Bath, Bath. 2003.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DUSCUSSIONS

4.1.Introduction

Dans cette partie, les conductivités thermiques et les caractéristiques mécaniques des éprouvettes préparées en plusieurs formulations seront analysées et discutées afin de comprendre les influences de la gomme arabique et des pailles de riz dans le mélange ainsi que la contrainte de compactage et le taux de sable.

4.1.1. Conductivité thermique

Les valeurs des conductivités thermiques des toutes les formulations varient entre 0,7 à 1,4 $W.m^{-1}.K^{-1}$. La valeur la plus élevée est donnée par la formulation préparée avec 70% d'argile et 30% de sable. Elle est de l'ordre de 1,40 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Selon les auteurs USACE [27] et Doat [6], un matériau constitué d'éléments fins et grossiers donne un produit final beaucoup plus dense qu'un matériau préparé uniquement avec des éléments fins. En effet, la valeur de sa conductivité thermique est aussi élevée.

Pour les éprouvettes stabilisées par la gomme arabique, plus le taux de gomme arabique est élevé, la valeur de la conductivité thermique augmente. On peut expliquer ce phénomène par le fait que, 5% de gomme arabique dans le mélange n'est pas suffisante pour enrober tous les grains de nos matériaux. Des vides sont créés au sein de l'échantillon. Ce qui fait que la valeur de la conductivité thermique baisse. Au fur et à mesure que la quantité de la gomme arabique augmente, tous les pores sont soudés et le matériau devient compact. Par conséquent, la valeur de la conductivité thermique augmente.

Pour les éprouvettes renforcées par la paille de riz, les valeurs de conductivité thermique varient de 0,9 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour l'éprouvette en argile seule et de 0,77 à 0,67 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour celles qui sont renforcées par de la paille de riz. La valeur de la conductivité thermique baisse respectivement de 19%, 26% et 30% pour échantillons renforcés de 0,5%, 1% et 1,5% de paille de riz par rapport aux échantillons non renforcés. La différence des conductivités thermiques qui existe entre les échantillons renforcés par la paille de riz et ceux non renforcés est faible. En fait, elle peut s'expliquer par le faible taux de paille de riz dans le mélange.

4.1.1.1.L'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique

Les résultats de conductivité thermique obtenus dans ce travail de recherche sont proportionnels à leur masse volumique. Plus la masse volumique est élevée, la valeur de la conductivité augmente (voir figure 4-1).

Les auteurs Al Rim et al [1] ont également fait le même constat sur des composites cimentaires fabriqués à base de ciment portland et d'argile.

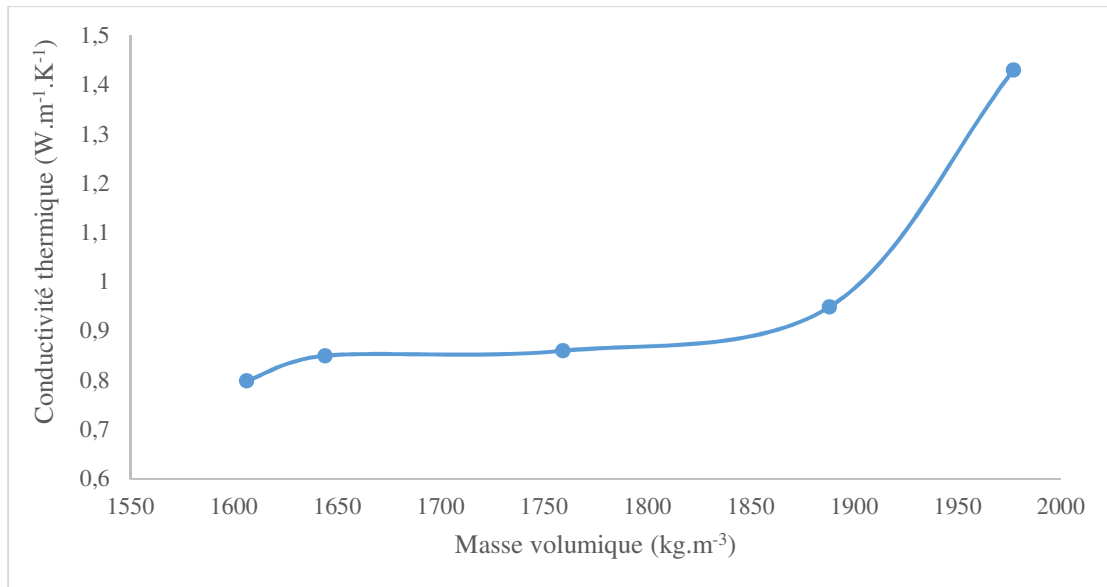


Figure 4-1 : les valeurs de conductivité thermique en fonction des masses volumiques.

4.1.1.2.L'influence de la paille de riz sur la conductivité thermique

Pour les matériaux renforcés par des fibres de palmier dattier, la conductivité thermique a baissé [2]. Cette réduction est visible pour le fait que les fibres végétales ont en général une conductivité thermique très faible. Elle est de l'ordre de (0,08 W.m⁻¹. K⁻¹) [2] pour les fibres de palmier dattier. En plus, la présence des fibres dans le composite augmente la porosité, ce qui fait réduire sa masse volumique et également la valeur de sa conductivité thermique. Aouadja et al [3] ont constaté le même comportement sur les bétons fibrés.

