



HAL
open science

Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses

Babatounde Laibi

► **To cite this version:**

Babatounde Laibi. Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. Chimie inorganique. Normandie Université; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2017. Français. NNT : 2017NORMC265 . tel-01768564

HAL Id: tel-01768564

<https://theses.hal.science/tel-01768564>

Submitted on 17 Apr 2018

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.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Chimie

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

En partenariat international avec l'Université d'Abomey-Calavi BENIN

Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses

**Présentée et soutenue par
Armel Babatoundé LAIBI**

**Thèse soutenue publiquement le 21 décembre 2017
devant le jury composé de**

M. Sofiane AMZIANE	Professeur des universités, Polytech' Clermont-Ferrand (France)	Rapporteur
M. Jonas Yao ANDJI-YAPI	Professeur, Université Félix Houphouët-Boigny (Côte d'Ivoire)	Rapporteur
M. Valentin WOTTO	Professeur, Université d'Abomey Calavi (Bénin)	Rapporteur
M. Joël BRÉARD	Professeur des universités, ENSICAEN (France)	Examineur
M. Ali-Nordine LEKLOU	Maître de Conférences, Université de Nantes (France)	Examineur
M. Philippe POULLAIN	Maître de Conférences, Université de Nantes (France)	Examineur
M. Moussa GOMINA	Professeur des universités, ENSICAEN (France)	Directeur de thèse
M. Dominique C. K. SOHOUNHLOUE	Professeur, Université d'Abomey Calavi (Bénin)	Examineur

Thèse dirigée par Moussa GOMINA, laboratoire CRISMAT, UMR 6508 CNRS



REMERCIEMENTS

Ces travaux de recherche ont été menés au laboratoire de CRISTallographie et de sciences des MATériaux (CRISMAT UMR6508) de Caen (France), à l'Institut de recherche en génie Civil et Mécanique (GeM UMR CNRS 61 83) de Saint-Nazaire (France) et au Laboratoire d'Etude et de Recherche en Chimie Appliquée, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi (LERCA/EPAC/UAC), 01 BP 2009 Cotonou, Benin.

Je tiens tout d'abord à remercier les directeur des laboratoires cités précédemment, Monsieur Antoine MAIGNAN, Monsieur Didier MAROT de m'avoir accueilli au sein de leurs laboratoires et d'avoir contribué au bon déroulement de mes travaux.

Je remercie particulièrement Monsieur Moussa GOMINA, directeur de thèse, et Monsieur Dominique SOHOUNHLOUE co-directeur de thèse, pour leurs conseils qui ont permis de mener à bien cette thèse.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Philippe POULLAIN et de Monsieur Nordine LEKLOU qui n'ont ménagé aucun effort pour l'encadrement de cette thèse. Retrouvez ici chers encadreurs l'expression de mes sentiments les plus distingués.

Je remercie le SCAC/ Cotonou pour leur soutien financier au cours de ces travaux.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Sofiane AMZIANE, Yapo ANDJI-YAPI et Valentin WOTIO pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail et pour avoir accepté de le juger.

Un grand merci à Monsieur Joël BRÉARD pour sa disponibilité, le temps consacré ainsi que pour sa participation en tant qu'examinateur de ce travail de thèse.

Je tiens aussi à remercier Philippe POULLAIN et Nordine LEKLOU pour leurs nombreux conseils et leur aide qui ont permis de mener à bien les manipulations tout au long de cette thèse.

Je remercie particulièrement Philippe POULLAIN pour toute l'aide apportée en ce qui concerne la partie "Comportement sous sollicitation hygrothermiques cycliques" de cette thèse, ainsi que pour sa contribution aux diverses manip.

Merci à Monsieur Etienne SAGBO pour m'avoir initié à la recherche scientifique

Je remercie chaleureusement mes compagnons de labo, Walid DEBOUCHA, Ishaq MOGHRABI, Sidoine BONO, Marielle AGBAHOUNGBATA, Wilfried KANHOUNNON pour leurs divers soutiens.

Merci également à tous les autres membres de l'équipe IEG du Laboratoire GeM.

Je dis un grand merci à Alice SAKOU pour tous les soutiens dont j'ai bénéficié d'elle. Trouve ici cher amie l'expression de ma profonde gratitude

Une mention spéciale est attribuée à Jasmine, ma fiancée pour ses divers conseils.

Je remercie mes parents pour leur générosité qui m'a permis de faire des études doctorales.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	<i>i</i>
SOMMAIRE	<i>ii</i>
LISTE DES FIGURES	<i>viii</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>xiii</i>
INTRODUCTION GENERALE	<i>1</i>
I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	<i>4</i>
1. Techniques d'utilisation de la terre en construction	<i>5</i>
1.1. Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	<i>7</i>
1.2. La construction en bloc de terre comprimée dans le monde.....	<i>7</i>
1.3. Avantage des BTC.....	<i>9</i>
2. La terre, un matériau de construction	<i>9</i>
2.1. Les argiles.....	<i>9</i>
2.1.1 Définition.....	<i>10</i>
2.1.2. Structure et Classification des minéraux argileux.....	<i>10</i>
2.1.3. Minéraux de types 1:1 (TO) Structure du kaolin.....	<i>15</i>
2.1.4. Minéraux de type 2 :1 (TOT).....	<i>15</i>
2.1.5. Minéraux de type 2:1:1.....	<i>17</i>
2.1.6. Minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux.....	<i>18</i>
2.1.7. Minéraux inter-stratifiés.....	<i>19</i>
2.1.8. Minéraux associés aux minéraux argileux.....	<i>20</i>
2.1.9. Propriétés des Argiles.....	<i>21</i>
3. Les propriétés du matériau terre en construction	<i>27</i>
3.1. Texture ou Granularité	<i>28</i>
3.2. La plasticité.....	<i>28</i>
3.3. La compressibilité.....	<i>29</i>
3.5. La matière organique.....	<i>30</i>
4. Stabilisation des sols	<i>30</i>
4.1. Stabilisation mécanique.....	<i>30</i>
4.1.1. Mode de compactage.....	<i>31</i>
4.1.2. Contrainte de compactage.....	<i>31</i>
4.1.3. Influence de la teneur en eau sur la densité.....	<i>32</i>
4.2. Stabilisation physique.....	<i>34</i>
4.3. Stabilisation chimique.....	<i>34</i>
4.3.1. Stabilisation au ciment.....	<i>34</i>
4.3.2. Stabilisation à la chaux.....	<i>37</i>
5. Les ajouts minéraux	<i>41</i>
5.1. Laitier de haut fourneau.....	<i>41</i>

5.1.1. Production du laitier granulé	42
5.1.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	42
5.1.3. Réactivité hydraulique du laitier.....	42
5.1.4. Hydratation du laitier	43
5.1.5. Activation du laitier	43
5.1.6. Utilisation	44
6. Les fibres.....	44
6.1. Les fibres végétales.....	44
6.1.1. Définition de la fibre végétale.....	44
6.1.2. Classification des fibres végétales.....	45
6.1.3 Morphologie de la fibre végétale.....	45
6.1.4. Structure de la fibre végétale.....	46
6.1.5. Composition chimique des fibres végétales	47
6.1.6. Propriétés mécaniques de la fibre végétale.....	54
6.2. Le kénaf.....	55
6.2.1. Effet des fibres végétales sur les propriétés des blocs de terre crue	57
7. Conclusion	64
<i>Bibliographie.....</i>	65
<i>II. MATIERES PREMIERES ET METHODES EXPERIMENTALES..</i>	75
1. Matières premières et matériaux utilisés.....	76
1.1. Aperçu géographique et géologique du Bénin	76
1.1.1. Le sol.....	77
1.1.2. Le kénaf	81
1.1.3. Le ciment	82
1.1.4. Le laitier de haut fourneau	83
1.1.5. L'eau.....	84
2. Méthodes expérimentales.....	84
2.1. Caractéristiques physico-chimiques	84
2.1.1. Le taux d'humidité	84
2.1.2. La perte au feu.....	84
2.1.3. La densité	84
2.1.4. Mesure du coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales	85
2.2. La composition minéralogique	85
2.2.1. La diffraction des rayons X (D.R.X.)	85
2.2.2. Cristallinité des fibres de Kénaf : Méthode de Ségal	87
2.3. Les analyses thermiques différentielle et gravimétrique (ATD/ATG)	88
2.4. Analyse dilatométrique.....	89
2.5. La spectroscopie infrarouge (IR)	89
2.6. Méthode d'analyse chimique	90
2.6.1. Principe de la méthode.....	90
2.6.2. Mise en solution	91
2.7. Caractéristiques mécaniques des fibres de Kénaf.....	91

2.7.1. Résistance à la traction.....	91
2.7.2. Approche statistique selon le formalisme de Weibull	91
2.8. Caractéristiques géotechniques	94
2.8.1. Analyse granulométrique.....	94
2.8.2. Les limites d'Atterberg.....	97
2.8.3. L'essai au bleu de méthylène.....	97
2.8.4. L'essai Proctor.....	98
2.8.5. Equivalent de sable.....	98
2.8.6. Teneur en matières organiques.....	98
2.9. Confection des Blocs de Terre Comprimés (BTC)	98
2.9.1. Confection des éprouvettes 4*4*16 cm ³	98
2.9.2. Confection des blocs de maçonneries	100
2.10. Optimisation de la teneur en eau	101
2.11. Codification des mélanges	101
2.12. Cure des blocs.....	102
2.13. Méthodes de caractérisation hydro-thermomécaniques des blocs.....	104
2.13.1. Résistance à la compression sèche.....	104
2.13.2. Résistance à la compression à l'état humide.....	104
2.13.3. Résistance à la flexion à l'état sec et à l'état humide.....	105
2.14. Détermination des coefficients de transfert hydrique.....	105
2.14.1. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité.....	105
2.14.2. Absorption totale d'eau.....	106
2.14.3. Imbibition par capillarité	106
2.15. Détermination des propriétés thermiques	107
2.16. Méthodes de caractérisation microstructurales des blocs.....	108
2.16.1. Porosimétrie par intrusion de mercure	108
2.16.2. Porosité accessible à l'eau	109
2.16.3. La Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	110
3. Conclusion	111
<i>Bibliographie.....</i>	<i>112</i>
<i>III. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES.....</i>	<i>116</i>
1. Caractérisation géotechnique des sols étudiés	117
1.1. Le taux d'humidité.....	117
1.1.1. La perte au feu.....	117
1.1.2. La densité	117
1.1.3. Teneur en matière organiques	117
1.1.4. Analyses granulométriques	118
1.1.5. Les limites d'Atterberg.....	122
1.2. Essai Proctor normal	123
2. Caractérisation physico-chimique et minéralogique des sols.....	123
2.1. Analyses chimiques	123
2.2. Identification des minéraux.....	124
2.2.1. Diffraction des rayons X	124

2.2.2. Analyses Thermiques.....	127
2.3. Analyse infrarouge.....	131
3. Caractérisation physico-chimique, minéralogique et mécanique des fibres de kénaf	133
3.1. Propriétés physiques des fibres de Kénaf.....	133
3.1.1. Observation au microscope des faisceaux de fibres de kénaf.....	133
3.1.2. Cinétique d'absorption d'eau des fibres de kénaf.....	134
3.2. Caractérisation physico-chimique et minéralogique.....	136
3.2.1. Indice de cristallinités des fibres.....	136
3.2.2. Caractérisation physico-chimique des fibres de kénaf.....	137
3.3. Caractérisation mécanique des fibres de kénaf.....	140
3.3.1. Résistance à la traction.....	140
3.3.2. Approche statistique de Weibull.....	141
4. Conclusions.....	143
Bibliographie.....	145
<i>IV. ETUDE DE COMPORTEMENT HYGRO-THERMOMECHANIQUE DES BLOCS PRISMATIQUES 4*4*16 cm³</i>	150
1. Optimisation des paramètres physiques.....	151
1.1. Optimisation de la teneur en eau et choix de la contrainte de compactage.....	151
1.2. Optimisation du taux et de la longueur des fibres de kénaf.....	154
1.2.1. Effet des fibres sur la résistance à la compression simple	154
1.2.2. Effet des fibres sur la résistance à la flexion trois points	156
1.2.2.1. Courbes de comportement	157
1.2.2.2. Résistance à la rupture.....	158
1.2.3. Effet de l'ajout des fibres sur la conductivité thermique des BTC	159
1.2.4. Effet de l'ajout des fibres sur le module d'Young dynamique des BTC.....	161
1.2.5. Effet des fibres sur la remontée capillaire d'eau des blocs	161
2. Effet de la stabilisation au ciment sur les blocs renforcés par les fibres.....	163
2.1. Résistance à la compression simple.....	163
2.1.1. Résistance à la compression sèche (RCS)	163
2.1.2. Résistance à la compression humide (RCH)	164
2.2. Résistance à la flexion 3 points.....	166
2.2.1. Résistance à la flexion sèche.....	166
2.2.2. Résistance à la flexion humide (RFH).....	167
2.3. Absorption totale d'eau (ATE)	169
2.4. Détermination des coefficients de transfert hydrique.....	171
2.5. Porosité accessible à l'eau	173
3. Effet de l'ajout du laitier granulé.....	174
3.1. Résistance à la compression simple.....	174
3.1.1. Résistance à la compression sèche.....	174
3.1.2. Résistance à la compression humide.....	176

3.2. Résistance à la flexion 3 points.....	178
3.2.1. Résistance à la flexion sèche.....	178
3.2.2. Résistance à la flexion 3 points des blocs à l'état humide.....	179
3.3. Absorption totale d'eau (ATE)	180
3.4. Détermination des coefficients de transfert hydrique	182
3.5. Porosité accessible à l'eau	185
4. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs	186
4.1. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs stabilisés au ciment.....	186
4.2. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier de haut fourneau	188
5. Conclusion	189
<i>Bibliographie.....</i>	191
<i>V- COMPORTEMENTS HYGROMECANIQUE DES BLOCS DE MAÇONNERIES ET ETUDE EXPERIMENTALE DE LEURS TECHNIQUES D'ISOLATION.....</i>	194
1. Comportement mécanique	195
1.1. Résistance à la compression simple	195
1.2. Résistance à la flexion 3 points des blocs de maçonnerie	196
2. Etude expérimentale de l'isolation des différentes briques formulées	196
2.1. Cellule biclimatique analyse des signaux	198
2.1.1. Dispositif expérimental développé.....	198
2.2. Description de la cellule biclimatique	201
2.3. Acquisition des données.....	203
2.3.1. Système d'acquisition	203
2.3.2. Diminution du bruit de mesure.....	204
2.4. Inter-corrélation de signaux.....	206
2.5. Signaux de température	208
2.5.1. Évolutions temporelles de la température.....	209
2.6. Signaux liés à l'humidité relative	211
2.6.1. Sollicitation réelle.....	211
2.6.2. Évolutions temporelles	213
2.7. Pression de vapeur	213
2.8. Représentation spatiale.....	215
2.9. Détermination du déphasage et de l'atténuation.....	217
2.9.1. Thermique.....	217
2.9.2. Hydrique	219
3. Conclusion	220
<i>Bibliographie.....</i>	222
<i>CONCLUSION GENERALE.....</i>	223

<i>Perspectives</i>	225
<i>ANNEXE</i>	226
<i>LISTE DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE</i>	227
<i>Résumé</i>	228
<i>Abstract</i>	228

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Différents produits de blocs de terre comprimée [2].....	7
Figure I. 2 : Centre de l'architecture de terre au Mali.....	8
Figure I. 3 : Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes (Algérie) [].....	8
Figure I. 4 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde.....	8
Figure I. 5 : Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes (Algérie) [3].....	8
Figure I. 6 : Structure des argiles (couche tétraédrique et couche octaédrique) [9].....	11
Figure I. 7 : Les trois types de plan anionique [].....	11
Figure I. 8 : Structure générale des phyllosilicates [].....	12
Figure I. 9 : Différents types de désordre obtenus par empilement des feuillets (d'après Calvet, 2003)..	13
Figure I. 10 : Structure d'un minéral de type 1 :1.....	15
Figure I. 11 : Représentation schématique des empilements de tétraèdre siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1.....	16
Figure I. 12 : Représentation schématique des empilements de tétraèdre siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1:1.....	17
Figure I. 13 : Les trois types de feuillets chez les minéraux argileux [12].....	18
Figure I. 14 : Structure des minéraux à pseudo – feuillets et à faciès fibreux [].....	18
Figure I. 15 : Structure des minéraux inter-stratifiés.....	19
Figure I. 16 : Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite (Grim, 1968) [].....	24
Figure I. 17 : Feuille et espace interfoliaire d'une kaolinite.....	26
Figure I. 18 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre. [30]....	28
Figure I. 19 : Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [30].....	29
Figure I. 20 : Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol [36].....	32
Figure I. 21 : Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques) [39].....	32
Figure I. 22 : Relation typique entre la teneur en eau- densité [38].....	33
Figure I. 23 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable. [34].....	34
Figure I. 24 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment [50].....	37
Figure I. 25 : Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne [69].....	40
Figure I. 26 : Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux [16].....	40
Figure I. 27 : La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge [70].....	41
Figure I. 28 : Prise du laitier [71].....	43
Figure I. 29 : Les différents types de fibres naturelles [].....	45
Figure I. 30 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin [83].....	46
Figure I. 31 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [80].....	46
Figure I. 32 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington (Harrington ,1998)[76].....	47
Figure I. 33 : Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale [82].....	47
Figure I. 34 : Représentation schématique d'une fibre de bois [].....	48
Figure I. 35 : Représentation de la chaîne de cellulose [].	49