D'autres études sont également menées sur des matériaux de construction renforcés par le bois par Khedari et al [4]. Ils ont constaté une augmentation des vides et une diminution de la conductivité thermique.

Les résultats de nos matériaux renforcés par la paille de riz suivent la même logique que les constats faits par [2, 3, 4]. La conductivité baisse avec le taux de paille de riz (voir figure 4-2).

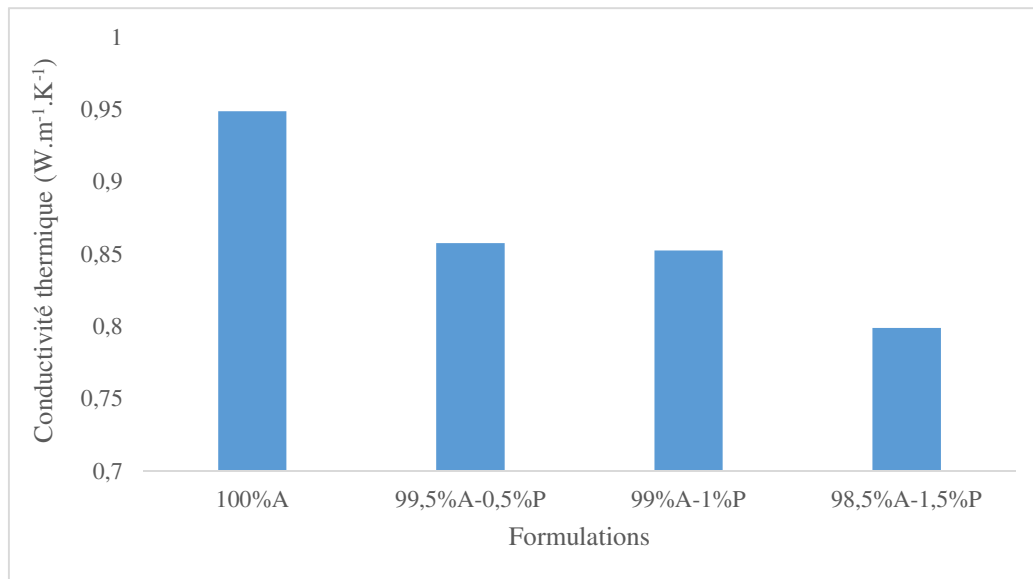


Figure 4-2 : Conductivité thermique des éprouvettes renforcées par la paille de riz.

Les résultats des conductivités thermiques obtenus sur les différentes formulations nous prouvent que nos matériaux ne sont pas isolants. La conductivité thermique d'un matériau isolant est inférieure à $0,065 \text{ Wm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et sa résistance thermique est supérieure à $5 \text{ m}^2.\text{W}^{-1}.\text{K}$ [5].

Les matériaux de construction cimentaires sont souvent compacts. Leurs inerties thermiques sont mises à contribution pour assurer le confort thermique des habitations.

Dans le laboratoire LERMAB, nous avons mis en place une méthode de fil chaud, adapté sur une géométrie cylindrique. Cette méthode est très intéressante dans la mesure où elle résout quelques problèmes rencontrés sur les autres méthodes de mesure, tels que l'effet de bord et les fuites de chaleur radiale et axiale. Cet outil sera validé en tant qu'un nouveau modèle de calcul de conductivité thermique dans le cas où les conditions expérimentales du local sont maîtrisées.

4.1.2. Résistance mécanique

L'analyse de nos résultats expérimentaux nous permet de comprendre l'influence de la paille de riz, de la gomme arabique et du sable dans le mélange et également l'effet de la contrainte de compactage.

Nous précisons que dans ce travail, les matières premières utilisées sont : l'argile, le sable (30%), la gomme arabique (5 %, 10 % et 15 %) et la paille de riz (0,5%, 1% et 1,5%).

Les contraintes de compactages sont :

- 2 MPa pour les briques en BTC ;
- 6,13 MPa pour les éprouvettes.

4.1.2.1. Influence de la gomme arabique dans le mélange.

Notre étude montre que l'argile de N'djaména possède une porosité élevée, de l'ordre de 37% [6]. La porosité est à l'origine de la fragilité des matériaux de construction. Elle contribue à faire chuter les caractéristiques mécaniques des matériaux.

La teneur en eau optimale varie de 12% à 20% pour les briques en BTC et de 8% à 10% pour les éprouvettes. Dans la construction, l'argile nécessite une grande quantité d'eau pour son hydratation. C'est pourquoi, la teneur en eau optimale des éprouvettes en argile seule est de 20%, alors que pour le mélange « argile + sable + gomme arabique », une faible quantité d'eau suffit pour hydrater la gomme arabique, qui, à son tour enrobe et assemble les grains pour former un bloc cimentaire. De même, la teneur en eau est minimale pour une contrainte de compactage plus élevée.