Figure I. 36 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculaires.....	50
Figure I. 37 : Liaison hydrogène inter et intramoléculaires au sein de la fibre de cellulose [90].....	50
Figure I. 38 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique [88].	51
Figure I. 39 : Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille [88].	51
Figure I. 40 : Principaux glucides constituant les hémicelluloses [91].....	52
Figure I. 41 : Structure d'un type de xyloglucane.....	52
Figure I. 42 : structure de la pectine [93].....	53
Figure I. 43 : Motifs élémentaires de la lignine [86].....	53
Figure I. 44 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [83].	54
Figure I. 45 : Fleurs d'Hibiscus Cannabinus [75].....	56
Figure I. 46 : Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres [102].	57
Figure I. 47 : Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres [102].	58
Figure I. 48 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal [109].	59
Figure I. 49 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres de sisal [109]....	59
Figure I. 50 : L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression [112].	60
Figure I. 51 : Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].	60
Figure I. 52 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].	61
Figure I. 53 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].	61
Figure I. 54 : Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles [116].	62
Figure I. 55 : Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment [117].	62
Figure I. 56 : L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique [112].	63
Figure I. 57 : L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc d'adobe compressé [102].	63
Figure II. 1 : Carte géographique du Bénin []	77
Figure II. 2 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons de Etigbo.....	78
Figure II. 3 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons de Baka	79
Figure II. 4: Carte d'implantation des puits de Etigbo.....	80
Figure II. 5: Carte d'implantation des puits de Baka.....	80
Figure II. 6 : Plants du kénaf.....	81
Figure II. 7 : Fleurs du kénaf.....	81
Figure II. 8: Fibres du Kénaf.....	82
Figure II. 9 : Laitier de haut fourneau "Ecocem".....	83
Figure II. 10: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X [].....	86
Figure II. 11: Illustration de la diffraction des rayons X selon BRAGG	86
Figure II. 12: Diffractogramme type d'une fibre de chanvre entre 10° et 40°. I_{AM} correspond à l'intensité diffractée a $2\theta = 18^\circ$; I_{002} est l'intensité diffractée a $2\theta = 22,7^\circ$. [].....	88

<i>Figure II. 13: Photo du SETARAM Scientific & industrial - série Setsys 24</i>	89
<i>Figure II. 14 : Distributions de Weibull représentant la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture pour deux variétés de lin []</i>	93
<i>Figure II. 15: Phénomènes physiques impliqués dans la théorie de Mie</i>	95
<i>Figure II. 16: Granulomètre Laser MASTERSIZER 2000 MALVERN</i>	97
<i>Figure II. 17: Malaxeur ayant servi à l'élaboration des éprouvettes</i>	99
<i>Figure II. 18 : Image du moule 4x4x16 cm³ utilisé</i>	99
<i>Figure II. 19: Presse pour la confection des BTC et pour les essais de flexion et de compression</i>	100
<i>Figure II. 20 : Malaxeur ayant servi à élaborer les blocs</i>	101
<i>Figure II. 21 : Presse Mecopress pour BTC</i>	101
<i>Figure II. 22 : Les éprouvettes dans la chambre climatique à une température de 20 °C ±1°C et une humidité relative de 50% ±5%</i>	103
<i>Figure II. 23 : Les éprouvettes dans la chambre climatique à une température de 20 °C ±1°C et une humidité relative de 90% ±5%</i>	103
<i>Figure II. 24 : Les éprouvettes recouvertes des films en plastique dans la chambre climatique à une température de 20°C ±1°C et une humidité relative de 50% ±5%</i>	103
<i>Figure II. 25 : Schéma du principe de l'essai de compression []</i>	104
<i>Figure II. 26 : Schéma du montage de flexion 3 points</i>	105
<i>Figure II. 27 : Essai de remontée capillaire</i>	107
<i>Figure II. 28 : Courbe de capillarité caractéristique a) d'un réseau homogène b) d'un réseau hétérogène. A et A' coefficients de prise de masse, B coefficient d'ascension de la frange capillaire, Nc porosité capillaire et N48 porosité libre []</i>	107
<i>Figure II. 29 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des propriétés thermiques</i>	108
<i>Figure II. 30 : Descriptif d'un prosimètre au mercure utilisé</i>	109
<i>Figure II. 31 : Dispositif de saturation pour la détermination</i>	110
<i>Figure II. 32: Microscope électronique à balayage ZEISS EVO®40</i>	111
<i>Figure III. 1 : Courbe granulométrique totale de BAK</i>	118
<i>Figure III. 2 : Courbe granulométrique totale de ETI</i>	118
<i>Figure III. 3 : Distribution granulométrique de BAK</i>	121
<i>Figure III. 4 : Distribution granulométrique de ETI</i>	121
<i>Figure III. 5 : Courbe Proctor normal de BAK</i>	123
<i>Figure III. 6 : Diffractogramme de BAK</i>	125
<i>Figure III. 7 : Diffractogramme de ETI</i>	125
<i>Figure III. 8 : Diffractogrammes de la fraction Normale (N), traitée à éthylène-glycol (G), chauffée à 490°C (C) de BAK</i>	126
<i>Figure III. 9 : Diffractogrammes de la fraction Normale (N) de ETI, traitée à l'éthylène-glycol (G) et chauffée à 490°C (C)</i>	126
<i>Figure III. 10 : Thermogrammes ATD/TG de BAK</i>	129
<i>Figure III. 11 : Thermogrammes ATD/TG de ETI</i>	129
<i>Figure III. 12 : Courbe dilatométrique de BAK</i>	131
<i>Figure III. 13 : Courbe dilatométrique de ETI</i>	131
<i>Figure III. 14 : Spectre IR de ETI</i>	132
<i>Figure III. 15 : Spectre IR de BAK</i>	132
<i>Figure III. 16 : Observation au microscope électronique d'un faisceau de fibre de kéraf : X 20</i>	134
<i>Figure III. 17 : Observation au MEB d'une section transversale d'un faisceau de fibre de kéraf</i>	134

<i>Figure III. 18 : Observation au MEB d'un faisceau de fibre de kénaf montrant les impuretés à la surface de la fibre</i>	134
<i>Figure III. 19 : Courbe d'absorption en eau massive par immersion des fibres de kénaf en fonction du temps sur une échelle de temps classique</i>	135
<i>Figure III. 20 : Courbe d'absorption en eau massive par immersion des fibres de kénaf en fonction du temps sur une échelle de temps logarithmique</i>	136
<i>Figure III. 21 : Diffractogramme des fibres de kénaf comparées à celui du lin</i>	137
<i>Figure III. 22 : les courbes DSC/ATG des fibres de kénaf</i>	138
<i>Figure III. 23 : Spectre infra-rouge des fibres de kénaf</i>	138
<i>Figure III. 24 : Résistance à la traction – Influence de la longueur des fibres de kénaf</i>	141
<i>Figure III. 25 : Distributions de Weibull représentant la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture pour des fibres de kénaf de longueur : a) l= 5 mm ; b) l=10 mm ; c) l=20 mm</i>	143
<i>Figure IV. 1 : Poids volumique sec des BTC non stabilisés en fonction de la teneur en eau pour différentes contraintes de compactage</i>	152
<i>Figure IV. 2 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour différents teneurs en ciment</i>	152
<i>Figure IV. 3 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau pour différents teneurs en ciment</i>	153
<i>Figure IV. 4 : Variation de la résistance à la flexion fonction de la teneur en eau à différents teneurs en ciment</i>	154
<i>Figure IV. 5 : Résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs</i>	155
<i>Figure IV. 6 : Variation de la porosité totale en fonction de la longueur des fibres à différents teneur en fibres</i>	156
<i>Figure IV. 7 : Courbe contrainte-déplacement des blocs</i>	157
<i>Figure IV. 8 : Image MEB de la face de rupture d'une BTC après un essai de flexion 3 points – a) sans fibre ; b) avec fibres</i>	158
<i>Figure IV. 9 : Résistance à la flexion 3 points des BTC en fonction de la longueur des fibres : Influence de la teneur en fibres</i>	159
<i>Figure IV. 10 : Variation de la conductivité thermique des blocs en fonction de la longueur des fibres pour différente teneur en fibres</i>	160
<i>Figure IV. 11 : Variation du module d'Young dynamique en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs</i>	161
<i>Figure IV. 12 : Variation du coefficient d'absorption des fibres en fonction de la longueur des fibres : influence de la teneur en fibres</i>	162
<i>Figure IV. 13 : Variation de la résistance à la compression sèche des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment</i>	164
<i>Figure IV. 14 : Résistance à la compression humide des BTC en fonction de la teneur en ciment</i>	165
<i>Figure IV. 15 : Variation de la résistance à la compression relative des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment</i>	166
<i>Figure IV. 16 : Variation de la résistance à la flexion sèche RFs des blocs en fonction de la teneur en ciment</i>	167
<i>Figure IV. 17 : Variation de la résistance à la flexion humide RFH des blocs en fonction de la teneur en ciment</i>	167

<i>Figure IV. 18 : Variation de la résistance à la flexion relative des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment.....</i>	<i>168</i>
<i>Figure IV. 19 : Variation de l'absorption totale des blocs en fonction de la teneur en ciment après un jour d'immersion dans l'eau.....</i>	<i>169</i>
<i>Figure IV. 20 : Variation de l'absorption totale d'eau des blocs en fonction du temps : a) 3% en ciment ; b) 5 % en ciment ; c) 7% en ciment.....</i>	<i>171</i>
<i>Figure IV. 21 : Courbes de prise de masse et d'ascension de frange capillaire : a) formulation BC7 ; b) formulation BF1,52C7 et c) formulation BF0,53C7.....</i>	<i>173</i>
<i>Figure IV. 22 : Variation de la résistance à la compression sèche des blocs en fonction de la teneur en ciment pour différentes teneurs en laitier de haut fourneau.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure IV. 23 : Effet de l'ajout des fibres (30 mm ; 0,5%) sur la résistance à la compression sèche des formulations stabilisées par le laitier de haut fourneau activé par le ciment.....</i>	<i>176</i>
<i>Figure IV. 24 : Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la résistance à la compression humide de BC₃ et BC₅.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure IV. 25 : Effet de l'ajout des fibres sur la résistance à la compression humide des blocs stabilisés au laitier activé par le ciment.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure IV. 26 : Variation de la résistance à la flexion sèche en fonction de la teneur en ciment pour différents dosages de laitier de haut fourneau.....</i>	<i>178</i>
<i>Figure IV. 27 : Effet de l'ajout de fibre sur la résistance à la flexion 3 points des blocs stabilisés au laitier de haut fourneau activé par le ciment.....</i>	<i>179</i>
<i>Figure IV. 28 : Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la résistance à la flexion humide des blocs amendés au ciment.....</i>	<i>180</i>
<i>Figure IV. 29 : Influence de l'ajout des fibres sur les blocs stabilisés au mélange ciment-laitier granulé</i>	<i>180</i>
<i>Figure IV. 30 : Influence de la stabilisation mixte ciment-laitier de haut fourneau sur l'absorption totale d'eau des blocs.....</i>	<i>181</i>
<i>Figure IV. 31 : Effet des fibres sur l'absorption totale des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier granulé.....</i>	<i>182</i>
<i>Figure IV. 32 Courbes de prise de masse et de l'ascension de la frange capillaire des blocs en fonction du temps : a) Formulation BC₃L₁₀ ; b) Formulation BC₅L₁₀ ; c) Formulation BFC₃L₁₀ et d) Formulation BFC₅L₁₀.....</i>	<i>184</i>
<i>Figure IV. 33 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au ciment</i>	<i>187</i>
<i>Figure IV. 34 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au ciment.....</i>	<i>187</i>
<i>Figure IV. 35 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au ciment et renforcés par les fibres de kénaf.....</i>	<i>188</i>
<i>Figure IV. 36 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au ciment et renforcés par les fibres de kénaf.....</i>	<i>188</i>
<i>Figure IV. 37 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au mélange ciment-laitier</i>	<i>189</i>
<i>Figure IV. 38 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au mélange ciment-laitier</i>	<i>189</i>
<i>Figure V. 1 : Variation de la résistance à la compression des briques en fonction des différentes formulations.....</i>	<i>195</i>

<i>Figure V. 2 : Variation de la résistance à la flexion trois points des briques en fonction des différentes formulations.....</i>	<i>196</i>
<i>Figure V. 3 : Principales sollicitations hygrothermiques et hydriques imposées à la paroi d'un bâtiment</i>	<i>198</i>
<i>Figure V. 4 : Cellule biclimatique vue de face.....</i>	<i>200</i>
<i>Figure V. 5 : Sollicitation thermique cyclique imposée à la paroi.....</i>	<i>200</i>
<i>Figure V. 6 : Cellule biclimatique a) coupe Auto CAD b) vue in-situ (Othmen 2015).....</i>	<i>202</i>
<i>Figure V. 7 : Détail d'étanchéité au niveau de l'emplacement de la paroi a) schéma de principe et b) photo in situ (Othmen 2015).....</i>	<i>202</i>
<i>Figure V. 8 : Photo du principe de génération de température et d'humidité relative.....</i>	<i>203</i>
<i>Figure V. 9 : Photo de la brique comportant des sondes placées au milieu de la paroi.....</i>	<i>204</i>
<i>Figure V. 10 : Comparaison entre les données brutes mesurées à l'aides des sondes hygrothermiques et les données lissées par la procédure de lissage à l'ordre 2 présentées plus haut – Résultat pour 100 passages.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure V. 11 : Exemple de fonction d'inter corrélation pour a) des signaux périodiques de même période – b) des signaux périodiques de période différente.....</i>	<i>207</i>
<i>Figure V. 12 : Agrandissement des courbes de la figure V.9-a) montrant le déphasage de $\pi/2$ entre les signaux $x(t)$ et $y(t)$ dans le cas de la courbe grise et de 0 dans le cas de la courbe noire.....</i>	<i>208</i>
<i>Figure V. 13 : Évolutions de la température de l'eau du cryothermostat et de la température dans la partie froide de la cellule biclimatique.....</i>	<i>209</i>
<i>Figure V. 14 : Evolution des températures en différents points de la cellule biclimatique – a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>210</i>
<i>Figure V. 15 : Evolution des humidités relatives en différents points de la cellule biclimatique – a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>212</i>
<i>Figure V. 16 : Evolution des pressions de vapeur en différents points de la cellule biclimatique – a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>215</i>
<i>Figure V. 17 : Représentation spatiale des pressions de vapeur dans la paroi pour différents instants du cycle – l'encart permet de connaître les instants représentés – les flèches sur les segments de droite indiquent le sens du flux de vapeur a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>216</i>
<i>Figure V. 18 : Fonctions d'inter-corrélation obtenues à partir de l'évolution temporelle des températures sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi de BTC : a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>217</i>
<i>Figure V. 19 : Fonctions d'inter-corrélation obtenues à partir de l'évolution temporelle des pressions de vapeur sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi de BTC : a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier.....</i>	<i>219</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I. 1 : Formules structurales des principaux minéraux argileux et des phyllosilicates apparentés []</i>	14
<i>Tableau I. 2 : Les minéraux inter-stratifiés naturels [10,]</i>	20
<i>Tableau I. 3 : Surface spécifique de quelques minéraux []</i>	22
<i>Tableau I. 4 : Les Différents types d'eaux dans les argiles []</i>	25
<i>Tableau I. 5 : Surface spécifique de quelques minéraux []</i>	27
<i>Tableau I. 6 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [85]</i>	55
<i>Tableau II. 1 : La composition chimique du clinker (%)</i>	82
<i>Tableau II. 2 : La composition minéralogique du clinker (%)</i>	82
<i>Tableau II. 3 : Les masses volumiques du ciment utilisé</i>	82
<i>Tableau II. 4 : La composition chimique du laitier de haut fourneau en %</i>	83
<i>Tableau II. 5 : Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau</i>	83
<i>Tableau II. 6 : Données techniques de la MecoPress</i>	100
<i>Tableau II. 7 : Codification des mélanges</i>	102
<i>Tableau III. 1 : Les teneurs en matières organiques de BAK et de ETI</i>	117
<i>Tableau III. 2 : Compositions granulométriques de BAK, ETI et quelques matériaux de référence</i>	120
<i>Tableau III. 3 : Principaux paramètres granulométriques</i>	122
<i>Tableau III. 4 : Limites d'Atterberg de BAK et de ETI</i>	122
<i>Tableau III. 5 : Equivalent de sable (ES) et Essai au bleu de méthylène (VBS) de BAK et de ETI</i>	123
<i>Tableau III. 6 : Analyses chimiques (% massique) de BAK et de ETI</i>	124
<i>Tableau III. 7 : Composition minéralogique de BAK et de ETI</i>	127
<i>Tableau III. 8 : Analyses thermiques de BAK</i>	128
<i>Tableau III. 9 : Analyses thermiques de ETI</i>	128
<i>Tableau III. 10 : Bandes caractéristiques du spectre IR de BAK et ETI avec leurs attributions</i>	133
<i>Tableau III. 11 : Principales bandes d'absorption infra-rouge du kénaf</i>	139
<i>Tableau III. 12 : Composition chimique des fibres de kénaf en comparaison à d'autres fibres</i>	140
<i>Tableau IV. 1 : Récapitulatif des deux meilleures formulations fibrées vis-à-vis des trois comportements sélectifs choisis</i>	162
<i>Tableau IV. 2 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité</i>	173
<i>Tableau IV. 3 : Porosité accessible à l'eau des différentes formulations</i>	174
<i>Tableau IV. 4 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier</i>	185
<i>Tableau IV. 5 : Porosité accessible à l'eau des blocs stabilisés au mélange laitier de haut fourneau-ciment</i>	185
<i>Tableau V. 1 : Coefficients d'échange convectif à la surface des parois intérieure (Rsi) et extérieure (Rse) (Othmen 2015)</i>	202
<i>Tableau V. 2 : Poids des voisins de x [2]</i>	205
<i>Tableau V. 3 : Déphasage et atténuation thermiques des différentes parois</i>	218
<i>Tableau V. 4 : Déphasage et atténuation hydriques des différentes parois</i>	220

INTRODUCTION GENERALE

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années comme en témoignent les sites archéologiques découverts dans de nombreux endroits à travers la planète. La terre crue, comme d'autres matériaux naturels tels que la pierre et le bois, fait partie des premiers matériaux utilisés par l'homme dans la construction des logements d'habitations. Aujourd'hui on estime que l'habitat d'un tiers de l'humanité est encore en terre.

Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction tels que le béton et l'acier, nous assistons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans des pays du tiers monde comme dans les pays industrialisés. Il est à noter que les pays industrialisés ont la chance de profiter du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques. Une des raisons de l'utilisation de la terre en construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en saison chaude et qui conserve la chaleur en saison froide.

Malgré tous les avantages qu'on reconnaît aux constructions en terre crue, elles présentent sous sa forme non stabilisée quelques défauts tels que : le déficit en résistance mécanique, la fissuration systématique due au retrait et surtout sa forte sensibilité à l'eau. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à corriger ses défauts en utilisant plusieurs moyens de stabilisation de la terre en vue d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau. Cette tentative a conduit à la naissance de plusieurs produits en terre : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) et autres. Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, elle permet d'avoir des blocs d'un format très souple sur le plan de la maçonnerie et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage que comme matériau principal dans un mur porteur.

Dans le but d'avoir de meilleures caractéristiques mécaniques et hygrométriques du BTC, plusieurs stabilisants comme le ciment, la chaux, le bitume, les fibres, etc. peuvent être utilisés. La stabilisation physique des BTC à l'aide des fibres, dont très souvent la paille est employée de par le monde depuis l'antiquité. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A par exemple, on incorpore encore très souvent de la paille, combinée avec du bitume. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi des fibres pour construire en torchis, en terre-paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé. Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement

S'il est confirmé actuellement que la stabilisation des BTC par des liants et le bitume améliore leurs résistances mécaniques et leur insensibilité à l'eau, la stabilisation des BTC par des fibres n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs.

Au Bénin comme dans d'autres pays de la sous-région ouest-africaine, la construction de maisons individuelles d'habitation obéit rarement aux réglementations techniques et administratives (quand elles existent) relatives à la qualité des matériaux à utiliser pour la fondation et la hauteur de celle-ci, la qualité des matériaux constitutifs des murs porteurs, etc. Cela est illustré par les dégâts que causent chaque année les eaux de pluie aux habitations sur toute l'étendue du territoire et surtout dans la zone rurale.

En zone périurbaine les matériaux traditionnels s'avèrent inadaptés pour les constructions au format moderne, du fait de leurs piètres performances. Cela conduit à l'utilisation massive de matériaux cimentaires qui présentent également des inconvénients importants : coût énergétique pour la production du ciment, pollution induite, inconfort thermique des maisons en parpaings dans les zones sub-sahariennes, etc. Le recours aux blocs de terre comprimée est une solution crédible et intéressante en cours d'expérimentation dans certains pays tels le Burkina Faso et le Mali. Toutefois, il n'existe à ce jour, à notre connaissance, aucune démarche structurée pour la production de matériaux de construction à base de matières premières locales.

Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées en substitution des fibres de verre en tant que renfort de matériaux composites. En effet, celles-ci offrent une alternative judicieuse d'un point de vue environnemental et mécanique. Les fibres métalliques et synthétiques présentent l'inconvénient d'être issues de ressources naturelles renouvelables à très long terme. Les enjeux économiques liés aux coûts croissants des ressources fossiles et à leur raréfaction amènent donc à explorer d'autres sources de matières premières et à envisager d'autres filières de production. De ce point de vue, les fibres végétales pourraient constituer, pour l'industrie de la construction notamment, une solution d'avenir. En effet, la réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction constitue un réel enjeu de développement durable y compris dans les zones sub-sahariennes.

En effet, il est question dans cette thèse de développer des matériaux de construction en utilisant des matières minérales (sols argileux) et végétales (fibres de kénaf) disponibles localement en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s'accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions du Bénin, et ceci pour améliorer la situation de la population face à la pénurie d'habitat surtout dans les zones rurales. Dans ce cadre cette thèse a pour objectif l'étude du comportement hygo-thermomécanique des blocs de terre comprimée (BTC) renforcés par les fibres de kénaf et stabilisés aux liants hydrauliques.

L'organisation du travail s'est faite de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC), les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation. Ce chapitre présentera aussi les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la présence des fibres et particulièrement les fibres végétales sur les propriétés physiques et mécaniques du bloc de terre comprimé, ainsi que sur son comportement mécanique ;

- Le deuxième chapitre fait le point des matières premières utilisées et leurs origines d'une part et les différentes techniques et méthodes expérimentales utilisées dans cette thèse. Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des blocs, et les techniques de conservation de ces blocs ;

- Le troisième chapitre, est consacré à la caractérisation physicochimique, minéralogique et géotechniques des différentes matières premières utilisées ;

- Le quatrième chapitre présente les résultats et interprétation sur le comportement hygro-thermomécanique des blocs de terre comprimée stabilisée. A l'issue des analyses et interprétations des résultats obtenus, le choix le plus adéquat a été fait sur les blocs qui répondent aux exigences de bonne résistance mécaniques, et une bonne isolation thermique.

- Le chapitre V est consacré à l'étude de l'isolation hygrothermique de parois obtenues à partir des différentes formulations (terre seule, terre +fibres, terre + fibres+ ciment, terre +fibres +ciment + laitier de haut fourneau) étudiées

Le présent mémoire se termine par une conclusion générale qui rappelle le principaux résultats de l'étude.

I. SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIQUE

La terre demeure, à travers l'histoire, l'un des principaux matériaux de construction. Elle est disponible en abondance, et sa transformation en matériau de construction requiert peu de dépenses énergétiques (très peu d'émission de CO₂). Ses grandes qualités plastiques et écologiques en ont fait un matériau de choix pour la construction à travers les âges. L'industrialisation dans les pays développés a favorisé l'utilisation massive des parpaings, bétons et autres liants hydrauliques au détriment de la terre crue. Mais avec les inconvénients environnementaux qu'engendrent ces matériaux, la construction en terre crue connaît aujourd'hui un regain d'intérêt dans les pays en développement et même dans les pays industrialisés. Malgré les faiblesses qu'elle présente à l'état actuel (forte sensibilité à l'eau, manque de durabilité) la construction en terre crue présente, dans sa forme stabilisée et selon la technique utilisée, d'énormes avantages environnementaux en tant que voie écologique.

Il existe de nombreuses techniques de construction en terre. Chacune de ces techniques est rattachée à un lieu géographique défini, un climat donné et selon les additifs disponibles localement. Parmi ces techniques, celle de la brique de terre comprimée (BTC) procure aux constructions une durabilité plus grande par rapport à la technique de l'adobe. Aujourd'hui nombreux sont les chercheurs qui étudient les propriétés mécaniques et hygrothermiques des terres pour la construction.

1. Techniques d'utilisation de la terre en construction

En se basant sur le patrimoine mondial des traditions de construction en terre crue, on recense un grand nombre de techniques de construction en terre crue, avec de nombreuses variantes selon les propriétés géotechniques de la terre. Selon les études menées par le groupe CRATerre, douze techniques de construction en terre crue sont répertoriées, dont huit principales d'usage courant [1].

✚ Technique de la bauge

Ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses. Les murs sont constitués d'une succession de couches de terre dites levées généralement d'une soixantaine de centimètres de hauteur. Montée la plupart du temps à la fourche, la levée encore meuble est compactée au bâton, éventuellement taillée au paroir, bêche plate et tranchante, avant d'être lissée ou récompactée.

Selon le type de mise en œuvre, il faut ensuite une à quatre semaines de séchage avant de pouvoir mettre en place la levée suivante pour laquelle un nouveau mélange d'eau, de terre et de fibres doit être réalisé. Selon la granularité de la terre, l'élasticité du mélange et le savoir-faire du maçon, la hauteur des levées peut varier entre cinquante centimètres et un mètre vingt, la largeur entre cinquante centimètres et quatre-vingt centimètres.

✚ Technique du torchis

Le torchis est une technique de remplissage en terre crue, il s'agit d'une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille. Torchis vient de «tordre», de « torche », car sa pose traditionnelle consiste à poser de la paille ou du foin torsadé dans une boue ou pâte de limon argileux sur des éclisses ou des gaulettes entre les colombages. On peut distinguer 2 grands types de mélange :

- *Le torchis lourd* : beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature. Sa conductivité thermique est de $\lambda = 1,05 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Il a une masse volumique de 1400 kg/m^3 (1800 kg/m^3 humide). Il privilégie l'inertie et l'accumulation thermique (chaleur l'hiver ou fraîcheur l'été).
- *Le torchis allégé* : beaucoup de paille et un peu de terre. Sa conductivité thermique est de $\lambda = 0,12 \text{ à } 0,15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Il a une masse volumique de $300 \text{ à } 400 \text{ kg/m}^3$. Il privilégie donc l'isolation, et il est 9 fois plus isolant que le torchis traditionnel car il renferme une forte porosité.

✚ Terre-paille

Cette technique consiste à disperser la terre dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le

matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.

Terre façonnée

La terre, souvent amandée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de mur de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.

Terre extrudée

La terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.

Les Adobes

L'adobe est de l'argile mélangée à de l'eau et à une faible quantité de paille hachée, et qui peut être façonnée en briques séchées au soleil. Par extension, l'adobe (ou banco) est la brique de terre crue, moulée et séchée au soleil, et utilisée comme matériau de construction. Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde. Les briques d'adobe sont coulées dans un cadre ouvert rectangulaire. Le moule est retiré, et la brique est mise à sécher quelques heures, puis elle est disposée sur la tranche pour terminer le séchage. Lors du séchage, les briques peuvent être placées à l'ombre pour éviter l'apparition de fissures. L'adobe sert aussi à remplir des tubes de textile (colombin d'adobe) qui, tassés sur place et réunis verticalement par des piquets, permettent de monter des murs et de supporter une charpente.

Le pisé

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

Les blocs de terre comprimée (BTC)

Les blocs de terre comprimée qui sont des formes évolutives et modernisées des blocs d'adobe font partie des techniques de construction en terre crue les plus récentes. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compactage de la terre légèrement humide dans un moule métallique au moyen d'une presse. Comparés aux adobes, les BTC présentent une meilleure résistance à la compression et une insensibilité à l'eau plus élevée [1, 2, 3].

En effet ils ont été mis en œuvre pour la première fois en Colombie vers les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural. Par contre, l'intention de compacter la terre dans le but d'améliorer sa résistance mécanique s'est fait déjà ressentir depuis le temps ancien à travers la formulation des blocs de terre moulée compressée à l'aide de pilon de bois. Ce procédé est encore utilisé dans le monde rural. Les premières machines à comprimer la terre

auraient été imaginées au XVIIIe siècle, mais les premières presses mécaniques ont vu le jour en début du XXe siècle. A l'heure actuelle ces presses ont été modernisées. L'industrie de la brique crue a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux. Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la fameuse petite presse CINVA-RAM, imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie. Vers les années 1970 et 1980, d'autres générations de presses (presse manuelle, mécanique, hydraulique, motorisée) ont été mises sur le marché. A l'heure actuelle on assiste à un véritable développement du marché de la production et de l'utilisation des blocs de terre comprimée [2].

1.1. Diversités des produits de blocs de terre comprimée

Les dimensions courantes des BTC sont adaptées à une grande souplesse d'emploi dans des solutions constructives variées, en maçonnerie porteuse ou renforcée et en maçonnerie de remplissage (Figure I. 1). Les briques de terre comprimée permettent aussi la réalisation de structures particulières (arcs, coupoles et voûtes), pour des constructions à usage d'habitation ou industriel.



Figure I. 1 : Différents produits de blocs de terre comprimée [2]

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

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde, profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. Voici quelques exemples fascinants :

- Centre de l'architecture de terre au Mali (Figure I. 2),
- les logements semi-collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes en Algérie (Figure I. 3),
- l'atelier électronique en Inde voir (Figure I. 4),
- le domaine de la terre, Isle d'Abeau à Lyon, France (Figure I. 5).



Figure I. 2 : Centre de l'architecture de terre au Mali



Figure I. 3 : Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbas (Algérie) [3]



Figure I. 4 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde



Figure I. 5 : Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbas (Algérie) [3]

1.3. Avantage des BTC

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue et à certains matériaux classiques de maçonnerie. Les BTC offrent une résistance mécanique et une durabilité meilleure que les adobes. Les BTC donnent une grande souplesse dans la conception architecturale comparativement aux pisés. Les BTC offrent des performances thermiques supérieures et ne demandent aucune énergie de cuisson comparées aux briques cuites.

2. La terre, un matériau de construction

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui habite les êtres vivants et leurs ouvrages. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre [4].

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments :

- les graviers (5-20 mm) ;
- les sables (0.08-5 mm) ;
- les limons (2 μm -0.08 mm) ;
- et les argiles (< 2 μm).

An niveau de la composition de la terre les graviers et les sables jouent le rôle de squelette et les limons et les argiles jouent le rôle de liant. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent [4]. Les propriétés des terres sont alors déterminées par les proportions de ces éléments les constituants, par exemple, lorsque ces constituants sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les sables et les graviers sont stables, les limons et les argiles sont instables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction [5]. Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

2.1. Les argiles

Généralement, une argile naît majoritairement de la désagrégation physique et mécanique, puis de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Elle est en perpétuelle évolution dans le temps à l'échelle géologique, en passant d'un minéral argileux à un autre et en changeant ses propriétés initiales en fonction de l'environnement. A l'échelle

microscopique, elles présentent une structure en feuillet. Il est important de prendre en compte la nature physico-chimique des argiles, du fait que leur comportement rhéologique est gouverné par les interactions entre les feuillets argileux. Dans cette partie, et pour définir cette nature physico-chimique, on présente la caractérisation minéralogique des différents niveaux d'organisation qui constituent les argiles.

2.1.1 Définition

Le terme argile vient du grec "Argilos" dérivé de "Argos" qui veut dire blanc, ou du latin "Argila" ; couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom [6]. Mais le mot argile n'a pas de définition universelle. En effet, il en existe autant que de disciplines. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique [7]. Cependant le terme "argile" désigne non seulement une formation rocheuse et la matière première qui en résulte est un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz, etc.), d'impuretés cristallines (oxyde de fer, titane, etc.), mais il définit aussi un domaine granulométrique comprenant des particules minérales de caractéristiques diverses (plasticité, etc.), dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres ($< 2\mu\text{m}$) [6, 7].

L'attrait de ces dernières années pour l'étude des argiles par de nombreux laboratoires dans le monde s'explique par leur abondance dans la nature, l'importance des surfaces qu'elles développent, la présence des charges électriques sur cette surface et surtout l'échangeabilité des cations inter-foliaires. Ces derniers, appelés aussi cations compensateurs, sont les principaux éléments à l'origine de l'hydratation, du gonflement, de la plasticité et de la thixotropie, et confèrent à ces argiles des propriétés hydrophiles [8].