La stabilisation de la terre par la gomme arabique donne des résistances mécaniques satisfaisantes. Ces résistances mécaniques augmentent avec le taux de gomme arabique (voir figure 4-3).

Les auteurs Doat. P et al [7] recommandent des valeurs minimales en résistance mécanique pour la construction d'un bâtiment à 1 niveau :

- Résistance à la compression : $2\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (0,2MPa) ;
- Résistance à la traction : 0 MPa.

Les valeurs obtenues dans ce travail de recherche sur les briques en BTC avec une contrainte de compactage de 2 MPa sont faibles par rapport aux autres matériaux de construction. Cette baisse de résistance est due à la porosité élevée des matières premières et à la faible pression exercée sur les éprouvettes. Par contre, les résultats obtenus avec les éprouvettes en utilisant une contrainte de compactage de 6,13 MPa sont significatifs. Les valeurs des résistances mécaniques sont récapitulées dans le tableau 4-1.

Tableau 4-1 : les plages des résistances en compression des différentes éprouvettes

Formulations	σ_c (BTC)(MPa)	σ_c (épreuve)(MPa)
B100%A	0,28	3,53
De B95%A-5%GA à B85%A-15%GA	0,36-1,27	6,5-12,12
De B65%A-30%S-5%GA à B55%A-30%S-15%GA	1,5-2,43	6,14-13,2
De B94,5%A-5%GA-0,5%P à B93,5%A-5%GA-1,5%P	0,43 – 0,93	2,43-3,63
B64,5%A-30%S-5%GA-0,5%P à B53,5%A-30%S-15%GA-1,5%P	1,01-2,17	-

Par rapport aux recommandations de Doat. P et al [7], les blocs de terre comprimés stabilisés par de la gomme arabique sont aptes pour au moins la construction d'un niveau. La gomme arabique contribue efficacement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques. Les briques en BTC fabriquées avec de l'argile et 5% de gomme arabique bénéficie d'une augmentation de 29% de résistance en compression par rapport à l'éprouvette non stabilisée. Des taux de 10% et 15% de gomme arabique donne respectivement une augmentation de 275% et 354% de la résistance des éprouvettes non stabilisées, voir (figure 4-3).

L'ajout du sable, contribue également à l'amélioration des caractéristiques mécaniques. La résistance des éprouvettes fabriquées avec un mélange d'argile, de 30% de sable et 5% de gomme arabique dépasse de 317% celle des éprouvettes fabriquées avec de l'argile et 5% de gomme arabique. L'ajout de sable dans le mélange apporte un plus à la résistance mécanique, (voir la figure 4-4). Cette augmentation de résistance est également confirmée dans les travaux de Guettala [8].

Dans la suite, les résultats obtenus sur les briques en BTC sont comparés avec les résistances en compression de la littérature bibliographique. Comme les résultats en compression des éprouvettes sont bien supérieurs à ceux des briques en BTC. La comparaison des résistances en compression des BTC avec les résultats de la littérature suffit.

Les résultats obtenus en compression uni-axiale (de 1,5 à 2,43 MPa) sont du même ordre de grandeur à ceux obtenus par Bokor [9] sur les BTC stabilisés à 15% de chaux éteinte, et écrasé à 28 jours d'âge. Ils varient de 1,33 à 1,56 MPa. Nos résultats sont également dans les mêmes

ordres de grandeurs que les valeurs de résistance en compression obtenue sur des briques en terre cuites creuses qui sont de l'ordre 2,84 à 3,32 MPa et des blocs de parpaing qui donnent une résistance en compression à 28 jours qui varie de 3,32 à 3,70MPa [10]. De même, nos valeurs de résistance en compression correspondent bien aux valeurs minimales des résistances en compression proposés par certains pays (le tableau 4-2).

Tableau 4-2 : Résistance en compression minimale admissible pour les BTC [11]

Pays	Normes	σ_c (MPa)
Inde	IS 1725	2
Brésil	NBR	2
Afrique	ARSO	2
Tunisie	NT	2
Nouvelle Zélande	NZS	3,5
Kenya	KS 02-1070	2,5
France	XP P 13-901	2
Colombie	NTC 5324	2
Espagne	UNE 41410	1,5
Sri-Lanka	SLS 1382	3
Amérique	ASTM E2392M-10	2
Nouveau Mexique	NMAC 14.7.4	3