2.1.2. Structure et Classification des minéraux argileux

L'argile, abondante à la surface de la terre, mais aussi présente dans les météorites, est formée majoritairement par l'altération des roches mères, puis est en perpétuelle évolution sur des temps à l'échelle géologique, en passant d'un minéral argileux à un autre (smectite à illite, par exemple) et en changeant ses propriétés en fonction de l'environnement [9]. C'est un aluminosilicate plus ou moins hydraté. Les minéraux argileux appartiennent donc à la famille des phyllosilicates (phylliteux). Ils sont organisés en couches planes infinies et structurellement constitués d'un agencement de tétraèdres siliciques SiO_4^{4-} et/ou éventuellement AlO_4^{5-} (l'ion silicium ou aluminium est tétra coordonné par rapport à l'oxygène) et d'octaèdres aluminiques et/ou magnésiques (l'ion Al^{3+} sera le centre d'un octaèdre et est alors hexa coordonné (Figure I. 6)).

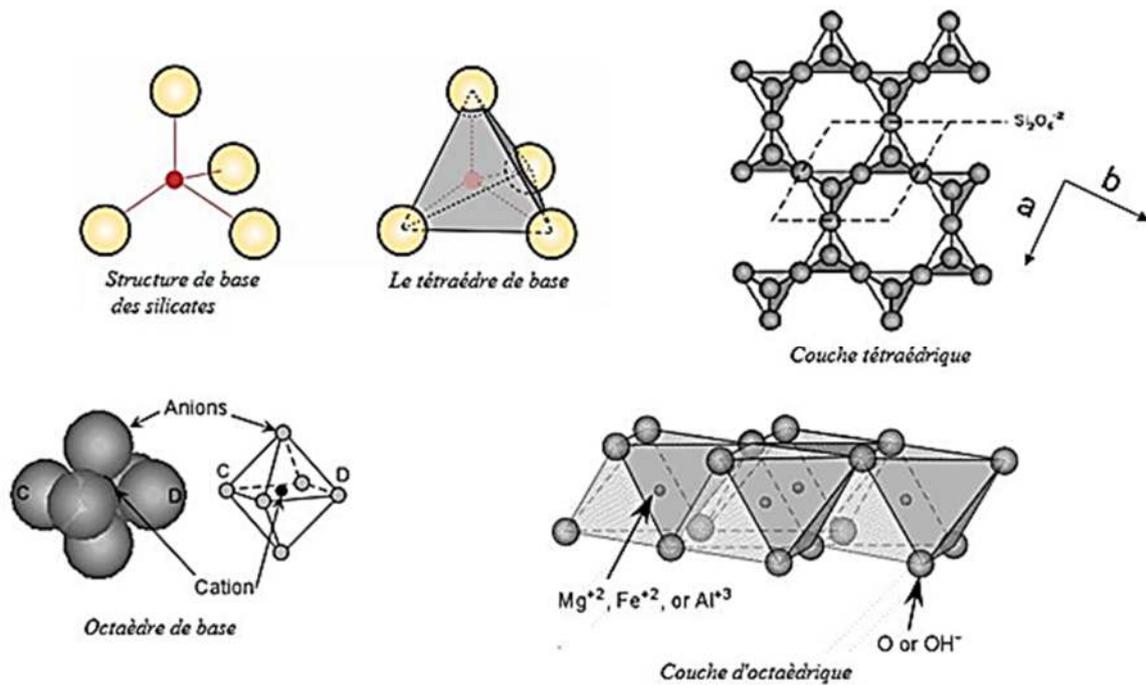


Figure I. 6 : Structure des argiles (couche tétraédrique et couche octaédrique) [9]

Ces tétraèdres et octaèdres résultent de la superposition de trois types de plans anioniques (X, Y et Z) disposés parallèlement et contenant des anions oxygène et des groupements hydroxyles (Figure I. 7). Ces plans sont séparés par un espace dit inter-feuillet qui peut être occupé par des cations, de l'eau, des cations éventuellement hydratés, des composés organiques ou des feuillets entiers...

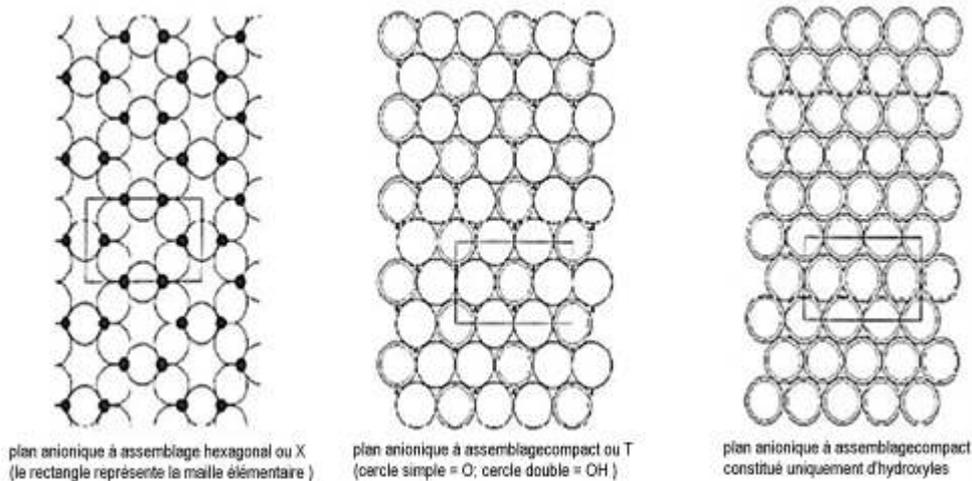


Figure I. 7 : Les trois types de plan anionique [10]

L'ensemble feuillets-espace inter-feuillets forme une unité structurale. L'épaisseur de cette unité est appelée distance basale. C'est une caractéristique essentielle des minéraux argileux [11, 12].

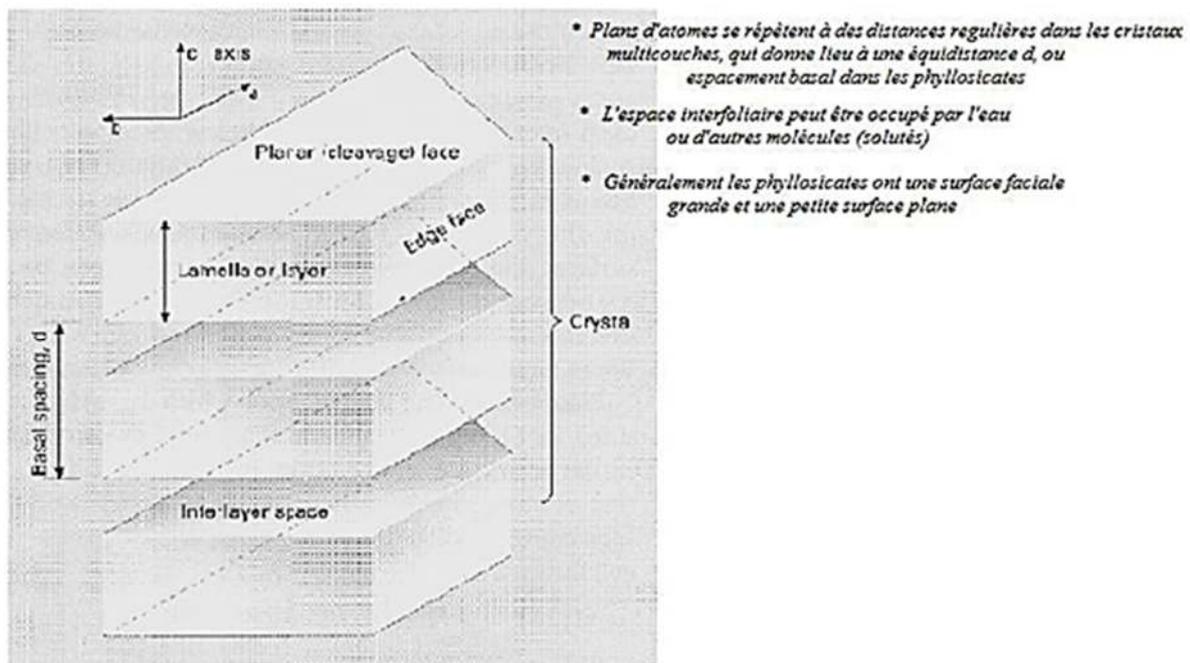


Figure I. 8 : Structure générale des phyllosilicates [13]

La classification des minéraux argileux est très délicate, dans la mesure où elle peut faire intervenir plusieurs critères différents. La classification adoptée par le comité de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA) s'appuie sur les grandes données structurales. Ainsi, sur la seule base du mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on distingue trois grandes familles :

- ✚ Les minéraux phylliteux,
- ✚ Les minéraux fibreux,
- ✚ Les minéraux interstratifiés [12, 14] .

Les minéraux phylliteux sont les plus répandus et sont utilisés dans notre étude. D'après le rapport de la « Clay Minerals Society », trois principaux critères sont à prendre en compte pour leur classification :

- ✚ l'arrangement des couches (1:1 ou 2:1),
- ✚ la charge du feuillet,
- ✚ les éléments qui compensent la charge du feuillet.

Cela permet de distinguer cinq groupes. Ces derniers sont divisés en sous-groupes selon le taux d'occupation des octaèdres. Cette classification est un outil précieux permettant de différencier les différents phyllosilicates (Tableau I. 1). Un caractère structural supplémentaire est l'ordre d'empilement des feuillets (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'empilement peut en effet être parfaitement ordonné ou, au contraire, présenter une structure plus ou moins désordonnée (translations non aléatoires des feuillets) ou totalement désordonnée (translations aléatoires) [10].

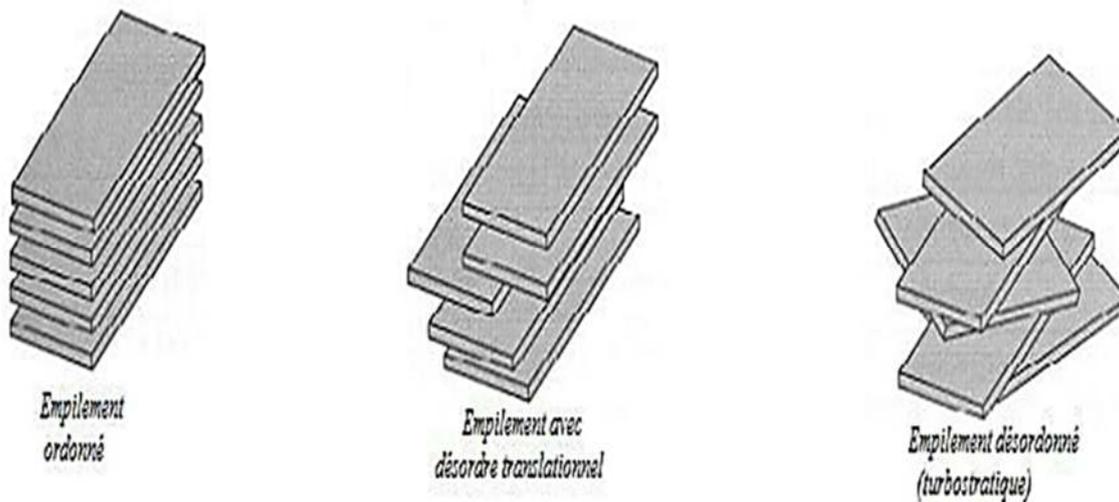


Figure I. 9 : Différents types de désordre obtenus par empilement des feuillets (d'après Calvet, 2003)

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèce	Formule	
1 : 1	Kaolinite	Kaolinites	Dickite Nacrite Kaolinite Métahalloysite Halloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$	
		Serpentines	Antigorite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	
2 : 1	Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$	
		Talc	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	
	Smectites	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(Al_{1,67}Mg_{0,33})O_{10}(OH)_2$	
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$Mg_3Si_{3,67}Al_{0,33}O_{10}(OH)_2$	
	Vermiculites	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(Al,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$	
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(Mg,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$	
	Micas	Micas dioctaédriques	Muscovite	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
		Micas trioctaédriques	Phlogopite	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	
	2 : 1 : 1	Chlorites	Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$Al_4(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
			Chlorites trioctaédriques	Espèces différentes	$(Mg,Fe...)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$

Tableau I. 1 : Formules structurales des principaux minéraux argileux et des phyllosilicates apparentés [15]

2.1.3. Minéraux de types 1:1 (TO) Structure du kaolin

Les minéraux de type 1:1 (ou T-O) sont des minéraux formés de deux couches : une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. La succession de trois couches d'oxygène constitue le feuillet. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1 Å. A ce type correspond le groupe de la kaolinite.

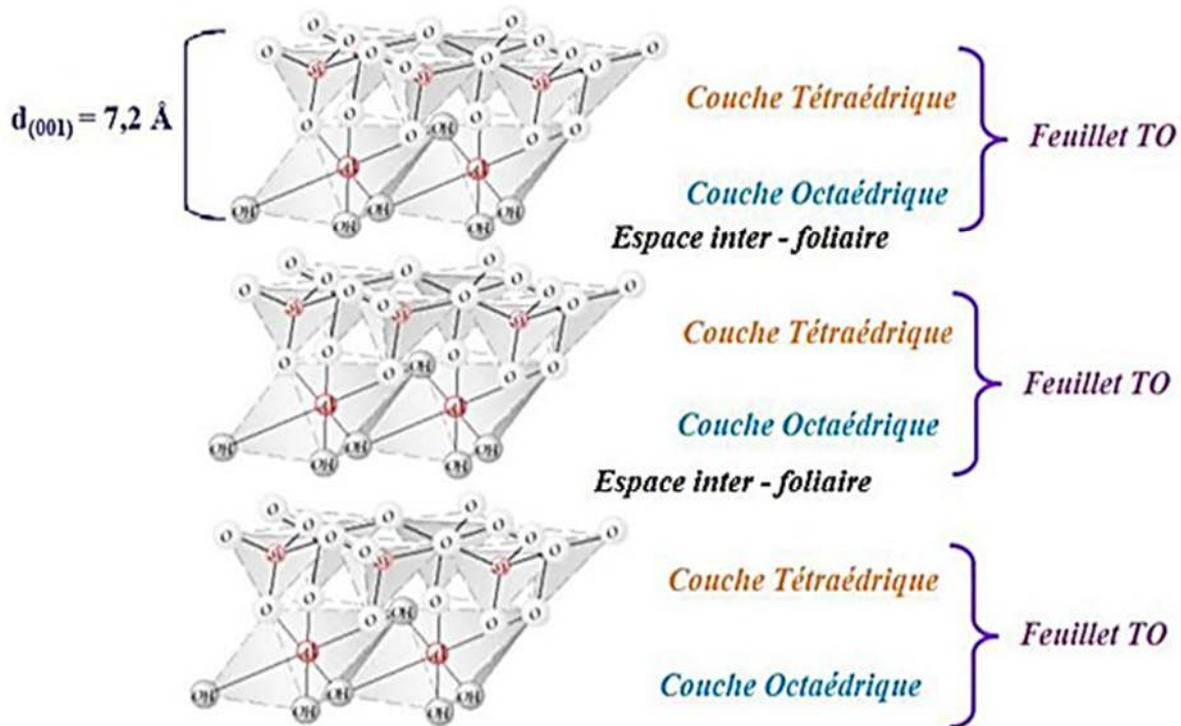


Figure I. 10 : Structure d'un minéral de type 1 :1

Exemple : la kaolinite, sans inter-feuillet, l'équidistance réticulaire est alors de 7,1Å. Ces minéraux peuvent avoir aussi l'eau comme inter-feuillet entraînant une augmentation de l'équidistance réticulaire; C'est le cas de l'halloysite avec $d = 10,1 \text{ \AA}$. La répartition de l'ensemble des charges est de telle sorte que le feuillet élémentaire est électriquement neutre. L'espace inter-foliaire ne comprend donc pas de cation. Les particules constituant les minéraux de type 1/1 ont leurs feuillets successifs empilés de telle sorte que le plan d'oxygène d'un feuillet se trouve en face du groupement hydroxyle du feuillet voisin. La conséquence d'une telle disposition est la stabilisation du réseau par liaison hydrogène [11].

2.1.4. Minéraux de type 2 :1 (TOT)

Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) sont formés de 3 couches disposées de la manière suivante : une couche d'octaèdres contenant de l'aluminium encadrée par deux couches tétraédriques contenant du silicium. Les feuillets sont constitués par la succession de quatre couches d'oxygène. L'équidistance caractéristique varie de 9.4 à 15Å selon le contenu de l'inter-feuillet. A ce type correspondent les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et celui des micas (Figure I. 11).