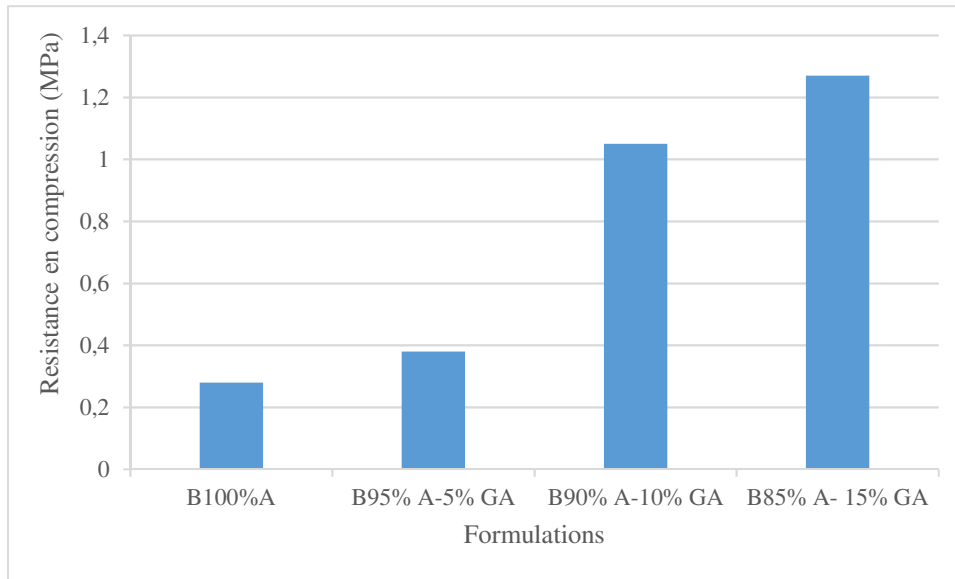


Figure 4-3 : Influence de la gomme arabique sur la resistance en compression des briques en BTC

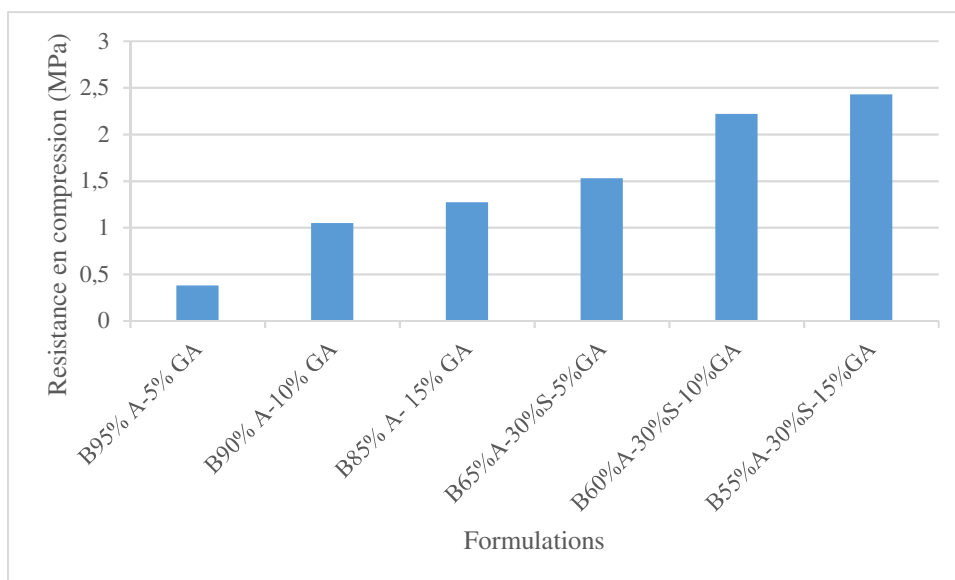


Figure 4-4 : Influence du sable sur la resistance en compression des briques en BTC

La stabilisation de la terre argileuse par la gomme arabique suit la même allure que la resistance mécanique des matériaux de construction stabilisés par les liants minéraux (ciment et chaux).

Beaucoup des travaux de recherche menés sur la stabilisation des matériaux de construction par des liants minéraux. Akpokodjé [12] et Walker [13] ont montré que l'incorporation de ciment et de chaux améliore significativement la résistance à la compression. De même Akpokodjé à constaté que la résistance mécanique augmente avec la teneur en ciment dans le mélange.

Nous en concluons que la gomme arabique joue un role similaire et non negligeable que les liants minéraux (ciment et chaux) dans la stabilisation des matériaux de construction.

4.1.2.2. Influence de la contrainte de compactage sur la résistance en compression.

Comme mentionner dans les paragraphes précédents, pour une large légitimité des matériaux de construction stabilisés par la gomme arabique, des éprouvettes sont fabriquées par des différentes méthodes.

- Des échantillons fabriqués avec la presse manuelle de BTC (brique BTC) ;
- Des échantillons fabriqués avec une presse hydraulique (éprouvettes).

Les contraintes de compactage sont différentes. Pour la fabrication des briques en BTC, une contrainte de 2 MPa est appliquée alors qu'elle est de 6,13 MPa pour les éprouvettes. Nous constatons que les valeurs de résistance en compression sont différentes . Cette bonne résistance mécanique des éprouvettes provient de l'effet de contrainte de compactage, (voir figure 4-5).

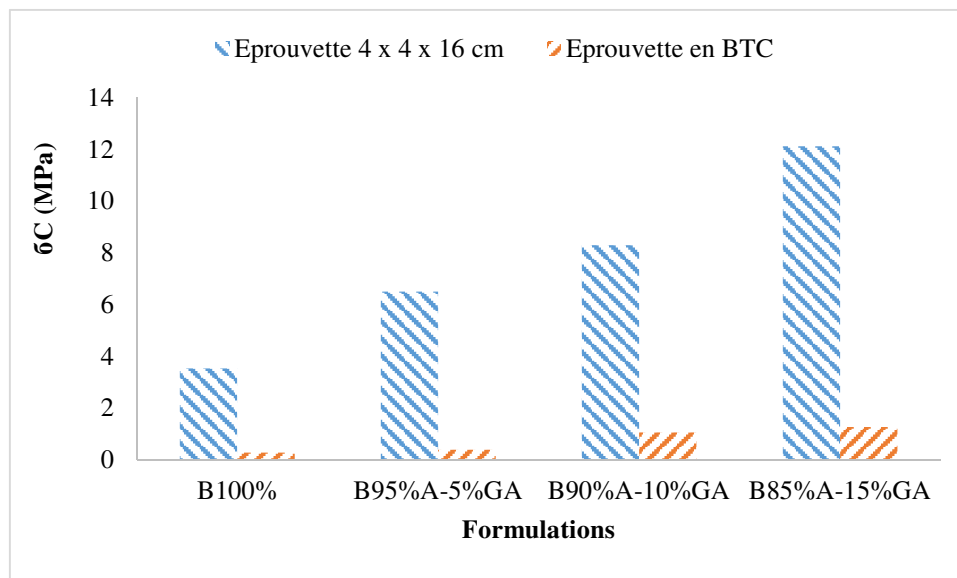


Figure 4-5 : Influence des contraintes de compactage sur la résistance des briques en BTC et celle des éprouvettes.

Guettala [8] a également mis en évidence l'effet de la contrainte de compacte qui améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau.

4.1.2.3. Influence de la paille de riz dans la résistance en compression.

Les fibres sont utilisées comme matériau de construction, dans le but d'empêcher la propagation des fissures, de réduire le retrait et d'améliorer la résistance en flexion des matériaux de construction.

L'influence des fibres dans les matériaux de construction a largement été étudiée. Ghavami et al [14] ont travaillé sur la déformation de sols non stabilisés et de sols stabilisés par des fibres

de sesal ou par des fibres de coco. Ils constatent une rupture brutale sur le sol non stabilisé alors que pour les sols stabilisés, même lorsque la force de rupture est atteinte, l'échantillon continue à se déformer.

D'autres études menées par Yetgin [15] sur une large gamme de sols stabilisés par la paille de culture. Il constate que la résistance mécanique et le retrait diminuent avec l'augmentation du taux de paille.

Les travaux de Taallah et al [16] sur les blocs de terre comprimés, stabilisés par la chaux et renforcés avec des fibres de palmier dattier ont donné des résultats similaires que ceux de Yetgin [15], (voir figure 4-6).

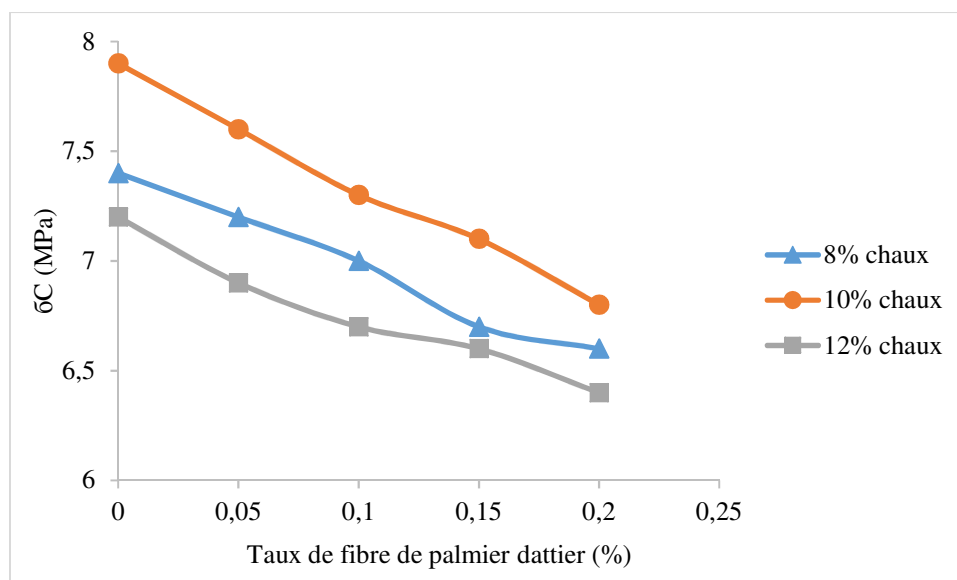


Figure 4-6 : Résistance à la compression des blocs de terre comprimés, stabilisés par la chaux et renforcés par des fibres de palmier dattier [16].

Avec nos travaux, nous montrons que l'incorporation de paille de riz dans le mélange contribue à la baisse de la résistance en compression. Ceci peut s'expliquer par le fait que la présence de paille dans le mélange augmente la porosité. Par conséquent, cette porosité influe négativement sur la résistance mécanique (figure 4-7).