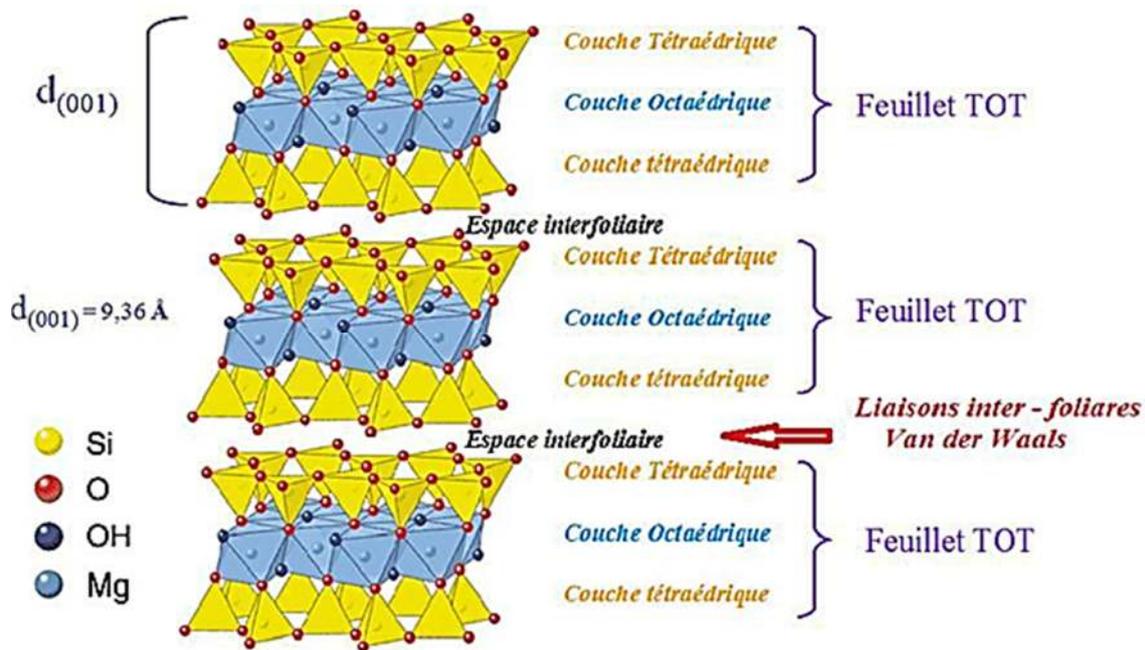


Figure I. 11 : Représentation schématique des empilements de tétraèdre siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1

A l'exception du talc et de la pyrophyllite, le feuillet élémentaire des minéraux de ce groupe porte une charge négative provenant des substitutions isomorphiques dans les interstices tétraédriques et/ou octaédriques. Ces substitutions correspondent essentiellement au remplacement de Si^{4+} par Al^{3+} et/ou Fe^{3+} dans les tétraèdres et au remplacement de Al^{3+} par Fe^{2+} , Mg^{2+} et Mn^{2+} (minéraux dioctaédriques) ou de Fe^{2+} et Mg^{2+} par Li^{+} (minéraux trioctaédriques) dans les octaèdres. Cette substitution entraîne un déficit de charge positive au niveau du feuillet.

Pour un déficit de charge du feuillet compris entre 0,2 et 0,9, la compensation peut être assurée par des cations inter-foliaires (K^{+} , Na^{+} et Ca^{2+}) plus ou moins hydratés. Ces cations avec leur eau d'hydratation pénètrent dans l'espace inter-foliaire, induisant ainsi un gonflement de la particule. Dans ce cas, la distance basale est fonction de la charge et du nombre de molécules d'eau associées à ces cations. En effet, les molécules d'eau font écran entre le cation compensateur et le feuillet, réduisant ainsi l'attraction cation compensateur feuillet. Plus il y a de molécules d'eau, plus l'écran est important et plus la distance basale augmente. C'est le cas des smectites où chaque feuillet a une extension latérale très grande, de 0,1 à $1\mu\text{m}$, et est relativement flexible.

Dans d'autres cas, comme par exemple la famille des chlorites, la charge négative du feuillet est compensée par une couche d'octaèdres à base d'hydroxyde de magnésium (brucite) ou d'hydroxyde d'aluminium (gibbsite) dans l'espace inter-foliaire. La distance basale du feuillet est alors de 14 \AA .

Lorsque le déficit de charge du feuillet est supérieur ou égal à 0,9, la compensation est assurée par la présence dans l'espace inter-foliaire de cations non hydratés. La distance basale est voisine de 10 \AA . C'est le cas de l'illite où le déficit de charge provient pour l'essentiel de

substitutions dans les couches tétraédriques et où les cations compensateurs sont des ions K^+ non hydratés. Ces ions s'insèrent entre les feuillets et contribuent à rigidifier l'ensemble. La capacité de gonflement de l'illite par insertion d'eau entre les feuillets est inexistante du fait de la faible distance inter-feuillets. Le cas des smectites, comme la montmorillonite, est un peu différent de celui de l'illite. En effet, dans les smectites, le déficit de charge varie entre 0,6 et 0,9 du fait de substitutions à la fois dans les couches tétraédriques et/ou octaédriques. La compensation électrique est assurée par l'insertion de cations plus ou moins hydratés dans l'espace inter-foliaire. L'une des conséquences est que ce type d'argile peut accueillir des molécules d'eau dans l'espace inter-foliaire et constituer ce qu'on appelle une argile gonflante [12].

2.1.5. Minéraux de type 2:1:1

Ils sont constitués d'une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques et un inter-feuillet constitué par une couche d'octaèdres. La succession de six couches d'oxygène constituent le feuillet). L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å; à ce type correspond le groupe du chlorite (Figure I. 12). Les minéraux de ce groupe se subdivisent en deux sous-groupes selon la nature du feuillet 2:1 :

✚ les chlorites vrais où le feuillet de type 2:1:1 est identique à celui d'un mica magnésien chargé négativement. Cette charge est neutralisée par la substitution d'un des ions Mg^{2+} par Al^{3+} dans la couche brucitique. La liaison entre les feuillets de ces chlorites est assurée par les interactions électrostatiques entre le feuillet de type 2:1 et la couche brucitique. Les chlorites vrais ont une équidistance basale stable.

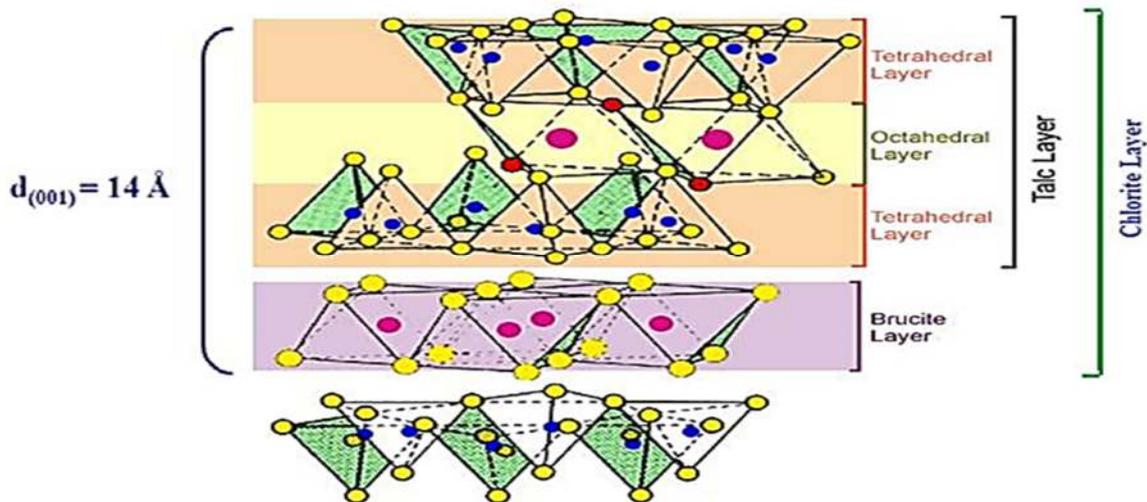


Figure I. 12 : Représentation schématique des empilements de tétraèdre siliceux et d'octaèdres alumineux d'un minéral de type 2:1:1

✚ les chlorites gonflants (pseudo-chlorites) où le feuillet de type 2:1 est semblable à celui d'une smectite. Elles sont gonflantes [12].

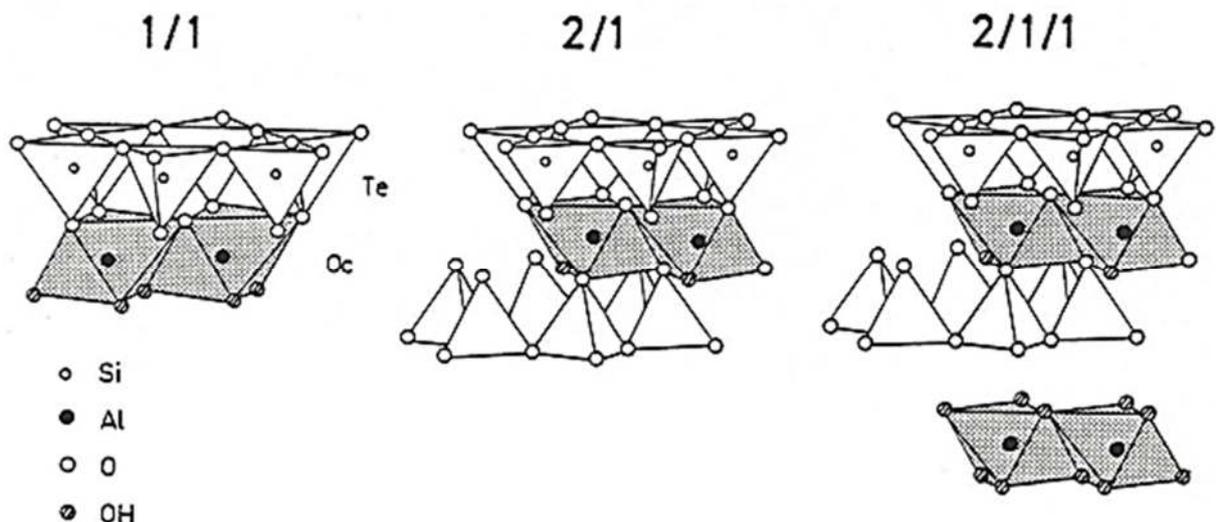


Figure I. 13 : Les trois types de feuillets chez les minéraux argileux [12]

2.1.6. Minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux

Les minéraux fibreux se caractérisent par des feuillets argileux discontinus (Figure I. 14). Elles présentent une structure de base en ruban de type 2:1, proche du talc en composition mais avec une structure en chaînes comme dans les pyroxènes ou les amphiboles. Les tétraèdres sont reliés entre les chaînes. L'oxygène apical pointe alternativement vers le haut ou le bas dans les rubans adjacents. Les feuillets tétraédriques sont continus, les feuillets octaédriques discontinus. Il y a de larges espaces entre les chaînes qui sont remplis d'eau, liée ou non (eau zéolitique) et de cations échangeables. La structure en ruban confère à l'argile un aspect en lattes ou en fibres. Suivant la longueur du ruban, on distingue deux familles parmi ces minéraux fibreux : les sépiolites qui correspondent à un ruban à 8 octaèdres et qui comportent essentiellement le magnésium (Mg) comme cation échangeable, rarement le sodium (Na) ; et les palygorskites constituées d'un ruban à 5 octaèdres (ou attapulgite) et plus riche en aluminium (Al) que la sépiolite [14].

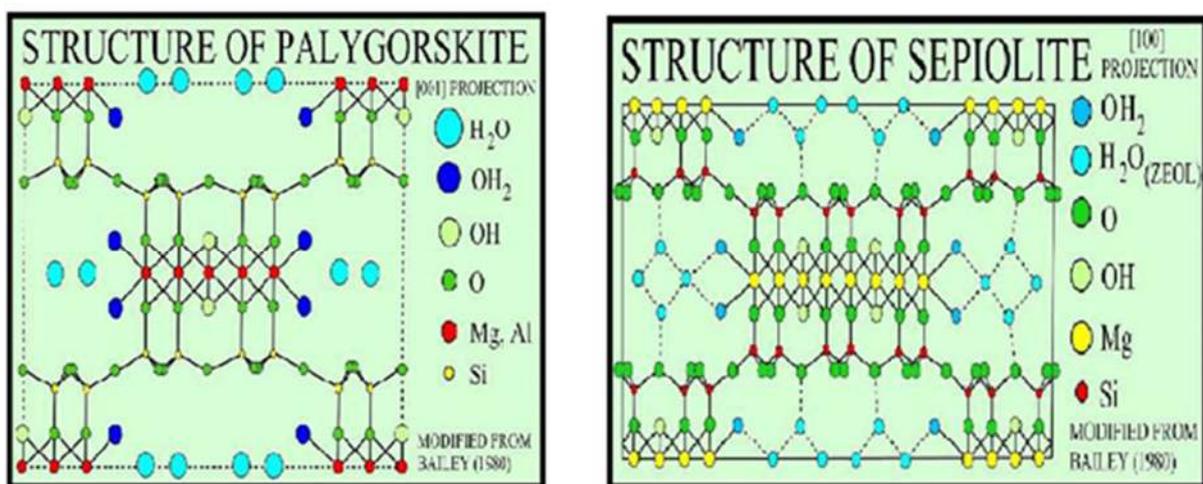


Figure I. 14 : Structure des minéraux à pseudo – feuillets et à faciès fibreux [16]

2.1.7. Minéraux inter-stratifiés

Un minéral inter stratifié est formé par l'empilement alterné de feuillets de minéraux argileux élémentaires de natures différentes, en proportion variée. Selon que cette alternance est régulière ou non, on distingue des minéraux inter-stratifiés réguliers si l'empilement des différents types de feuillets se fait selon des séquences répétitives (exemple : AB – AB – AB) et irréguliers si l'empilement des différents types de feuillets est aléatoire, c'est-à-dire si aucune séquence répétitive ne se dessine (Exemple : AB – BA – BA A (Figure I. 15)). De pareilles associations soulèvent plusieurs problèmes, celui de l'identification de leurs constituants et celui de leur nomenclature [6]. Le Tableau I. 2 présente les minéraux inter- stratifiés naturels les plus courants.

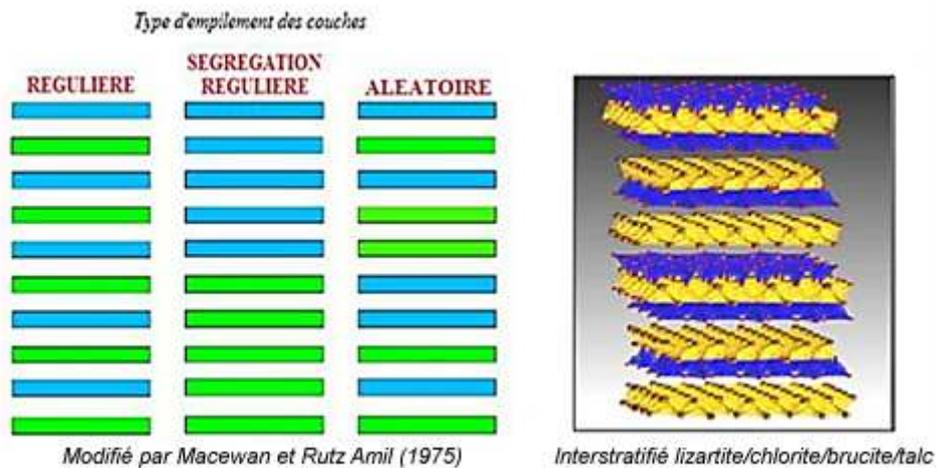


Figure I. 15 : Structure des minéraux inter-stratifiés

Type d'inter-stratification	Espèces Minérales
Alternance régulière : système à deux composés	Muscovite - montmorillonite
	Illite - smectites
	Glaucosite - smectites
	Chlorite - smectites
	Chlorite - vermiculite
	Mica - vermiculite
	Serpentine - chlorite
Alternance de type ABAA : Système à deux composés	Illite - smectites
	Glaucosite - smectites
Alternance aléatoire : Système à deux	Illite - smectites
	Glaucosite - smectites
	Mica - vermiculite
	Mica - chlorite
	Smectites – chlorite
Système à trois composés	Kaolinite - smectites
	Illite – chlorite - smectites
	Illite – smectite - vermiculite

Tableau I. 2 : Les minéraux inter-stratifiés naturels [10, 17]

2.1.8. Minéraux associés aux minéraux argileux

Les argiles naturelles renferment dans la majeure partie des cas des minéraux non argileux qui jouent un rôle non négligeable dans les propriétés physico-chimiques. Les principaux minéraux non argileux sont :

 La silice : un tectosilicate qui se présente sous différentes formes de variétés. Les plus connues sont les trois formes bien cristallisées comme le quartz, la trydimite et la

cristobalite. La silice modifie la rhéologie des pâtes plastiques faites à base d'argiles. A l'état très fin, elle réagit aussi avec la chaux en milieu basique pour donner les silicates de calcium hydratés servant de ponts pour les particules isolées d'une argile [18].

✚ Les oxydes et oxy-hydroxydes de fer couramment rencontrés sont : l'hématite $\alpha(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, la maghémite ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$), la magnétite (Fe_3O_4), la goethite (αFeOOH), la lépidocrocite (γFeOOH), la limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Leur densité étant élevée, ils contribuent au renforcement des propriétés mécaniques des argiles.