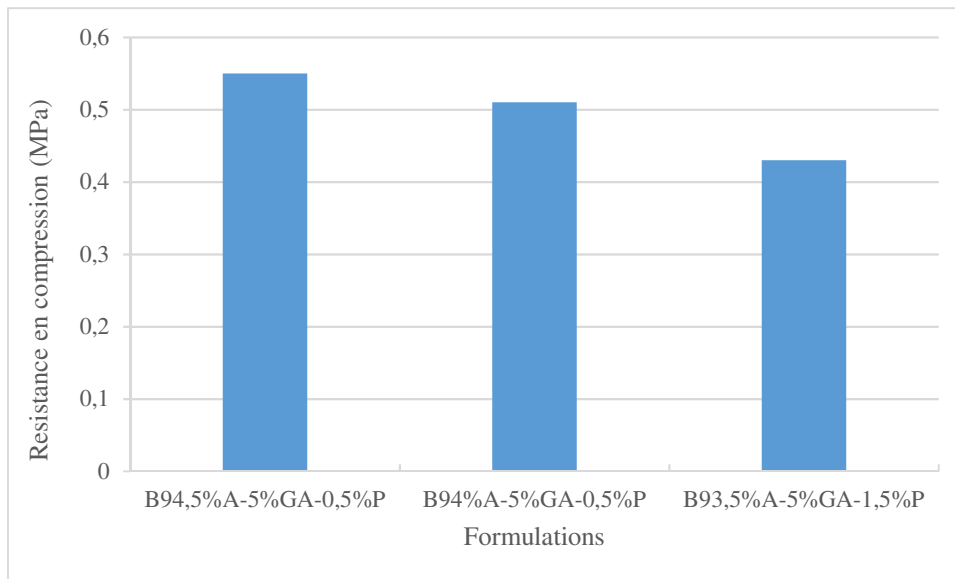


Figure 4-7 : Influence de la paille de riz dans les matériaux de construction

4.2. Conclusion

Ce travail de recherche a mis en évidence l'avantage des matériaux locaux dans la construction. Ils sont économiques et ont un faible impact environnemental.

Une nouvelle méthode de détermination des conductivités thermiques est mise en place au Laboratoire « LERMAB » par l'équipe « Efficacité Energétique ». Il s'agit du fil chaud adapté sur une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre sur 32 cm de hauteur. Ce dispositif prend en compte quelques difficultés énoncées sur les autres méthodes, tels que les fuites radiales et axiales de chaleur et les effets de bord. Elle peut être validée comme nouvelle méthode de fil chaud dans le cas où les conditions expérimentales sont améliorées (maîtrise des conditions atmosphériques).

Les valeurs de conductivités thermiques obtenues par cette méthode prouvent que les différentes formulations testées dans ce travail de recherche ne conduisent pas à des matériaux isolants. Nous comptons sur l'inertie thermique élevée du matériau pour améliorer le confort intérieur.

Les résultats obtenus en résistance mécanique sont modestes, mais suffisants pour la construction d'un bâtiment à un niveau. Pour obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques, il faut augmenter la pression de compactage. Une presse motorisée avec une pression de compactage importante permet d'obtenir des BTC plus résistants.

En plus des caractéristiques mécaniques, nos échantillons ont été immergés dans de l'eau pendant une heure et exposés à la pluie, au soleil et à l'humidité. Celles qui ont été plongées

dans l'eau n'ont pas résisté. A partir de 15 min d'immersion, tous les échantillons ont été dilués dans l'eau. Par contre, celles qui sont exposées sous pluie, humidité et chaleur ont donné satisfaction. Les BTC stabilisés par la gomme arabique ne seront pas admises en fondation. Toutefois, c'est un matériau prometteur pour la construction durable. Il pourra être utilisé pour les murs en élévation et les cloisons.

4.3. CONCLUSION GENERALE

L'histoire de la construction des habitations avec la terre crue remonte de très loin. Les ouvrages construits en terre dans les différents pays en témoignent. L'utilisation de la terre comme matériau de construction est rendue possible à cause de ses avantages économiques et de son faible impact environnemental. Ce matériau terre, disponible dans la plupart des pays et facile à exploiter, a été abandonné à cause de son défaut de résistance mécanique et à l'eau de pluie, au profit des matériaux industriels (ciment, chaux, acier). Pour lutter contre le réchauffement climatique, des dispositions sont prises pour limiter la pollution environnementale et donc le matériau terre fait son retour dans la construction.

Beaucoup de techniques de fabrication de matériaux avec la matière première terre sont apparues au fil de temps. Il s'agit entre autre de : l'adobe ; le pisé ; le torchis ; la terre paille ; la bauge ; la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée. etc.

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques, thermiques et la durabilité, les professionnels ont utilisé des liants minéraux (ciment, chaux), des fibres naturelles et synthétiques et des contraintes de compactages plus importantes. L'ajout de sable est recommandé dans le matériau argileux trop plastique pour corriger sa plasticité, ou des ajouts d'éléments fins dans les éléments grossiers pour augmenter sa compacité.

De nouvelles campagnes expérimentales sont jugées nécessaires pour améliorer la connaissance de ces matériaux. Elles doivent porter sur l'impact des liants minéraux, la correction des mélanges et la contrainte de compactage.

Pour l'ajout de fibres, les résultats ne sont pas unanimes. Dans certains cas, elles ont apporté une bonne résistance en traction et une stabilité par rapport au retrait du matériau. Dans d'autres cas, elles contribuent plus tôt à la chute des résistances mécaniques.

Dans nos travaux, nous avons utilisé de l'argile, de la gomme arabique, de la paille de riz et du sable pour préparer des échantillons dans le but de déterminer les résistances mécaniques et thermiques afin de comprendre l'influences de la gomme arabique, de la paille de riz, du sable et également de la contrainte de compactage.

La campagne expérimentale, nous a permis de préciser les caractéristiques physiques de l'argile (granulométrie, masse volumique et la limite d'Atterberg). Ces paramètres nous ont permis de classifier notre terre argileuse, qui est de type « Argile peu plastique ». Ensuite les caractéristiques physiques de la paille de riz (masse volumique, taux d'absorption et analyses chimiques) ont révélé un taux élevé d'absorption des pailles de riz et la présence de sucre.

Les mesures de caractéristiques mécaniques des échantillons étudiés montrent que la résistance augmente avec le taux de gomme arabique. L'ajout de sable et la contrainte de compactage

améliorent encore ces performances. L'adjonction des pailles de riz a par contre fait chuter la résistance mécanique.

La conductivité thermique augmente avec la masse volumique et donc l'ajout de paille de riz augmente la porosité, ce qui permet de baisser la conductivité thermique. Elle contribue à améliorer l'isolation thermique de l'habitat.

La conductivité thermique des échantillons stabilisés par la gomme arabique augmente avec le taux de gomme arabique. Une faible teneur en gomme arabique n'est pas suffisante pour couvrir tous les grains, des pores sont créés. Ces porosités sont à l'origine de la baisse de la conductivité thermique. Plus le taux de gomme arabique augmente, les pores sont bouchés et la compacité est améliorée.

En plus des caractéristiques mécaniques et thermiques des échantillons. Avec les tests à l'eau de pluie et les tests d'immersion, nous constatons que les échantillons stabilisés par la gomme arabique résistent mieux à l'eau de pluie. Par contre, les échantillons immergés se sont tous détériorés.

En fonction des caractéristiques recherchées, on peut conclure que pour les résultats mécaniques, des presses de BTC hydrauliques plus puissantes donnent des résultats satisfaisants. Pour ce qui est de la recherche d'un matériau isolant, une résistance à la compression minimale est nécessaire. Elle est de l'ordre de 2 MPa. Cette valeur correspond à la valeur minimale admise pour les BTC. Des études seront menées pour l'optimisation du taux de paille de riz.

4.4. En perspectives

➤ Des essais de vieillissements du matériau seront menés sur les BTC stabilisés par la gomme arabique.

➤ Construction d'un logement à grande échelle avec les matériaux d'étude pour suivre son comportement dans le temps.

➤ Détermination des différentes caractéristiques thermiques des BTC stabilisés par la gomme arabique pour une bonne compréhension de son utilisation dans la construction.

➤ Une simulation thermique sera effectuée sur les matériaux argileux stabilisés par la gomme arabique pour voir son évolution dans le temps.

4.5. References bibliographiques

- [1] Al Rim. K, Ledhem. A, Douzane. O, Dheilily. R.M & Queneudec. M. "Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cementwood composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 21, pp. 269-276, 1999.
- [2] Nadia. B, Agoudjil. A, Aouachria. Z. Thèse de doctorat « Développement et caractérisation des composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat. Vol 162, 2015.
- [3] Aouadja. F. Z, Mimoune. M & Laquerbe. M, "Etude expérimentale sur les bétons à base de résidus de bois," *Revue Algérie-Equipement*, pp. 24-27, 1995.
- [4] Khedari. J, Nankongnab. N, Hirunlabh. J & Teekasap. S, " New low-cost insulation particle boards from mixture of durian peel and coconut coir," *Building and Environment*, vol. 39, pp. 59-65, 2004.
- [5] Cerezo. V « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, pp. 226.
- [6] Abakar. A, Riad. B, Jean-Louis. T et Abdoulaye Saleh. T. Article Scientifique : « caractéristiques mécaniques de l'argile de Ndjamena stabilisée par la gomme arabique, publié dans *Afrique Science* », 12P, (2017).
- [7] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. *Construire en terre*. Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, (1979).
- [8] Guettala A. Béton de terre stabilisée : amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, (2003).
- [9] Bokor Youssouf. S, Raphael. V, Ismaila. G. Mémoire de Master : vérification des caractéristiques des blocs de terre comprimés, stabilisés par la chaux éteinte., 2ie vol, 61, 27-29, 2011.
- [10] Brahim Houti. F, Ghomari. F, Megnounif. A. Comportement des structures en maçonnerie sous sollicitation uni-axiale, volume 81, page 54-55, 2002.
- [11] Cañas, I., Cid-Falceto, J., & Mazarrón, F. (2012). "Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests". *Construction and Building Materials*, 37, pp. 738-745.
- [12] Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.
- [13] Walker, P. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilized Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites*, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.