✚ Les feldspaths sont des tectosilicates avec un remplacement partiel des ions Si^{4+} par Al^{3+} dans les tétraèdres. Ceci entraîne un déficit de charge qui est compensé par l'insertion dans leur structure des ions K^+ , Na^+ et Ca^{2+} . On assiste donc à la formation des feldspaths de type potassique ($(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{K}$, exemple : l'orthose, la microcline et la sanidine), de type sodique ($(\text{Si}_3\text{AlO}_8)\text{Na}$, exemple : l'albite) et de type calcique ($(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8)\text{Ca}$, exemple : l'anorthite). Les feldspaths sont des phases fondantes et permettent la formation de phase visqueuse à basse température. De telles formations diminuent la porosité de la pièce et améliorent ses propriétés mécaniques.

✚ Les carbonates existent sous plusieurs types dont les plus connus sont les carbonates de Ca, Mg et de Mn : la calcite (CaCO_3), la magnésite (MgCO_3), la dolomite ($(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$), la rhodochrosite (MnCO_3). La dolomite et la calcite sont plus fréquemment rencontrées dans les argiles. Les carbonates sont utilisés en céramique pour leur faible retrait et leur faible porosité. Ils sont aussi une source d'apport d'éléments tels le CaO et le MgO. Dans les sols, le terme matière organique regroupe tous les produits constitués de molécules carbonées. La matière organique possède une surface spécifique de l'ordre de 300 à 500 m^2/g qui augmenterait la surface spécifique de certaines argiles.

2.1.9. Propriétés des Argiles

Les argiles, ressources majeures des hommes depuis des temps reculés, constitueront certainement des matériaux précieux dans le futur grâce à leur propriétés spécifiques permettant une utilisation en parfaite adéquation avec la préservation et la protection de l'environnement.

Les minéraux argileux se présentent sous forme de cristallites ou de particules de très petites dimensions. De ce fait, ils possèdent une très grande surface de contact. L'étude des propriétés physico – chimiques de ces minéraux argileux comporte donc :

- ✚ l'étude de leur forme, de leur surface spécifique ;
- ✚ leur capacité d'absorption de l'eau et leur gonflement ;
- ✚ leur capacité d'échange ionique ;
- ✚ les propriétés mécaniques des systèmes argiles – phase dispersante (eau – argile).

L'argile forme avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène est réversible : les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. Les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par gonflement. Elles constituent ainsi une

réserve d'eau [19]. L'eau permet aux feuillets de glisser les uns sur les autres (plasticité), si elle est en excès l'argile est alors trop visqueuse, elle colle et n'est plus malléable, si il n'y a pas assez d'eau, l'argile se rétracte et devient dure. La plasticité et la rétraction sont variables selon le type d'argile.

2.1.9.1. Surface spécifique

La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre. La surface des argiles est supérieure à celles de minéraux de même taille, mais de forme différente. Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface. Ainsi l'augmentation de la surface spécifique entraîne la diminution de la densité en charge (σ) favorisant le gonflement. Les minéraux fibreux sont caractérisés par une grande surface spécifique. Les argiles dont les particules ont des surfaces spécifiques grandes sont très gonflantes [20]. La surface totale (ou surfaces spécifiques SS) comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace inter-foliaire. Le tableau suivant donne les valeurs des surfaces externes, des surfaces internes et des surfaces totales de quelques minéraux.

Minérale	Surface externe (m ² /g)	Surface interne (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)
Smectite	80	600 - 700	700 - 800
Vermiculite	40 - 70	700	760
Chlorite	100 - 175	-	100 - 175
Illite	80 - 120	20 - 55	100 - 175
Kaolinite	10 - 30	0	10 - 30

Tableau I. 3 : Surface spécifique de quelques minéraux [21]

2.1.9.2. L'hydratation des argiles

Les minéraux argileux présentent une grande affinité pour l'eau qui s'exprime d'une part par la quantité d'eau susceptible d'être retenue par une argile et, d'autre part, l'énergie avec laquelle cette eau est liée. Ce phénomène d'ordre capillaire est naturellement très important pour l'ensemble des matériaux argileux en raison de leur granulométrie excessivement fine. La présence de charges à la surface des feuillets est un paramètre supplémentaire qui contribue à accentuer les interactions argile - eau.

Pendant l'hydratation d'une montmorillonite initialement sèche, l'espace inter-foliaire va augmenter et l'écartement des feuillets d'argile sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté du cation compensateur sera petit : il s'agit d'un *gonflement intra-cristallin*. Dans le cas d'une montmorillonite-Ca, le phénomène de gonflement est réduit à ce mécanisme [22].

Dans le cas d'une montmorillonite-Na il existe aussi un *gonflement osmotique* qui résulte de la formation d'une couche diffuse. L'épaisseur de celle-ci, qui dépend de l'ion considéré et des caractéristiques de la solution, peut atteindre 100 nm. La raison du gonflement osmotique est la différence de concentration entre la solution interne (Na^+ dans l'espace inter-feuillet) et celle externe, avec une concentration inférieure en Na^+ . Cause de la fixation électrostatique de Na^+ , cette différence ne peut être compensée que par une quantité supplémentaire d'eau entrant dans l'espace inter-feuillet [21].

La propriété commune à tous les phyllosilicates à CEC non nulle est de gonfler, en présence d'eau, pour former des solides hydratés, des gels et/ou des suspensions plus ou moins stables. La pénétration des molécules d'eau dans les espaces inter-foliaires détermine une augmentation du volume, et donc l'apparition d'une pression de gonflement. Il peut y avoir d'une à quatre couches d'eau en fonction de la quantité d'eau entre les feuillets. Les propriétés d'hydratation, de gonflement et de dispersion n'existent que parce que l'énergie de cohésion inter-foliaire est suffisamment faible pour que les molécules d'eau puissent pénétrer entre les feuillets. Mammy (1968) [23] a montré que l'aptitude d'un phyllosilicate à s'hydrater résultait de la concurrence entre :

EA - l'énergie d'attraction des molécules d'eau (la somme des interactions eau-cations, eau-eau et eau-feuillets) et

EC - l'énergie de cohésion inter-feuillets (qui dépend des cations inter-foliaires, de l'origine de la charge du feuillet et du mode d'empilement des feuillets).

On peut donc expliquer l'existence de divers modes de gonflement sur une base énergétique :

- Lorsque la cohésion reste élevée, l'hydratation est limitée à quelques couches d'eau. Le cas typique est la montmorillonite-Ca, pour laquelle $EC > EA$ dès l'adsorption de la deuxième couche d'eau.

Lorsque la cohésion inter-feuillets devient très faible, on a toujours $EA > EC$ et le nombre de couches d'eau insérées peut devenir très élevé, conduisant, comme dans le cas de la montmorillonite - Na, à la dispersion des feuillets [21].

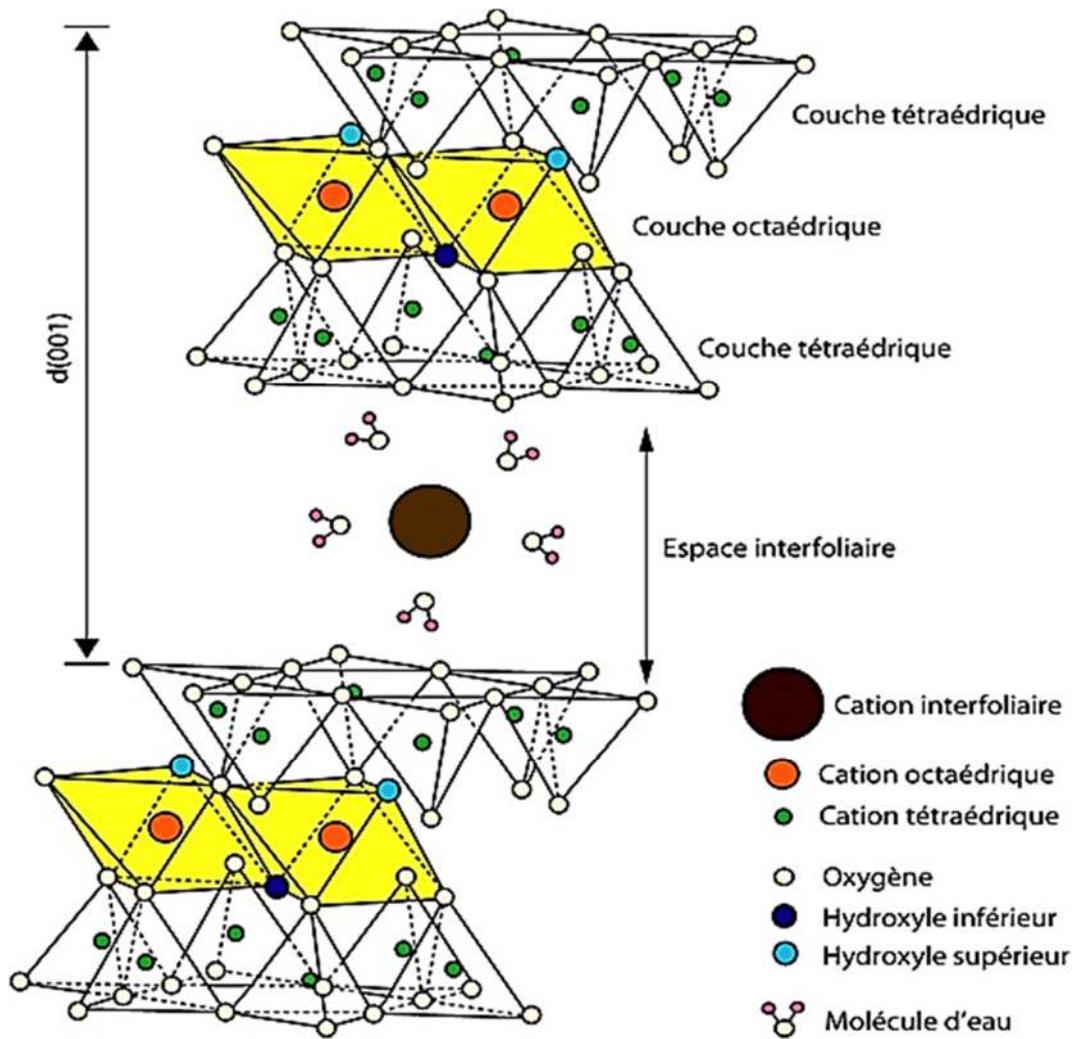


Figure I. 16 : Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite (Grim, 1968)

[24]

L'eau peut être présente dans l'argile de différentes façons, de la plus stable à la moins stable (Tableau I. 4)

Eau de constitution	Il faut chauffer à haute température pour casser les liaisons chimiques. C'est un processus endothermique. C'est l'eau liée qui s'en va relativement à basse température,
Eau d'hydratation	N'entraînant pas une destruction de la structure de la smectite gonflante, mais une variation de dimension de la maille de la smectite. On parle aussi d' « eau zéolitique ». C'est un processus endothermique
Eau absorbée	C'est l'eau hygroscopique qui se fixe dans les premières couches autour des feuillets d'argile. La chaleur d'absorption est de l'ordre de 2650 kJ/kg _{eau}
Eau d'interposition	C'est l'eau qui reste entre les particules quand il n'y a plus de retrait. Elle part dans la deuxième partie du séchage. Elle est en équilibre avec l'humidité de l'air extérieur
Eau libre	On la trouve dans les barbotines, au-delà de la limite de liquidité.

Tableau I. 4 : Les Différents types d'eaux dans les argiles [25]

2.19.3. Espaces inter – foliaires et capacité d'échange ionique

On appelle espace inter-foliaire ou inter-feuillet, l'espace qui existe entre deux feuillets (Figure I. 17). Dans les argiles, ces espaces peuvent être occupés ou non. L'accès des molécules d'eau aux espaces inter-foliaires entraîne une augmentation du volume c'est-à-dire un gonflement du matériau. Les interfeuillets sont vides lorsque les différents feuillets sont neutres et liés entre eux par des liaisons hydrogène dans le cas des espèces 1:1, ou par des liaisons de van der Waals dans le cas des minéraux de type 2:1 tels que le talc ou la pyrophyllite [26].

Les interfeuillets sont occupés par des cations dès que les feuillets de l'édifice présentent un déficit de charge à la suite des substitutions isomorphiques. Ces cations rétablissent l'électroneutralité du système et en même temps assurent la liaison entre les feuillets adjacents, qui est de nature ionique. Ces cations peuvent être soit «secs» soit hydratés. Les cations les plus fréquents sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Li^+ .

Dans les phyllosilicates non expansibles, la charge est compensée par du potassium, et les feuillets d'illite constituent un exemple de ce type d'arrangement. La cohésion des feuillets est telle que l'échange du cation compensateur par d'autres cations ne peut se réaliser dans les conditions naturelles. Nous avons affaire à des minéraux à espace interfoliaire anhydre et présentant des espacements constants, voisins de l'épaisseur du feuillet ($\sim 10\text{Å}$).

Dans le cas des phyllosilicates expansibles, les cations compensateurs sont hydratés et la présence d'un film d'eau entre les feuillets concourt à leur écartement. La propriété essentielle de ces minéraux est de se disperser au contact de l'eau pour former des suspensions plus ou moins stables. Les cations interfoliaires sont en général échangeables par des cations organiques ou minéraux, se trouvant dans des solutions mises au contact du phyllosilicate.

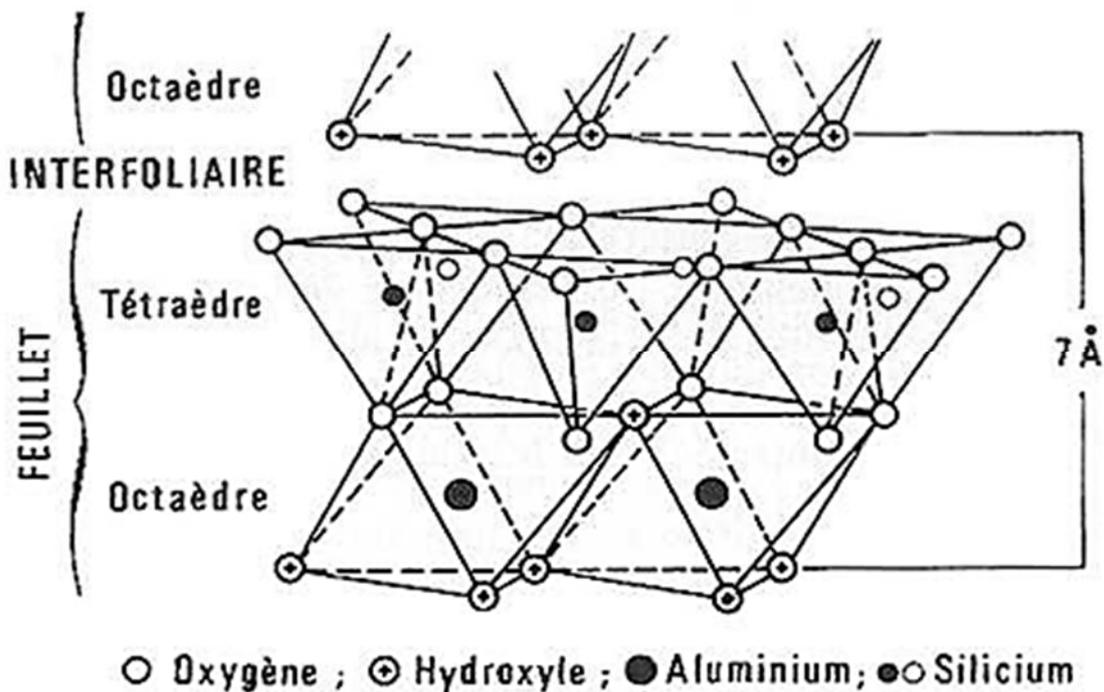


Figure I. 17 : Feuillet et espace interfoliaire d'une kaolinite

Les phyllosilicates sont caractérisés par leur aptitude à échanger des cations. Cette possibilité d'échange de cations est appelée « Capacité d'Echange Cationique » et est notée CEC. On définit la Capacité d'Echange Cationique comme la capacité d'un constituant solide à adsorber des cations dissous et à en libérer une quantité équivalente dans le milieu [27]. Autrement dit, la CEC est le nombre de cations monovalents (équivalents chimiques) qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour combler la charge électrique de 100g de minéral calciné.

Dans les argiles, il y a deux causes principales d'existence d'une capacité d'échange cationique, l'une interne et l'autre externe :

✚ La présence de substitutions isomorphiques (CEC interne) : La plus fréquente est la substitution de Al^{3+} par Mg^{2+} dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile [28,29], la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles. Des substitutions de Si par Al dans la couche tétraédrique sont également possibles ;

✚ Les phénomènes de bordure (CEC externe): aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour compenser ces valences, des molécules d'eau s'hydrolysent et il y a apparition de groupes silanol (-Si-OH) ou aluminol (-Al-OH) qui, en fonction du pH, peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés avec d'autres cations. Le nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront directement liés au pH.

La capacité d'échange cationique a un rôle important qui évolue avec la densité de sites d'échange, comme dans le cas de la vermiculite. Le

Minéral	C.E.C (meq/100g)
vermiculite	100 – 150
Smectite	80 – 150
chlorite	10 – 40
Illite	10 – 40
Kaolinite	5 – 15

Tableau I. 5 suivant donne la CEC de quelques minéraux argileux connus.

Minéral	C.E.C (meq/100g)
vermiculite	100 – 150
Smectite	80 – 150
chlorite	10 – 40
Illite	10 – 40
Kaolinite	5 – 15

Tableau I. 5 : Surface spécifique de quelques minéraux [30]

3. Les propriétés du matériau terre en construction

Les propriétés physicochimiques, minéralogiques et géotechniques diffèrent d'une terre à une autre. Ces propriétés dépendent de la nature et du mélange complexe des fractions granulaires qui composent la terre. C'est souvent la fraction granulaire dominante d'une terre qui définit ses propriétés fondamentales et régit son comportement.

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles que la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction [2, 7].

On observera cependant que la connaissance exhaustive des propriétés chimiques et physiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient en effet de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont [4]:

- ✚ la texture ou granularité;
- ✚ la plasticité;
- ✚ la compressibilité;

✚ la cohésion.

3.1. Texture ou Granularité

La granularité se mesure par analyse granulométrique par tamisage pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, limons) et par analyse sédimentométrique pour les fractions argileuses. Les éléments tels que les graviers et les sables sont le squelette du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles gouvernent le retrait et le gonflement

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques (cf. Figure I. 18). Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations se situe entre 10% et 22% pour les BTC et entre 10 % à 15 % pour le pisé. Cependant, la teneur en limon est entre 10% à 25% pour le BTC [31]. Doat et al (1979) [5] démontrent qu'une fraction trop importante en silt provoque, après séchage des BTC, un retrait trop important ; et qu'une fraction trop importante d'éléments de taille plus grande diminue les performances des BTC à cause du manque d'argile et de cohésion. Guettala et al. (1997) [32] montrent qu'il est nécessaire de bien fragmenter le sol cohésif car il existe une taille critique pour les mottes de sols argileux. Au-delà d'une taille de 5 mm, ces mottes d'argiles diminuent les résistances mécaniques du sol traité.

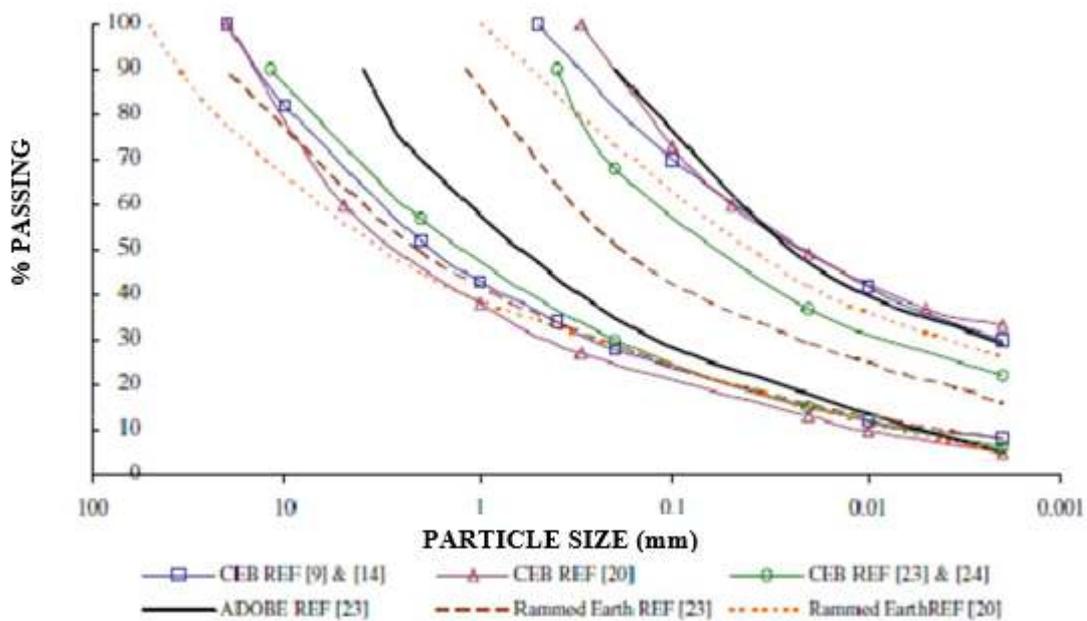


Figure I. 18 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre. [30]

3.2. La plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre

ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité LP, l'indice de plasticité IP). Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols [33]. La Figure I. 19 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé. En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16 à 28% et une limite de liquidité (LL) entre 32 à 46% [30].

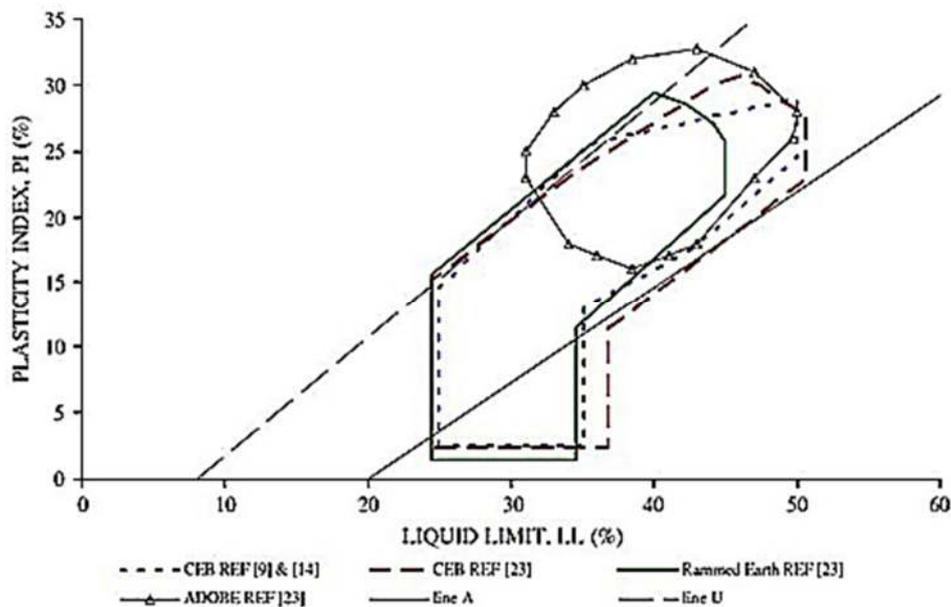


Figure I. 19 : Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [30]

3.3. La compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et le volume des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera faible et moins l'eau pourra y pénétrer. Cette propriété résulte de deux phénomènes : rapprochement des particules et diminution de la tortuosité des vides. La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur réarrangement afin d'occuper le moins d'espace possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car lors du compactage le volume des vides diminue entraînant l'expulsion de l'air et une augmentation du degré de saturation. Les vides remplis d'eau sont alors difficilement compressibles. L'essai Proctor, qui est celui le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté, est beaucoup plus adapté aux sols pulvérulents.

3.4. La cohésion

La cohésion d'une terre désigne sa capacité à résister à l'action d'une contrainte de cisaillement. Elle dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $\Phi < 2$ mm) qui lient les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité des phases collantes. Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante [4]:

- ✚ Mortier Sableux,
- ✚ Mortier Maigre,
- ✚ Mortier Moyen,
- ✚ Mortier Gras,
- ✚ Argiles.

3.5. La matière organique

En géotechnique, le terme matière organique du sol désigne l'ensemble des constituants organiques inertes ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Dans le domaine de la céramique et plus particulièrement dans le secteur de la briqueterie, les substances organiques affectent beaucoup les processus de stabilisation et de cuisson et, par-là, la qualité des produits finis. Selon Houben et Guillaud (2006) la matière organique supérieure à 1% dans le sol représente un danger potentiel. Vénuat (1980) [34] a proposé un seuil de 2% de matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol.

4. Stabilisation des sols

La stabilisation des sols regroupe l'ensemble des techniques permettant d'améliorer les caractéristiques physicochimiques, mécaniques et hydriques des sols. Elle doit permettre :

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

On distingue trois principales techniques de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

4.1. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est pratiquée lorsqu'on procède à la densification d'un sol par compactage. Elle a pour effet la diminution de la porosité de la terre. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mis au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne

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

4.1.1. Mode de compactage

On distingue essentiellement quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre [35]. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de l'ordre de 50 % par rapport à la vibro-compression et d'environ 20 % par rapport à la compression statique [36].

4.1.2. Contrainte de compactage

Quels que soient le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale (TEO), et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la Figure I. 20 [37, 38, 39]. Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi, à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués [4, 34].

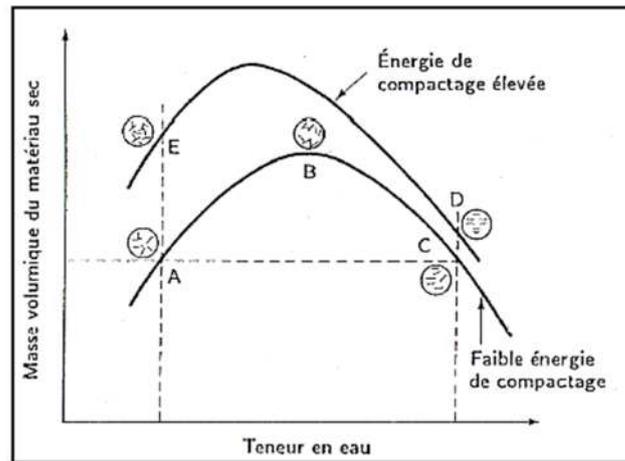


Figure I. 20 : Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la structure du sol [36]

Guettala et al. (2002) [40] ont montré dans leurs travaux sur les blocs de terre stabilisés que les résistances mécaniques augmentent en fonction de la contrainte de compactage jusqu'à un optimum de 17.5 MPa au-delà duquel il y a une chute de résistance mécanique (Figure I. 21).

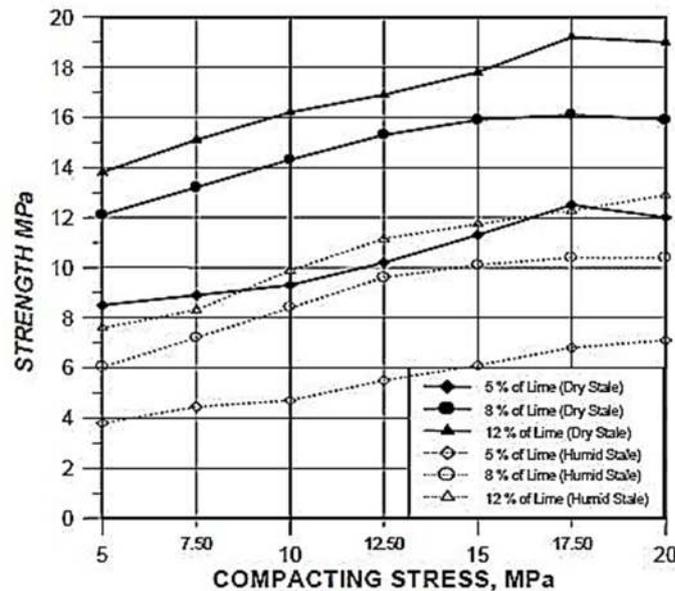


Figure I. 21 : Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques) [39]

4.1.3. Influence de la teneur en eau sur la densité

La densité d'un bloc de terre comprimée dépend de plusieurs paramètres physiques : la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. On relève que les propriétés de la terre comprimée sont plus influencées par la teneur en eau que par tout autre paramètre [32]. Presque tous les sols présentent une relation similaire entre la teneur en eau et la densité sèche lorsqu'ils sont

compactés Figure I. 22) [38]. La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice de vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale. Un sol « trop sec » sera le siège de frottements importants entre les grains de sol. Un sol trop humide, par contre, sera moins susceptible d'être compacté car une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol.

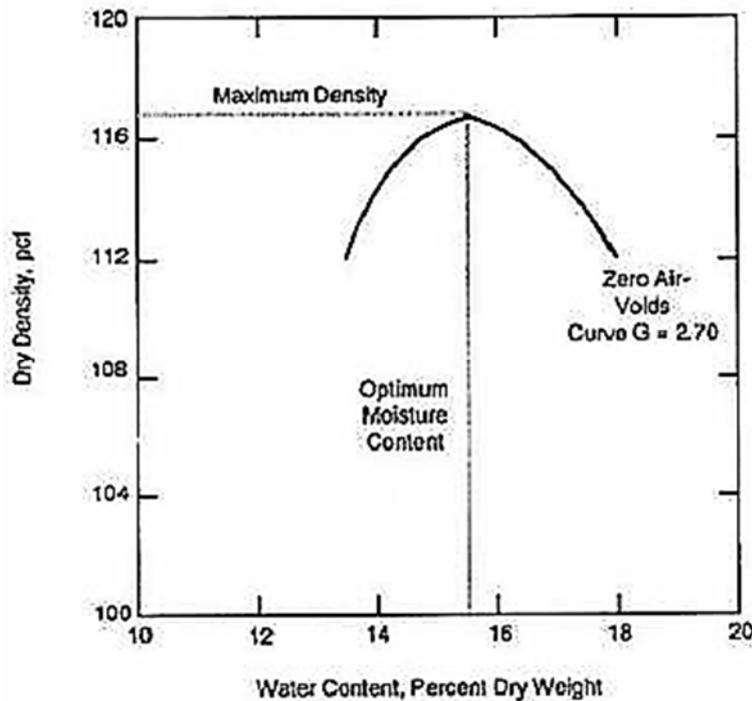


Figure I. 22 : Relation typique entre la teneur en eau- densité [38].

Dans le cas de la formulation des BTC, la détermination de la teneur en eau optimale (TEO) est faite en laboratoire. En géotechnique routière, la recherche de la TEO est obtenue à l'aide de l'essai de Proctor, qui procède par compactage. Cet essai n'est pas conseillé pour les sols argileux, car il entraîne une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en terme de densité [41]

Mesbah et *al.* (1999) [42], ont montré qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. En conséquence, l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des briques compressées. En effet, d'autre part, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il a été démontré qu'il n'existe pas de relation entre l'« énergie Proctor » et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs [43]. Il est préférable de procéder comme sur chantier, c'est-à-dire rechercher la teneur en eau optimale avec la presse à bloc directement [44].

4.2. Stabilisation physique

On distingue deux manières de procéder à une stabilisation physique:

- Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.

- Ajout de fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

Izemmouren et Guettala (2014) [45], ont étudié l'influence du taux de sable sur la durabilité des briques de terre comprimée. Deux types de sables concassés ont été utilisés pour la stabilisation par correction de la granulométrie du sol. Les résultats ont montré que les résistances mécaniques à l'état sec et humide augmentent en fonction du taux de sable. Cependant, la teneur en sable n'a pas un effet significatif sur l'absorption totale (Figure I. 23)

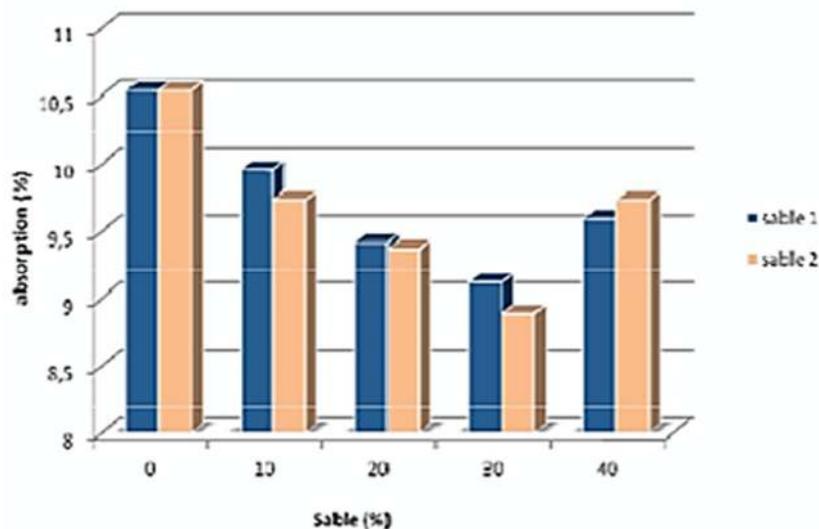


Figure I. 23 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable. [34]

4.3. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété.

4.3.1. Stabilisation au ciment

Dès 1915 déjà les U.S.A ont connu les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-

ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment [4, 6, 7].

Le ciment fait partie des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %) [4].

Venuat (1980) [33], après avoir étudié l'utilisation de toutes les classes de ciment dans la stabilisation, affirme que tous les ciments normalisés conviennent pour la stabilisation des sols, mais qu'il est préférable d'utiliser les ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Alors que d'autres auteurs [5] suggèrent l'utilisation d'un type de ciment selon la nature du sol.