- [14] Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement Concr Compos* ; 21(1):39–48, 1999.
- [15] Yetgin Ş, Çavdar O, and Çavdar, A. The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 222-227, 2008.
- [16] Taallah. B. thèse de doctorat (Algérie) « Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibre », vol 202, 2014.

RESUME

Le réchauffement climatique et le coût élevé des matériaux de construction conventionnels (ciment, chaux, acier) nous obligent à recourir aux matériaux locaux, disponibles et sans effet négatif sur l'atmosphère. Il s'agit de blocs de terre comprimée (BTC) stabilisés par de la gomme arabique et renforcés avec de la paille de riz.

L'objectif principal de ce travail est la valorisation des matériaux locaux et écologiques pour la construction des habitations durables.

L'étude concerne la caractérisation mécanique, thermique et la durabilité des éprouvettes fabriquées avec de l'argile, du sable, de la gomme arabique, de la paille de riz et de l'eau en des différentes proportions. A cet effet, les pourcentages massiques de gomme arabique sont de 5%, 10% et 15%. Ceux de la paille de riz sont de 0,5%, 1%, 1,5% et 30% de sable sont retenus pour ce travail de recherche.

Des briques en BTC de 30 x 15 x 8 cm et des éprouvettes de dimension 4 x 4 x 16 cm sont fabriquées pour réaliser les essais mécaniques. Une méthode « fil chaud » adaptée sur les éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre sur 32 cm de hauteur est utilisée pour la détermination des conductivités thermiques.

L'utilisation de la gomme arabique comme liant dans la construction a donné des résultats satisfaisants. A un taux de 15% de gomme arabique associée à une contrainte de compactage beaucoup plus élevée, nous permettent d'obtenir des BTC ayant une résistance mécanique acceptable ainsi qu'une meilleure résistance à l'eau de pluie.

Les résultats mécaniques montrent que la gomme arabique améliore la résistance mécanique de même que la contrainte de compactage. Par contre l'utilisation de paille de riz dans le mélange fait chuter sa résistance mécanique et allège le matériau.

Les valeurs de conductivité thermique mesurées, montrent que les différents échantillons ne peuvent pas être considérées comme étant des matériaux isolants.

Les éprouvettes exposées aux aléas climatiques (pluie et humidité) pendant un mois montrent que les blocs de terre non stabilisés se sont détériorés sous la pluie. Par contre les éprouvettes stabilisées par la gomme arabique ont conservé leurs bonnes tenues. De même, des éprouvettes stabilisées et non stabilisées sont immergées dans l'eau. A partir de 15 min, toutes les

éprouvettes sont détériorées. Les matériaux argileux stabilisés par la gomme arabique ne pourront pas servir en fondation dans la construction.

Ce travail de recherche sera complété par des essais de vieillissement du matériau sur des différents échantillons pour sa validation comme nouveau matériau de construction durable.

Mots clés : Sol argileux, Gomme arabique, paille de riz, Caractéristiques mécaniques, Conductivité thermique, Durabilité.

ABSTRACT

Global warming and the high cost of conventional building materials (cement, lime, steel) force us to use local, available materials with no negative effect on the atmosphere. These are compressed earth blocks (BTC) stabilized with arabic gum and reinforced with rice straw.

The main objective of this work is the valorization of local and ecological materials for the construction of sustainable homes.

The study concerns the mechanical, thermal and durability characterization of specimens made of clay, sand, arabic gum, rice straw and water in different proportions. For this purpose, the percentages of gum Arabic are 5%, 10% and 15%. Those of rice straw are 0.5%, 1%, 1.5% and 30% of sand are retained for this research work.

BTC bricks measuring 30 x 15 x 8 cm and specimens measuring 4 x 4 x 16 cm are manufactured to perform the mechanical tests. A "hot wire" method adapted to cylindrical specimens 16 cm in diameter and 32 cm in height is used for the determination of thermal conductivities.

The use of arabic gum as a binder in the construction has given satisfactory results. At a rate of 15% gum Arabic associated with a much higher compressive stress, allow us to obtain BTCs having an acceptable mechanical strength as well as a better resistance to rainwater.

Mechanical results show that gum Arabic improves mechanical strength. As is the compaction constraint. By cons the use of rice straw in the mixture reduces its mechanical strength and lightens the material.

The measured thermal conductivity values show that the different formulations cannot be considered as insulating materials.

The specimens exposed to the climatic hazards (rain and moisture) for a month show that the unstabilized earth blocks have deteriorated in the rain. On the other hand, samples stabilized by gum Arabic have retained their good habits. Similarly, stabilized and unstabilized specimens are immersed in water. From 15 min, all test pieces are deteriorated. The clay materials stabilized by gum Arabic can not be used as a foundation in construction.

This research work will be completed by aging tests on the various formulations for validation as a new sustainable building material.

Key words: Clay soil, Gum Arabic, rice straw, Mechanical characteristics, Thermal conductivity, Durability.