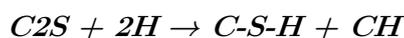
Pour un sol contenant un pourcentage d'argile élevé, il faut un ciment riche en alite C_3S et bélite C_2S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, $Ca(OH)_2$. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % ($I_p < 25\%$) [46].

NB : Nous utiliserons tout au long de ce document la nomenclature en usage dans le domaine des ciments avec : C : CaO ; S : SiO_2 ; A: Al_2O_3 et H: H_2O

4.3.1.1. Mécanisme de stabilisation au ciment

La poudre de ciment contient plusieurs phases différentes. Les phases principales sont: l'alite (C_3S), la bélite (C_2S), l'aluminate tricalcique (C_3A), l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) et la périclase (MgO). Des phases mineures sont également trouvées : la chaux libre (CaO), les sulfates de sodium et de potassium (Na_2SO_4 et K_2SO_4) [47]. Suivant les proportions de ces éléments, les ciments présenteront des propriétés différentes. Par exemple, une forte teneur de C_3S donnera une résistance élevée, par contre un ciment à forte teneur en C_3A aura une faible résistance à l'action des eaux agressives.

Une fois que le mélange avec le sol est fait, le ciment va se dissoudre et s'hydrater 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 ($C-S-H$: $3CaO.2SiO_2.3H_2O$).



Equation I. 1



Equation I. 2

L'hydratation des aluminates tricalciques (C_3A) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



En l'absence de gypse, les C_3A réagissent avec l'eau pour donner C_4AH_{13} , C_2AH_8 , et C_3AH_6 . Les composés C_4AH_{13} et C_2AH_8 sont instables. Sous l'action de la chaleur d'hydratation, ils se transforment en C_4AH_8 . La phase ferrite (C_4AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



4.3.1.2. Efficacité du traitement

Ben Amor [48] dans ses travaux sur la stabilisation des argiles par un liant hydraulique, a montré que 100g de kaolinite (100 g) fixent environ 0,3 g de Ca^{2+} et la même quantité de smectite fixe entre 0,5 et 0,6 g de Ca^{2+} . Ces quantités de Ca^{2+} ne sont alors plus disponibles pour la prise du ciment. La quantité de Ca^{2+} libérée par 100 g de ciment (CPA 55) est d'environ 1,2 g pendant les 6 premiers jours puis diminue à environ 0,7 g pendant les 6 jours suivants. Ces différentes valeurs de libération et de fixation de Ca^{2+} , pour un traitement à 40 % de ciment et une cure de 90 jours, montrent que la smectite consomme la totalité des ions calcium libérés par le ciment alors que la kaolinite en fixe seulement les deux tiers. La consommation de Ca^{2+} par la smectite a un effet bénéfique pour la dissolution de ciment mais par contre, elle empêche sa prise.

La kaolinite, en tant qu'argile non gonflante, favorise mieux la stabilisation des sols qui la contient car elle ne fixe pas la totalité des ions Ca^{2+} libérés lors de l'hydratation. L'inefficacité de la stabilisation des sols smectitiques au ciment est attribuée :

- ✚ Au caractère gonflant des smectites ;
- ✚ A l'affinité des argiles avec l'eau, qui empêche la cristallisation des hydrates du ciment.

Ben Amor [47] explique que l'ion Ca^{2+} en solution saturée s'oppose à la dissolution du ciment. Guettala [49] a montré dans ses travaux que les sols argileux dont le passant à 2 μm est compris entre 20% et 50% ne permettent pas d'obtenir l'insensibilité à l'eau des BTC. Quel que soit le dosage en ciment (de 3% à 15% de CPA), la résistance à la compression simple après une immersion de 1 j (précédée d'une cure dans une atmosphère humide d'une durée de 27 j) est quasiment nulle alors que les sols composés seulement d'illite ou d'un mélange kaolinite/illite conservent des résistances mécaniques importantes :

- ✚ 0,2 à 0,4 MPa avec 3% de ciment
- ✚ 1 MPa est dépassé pour 10% de ciment dans le cas du mélange kaolinite/illite.

Le Roux [50] propose un classement : kaolinite > illite > smectite en ce qui concerne l'aptitude à la stabilisation par le ciment.

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des

limons et des argiles [4]. Ceci confirme les résultats obtenus par Walker (1997) [51] qui indiquent que la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment diminue avec l'augmentation de la teneur en minéraux argileux (Figure I. 24)

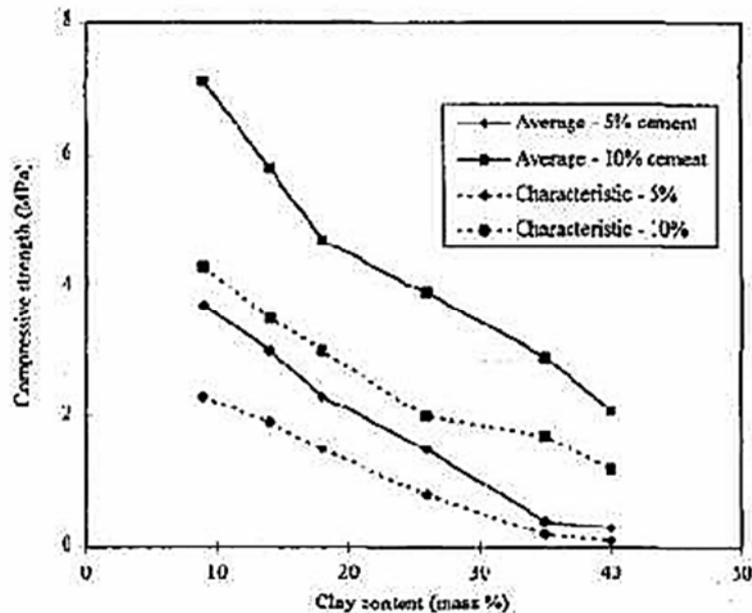


Figure I. 24 : Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression du bloc de terre comprimée stabilisée au ciment [50].

La résistance en compression reste très dépendante du dosage, 8% de ciment constitue souvent une limite supérieure économiquement acceptable [5]. Gooding (1993) [52] stipule que le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12% en masse de ciment est la formulation la plus courante. Heathcote (1994)[53], montre que la teneur minimale au-dessous de laquelle la résistance est indépendante de la quantité de ciment employée est de 0,75%. Ceci n'est pas en accord avec les résultats d'autres chercheurs qui stipulent qu'une valeur comprise entre 5 et 12% est mieux adaptée. Par exemple, Walker (1995) [54] indique que les blocs contenant moins de 5% de ciment sont souvent trop friables pour être manipulés. Plus tard, Walker (1996) [55] reconnaît que la teneur en argile du sol doit être comprise entre 5 et 20%, la teneur en ciment entre 4 et 10% et l'indice de plasticité du sol entre 2,5 et 30%.

4.3.2. Stabilisation à la chaux

La stabilisation d'un sol aux liants hydrauliques conduit généralement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol traité. Dans le cas du traitement à la chaux, la réaction pouzzolanique permet l'obtention de caractéristiques mécaniques intéressantes. Abdo [56], Perret [57] et Locat [58] ont montré que ces caractéristiques augmentent graduellement sur la durée de l'étude (un an).

L'ajout de la chaux entraîne en quelques minutes la floculation des argiles, ce qui améliore la consistance et se traduit par une augmentation de la limite de plasticité accompagnée ou

non d'une augmentation de la limite de liquidité. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. Ces modifications du comportement rhéologique des sols entraînent l'amélioration des propriétés d'usage des argiles traitées.

4.3.2.1. Mécanisme de stabilisation à la chaux

La chaux agit sur le sol traité selon trois mécanismes [59]. La chaux permet :

✚ **la saturation de la capacité d'échange cationique.** La capacité d'échange cationique des argiles correspond aux échanges :

- des *cations inter-foliaires*. Ces échanges concernent plus particulièrement les argiles TOT (smectite, vermiculite ...). La substitution des cations inter-foliaires est d'autant plus facile qu'ils ont une charge plus faible et sont de petite taille. Ainsi, on peut classer les cations par ordre croissant de potentiel de remplacement : $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$

Dans le cas des smectites, l'effet immédiat de la substitution du sodium par du calcium est la réduction du potentiel expansif.

- *des cations de bordure*. Sur les bordures d'un cristal, les charges ne sont plus équilibrées. Il apparaît alors des fonctions Si-OH et Al-OH. Ces fonctions sont déstabilisées en milieu basique et constituent alors une source supplémentaire de sites de fixation pour l'ion calcium. La présence de matières organiques contribue à augmenter la capacité de fixation du calcium

✚ **la floculation/agglomération.** Les charges négatives portées en surface des particules d'argile sont à l'origine de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement de la double couche d'eau entourant les argiles (eau libre et eau liée). L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue. De plus, il y a formation de ponts de calcium entre les particules d'argiles. Les floccs ainsi formés sont insensibles au lavage. La floculation améliore la consistance des argiles (limite de plasticité).

✚ **la liaison des particules argileuses.** En milieu basique et saturé en ion calcium, les argiles sont attaquées. Elles libèrent de l'alumine et de la silice qui réagissent avec le calcium pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments. Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol.



Les C-S-H* formés à partir de la kaolinite correspondent à des hydrates de type mono calcique et dicalcique [60]. D'autres auteurs utilisent les termes de C-S-H (I) et C-S-H (II) correspondant à des températures de déshydratation différentes.

Les C-A-H* formés à partir des smectites sont des aluminates tri et tétracalciques. Pour la kaolinite, l'aluminate calcique formé est tricalcique [59]. Un dernier composé se formant au cours de la réaction pouzzolanique est signalé, il s'agit de C-S-A-H [61].

La réaction de la chaux sur les argiles permet donc la consommation des argiles et la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. Un test basé sur la mesure du pH permet d'évaluer la teneur en chaux nécessaire pour que ces réactions puissent survenir. Le

seuil de pH est fixé à 12,4. La quantité de chaux permettant d'obtenir cette valeur de pH est connue sous le nom de « lime fixation point » [62,63]. Cette observation a été faite aussi par Derriche [64] sur des smectites : l'addition de 8% de chaux permet d'acquérir une résistance mécanique importante de 9 MPa, elle ne serait que de 1 MPa avec 4% de chaux (rupture à 45 j). Cette différence de résistance mécanique se traduit par une nouvelle minéralogie, à savoir l'apparition de C-S-H. L'augmentation des caractéristiques mécaniques résultant de la formation de ces hydrates est progressive. Ainsi, après 28 jours de cure, seulement 1/3 des valeurs de propriétés mécaniques escomptables à 1 an sont déjà acquises [65].

Une quatrième réaction peut avoir lieu avec la chaux. Il s'agit de la formation de calcite au contact de CO₂. Dans le cas du traitement des sols argileux, les cristaux de calcite ainsi formés ont une propriété liante très médiocre et perturbent la stabilisation car leur développement inhibe la réaction pouzzolanique. Cette carbonatation est par contre recherchée lors de la stabilisation de matériaux calcaires tels que la craie. Les cristaux de calcite obturent alors la porosité de ces matériaux. Ils peuvent ainsi former une sorte de ciment.

La nature des hydrates formés au cours de la réaction pouzzolanique dépend de la nature des argiles présentes dans le sol.

4.3.2.2. Efficacité du traitement

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. Le gain en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la taille des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement [66, 67, 68].

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2% à 3% de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et une destruction des mottes. D'une manière générale les dosages de 6 à 12% en chaux sont utilisés pour la stabilisation des sols. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre [4].

Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile sur un BTC traité à la chaux, Toubeau [69] a suivi l'évolution des réactions sol -chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude lui a permis de faire un classement des argiles, du plus favorable au moins favorable : kaolinite, > illite, > smectite.

Akpokodje (1985) [70] a étudié la stabilisation des sols des zones arides d'Australie (des loam) en utilisant de la chaux. Le loam est une classe texturale de terre parfois utilisée pour fabriquer du torchis et plus généralement il est à la base des constructions en terre crue. Cet auteur a employé dans cette étude un loam sableux (59% de sable, 28% de limon, 13% d'argile), un loam limoneux (15%, 75%, 10%), et un loam argileux (36%, 27%, 37%). Pour le loam argileux et le loam sableux, une teneur en chaux de 2% a donné une résistance à la compression à 7 jours d'environ 0,7 MPa, mais en portant la teneur à 4%, la résistance à la compression obtenue est de l'ordre de 1,2 à 1,3 MPa (Figure I. 25). Cependant, des teneurs en

chaux au-delà de 12% n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance des échantillons. Des résultats similaires sont obtenus par Millogo (2008) [16] (Figure I. 26). D'après Ausroads (1998) [71], des teneurs élevées en chaux ne donnent pas nécessairement des résistances élevées. La Figure I. 27 montre la variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps. Il indique que le gain de résistance précoce (résistance à 7 jours) est faible, alors qu'après 28 jours il est significatif.

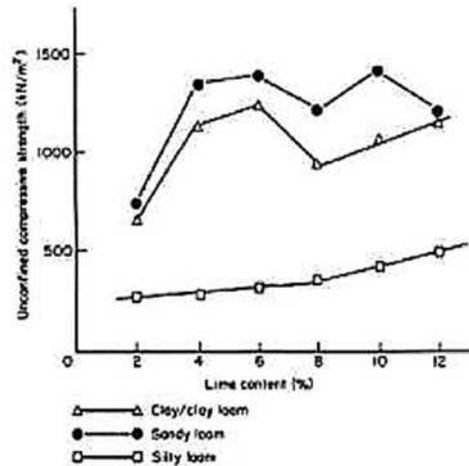


Figure I. 25 : Variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux pour 3 types de sols en zone aride australienne [69]

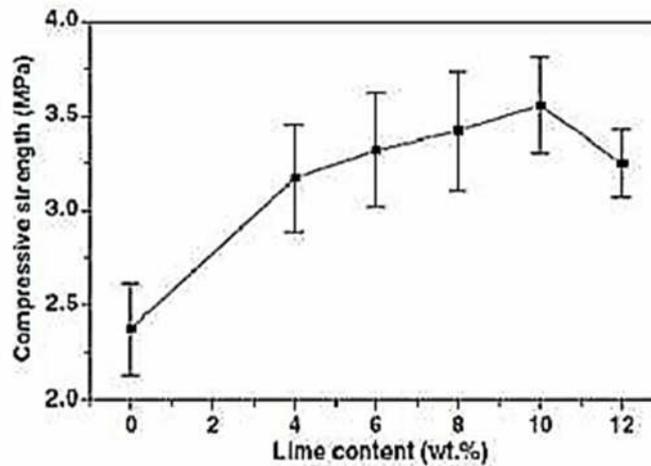


Figure I. 26 : Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux [16]

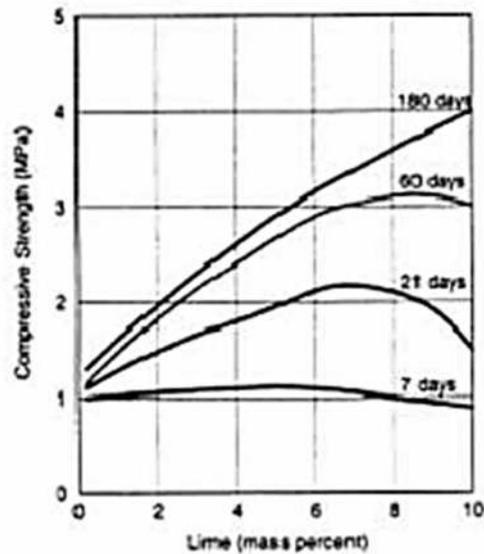


Figure I. 27 : La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge [70].

5. Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H), qui sont à l'origine des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique.

5.1. Laitier de haut fourneau

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de l'élaboration de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. On peut obtenir deux types de laitier de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent
- Le laitier vitrifié (granulé) obtenu par refroidissement rapide, par trempe.

L'origine des deux types de laitier est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leurs cristallographie et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation. Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente. Au contraire, le laitier cristallisé à une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste [72].

5.1.1. Production du laitier granulé

La matière première du laitier moulu est un matériau secondaire issu de la fabrication de la fonte. Le minerai de fer (constitué essentiellement de silice, d'oxyde de fer et d'alumine) et le fondant (chaux CaO et dolomie MgO) sont portés à haute température (1400 à 1600°C) dans un haut-fourneau. La fonte est obtenue par cette opération de fusion. La gangue liquéfiée du minerai, de densité plus faible, vient en surface de la fonte en fusion et peut, de ce fait, être récupérée par écoulement séparé. A la sortie du haut-fourneau, cette gangue (le laitier de haut-fourneau) est soumise à un refroidissement brutal : la trempe, généralement effectuée à l'aide de jets d'eau sous forte pression. Sous l'effet de cet abaissement très rapide de la température, le laitier se solidifie et forme des « granules » de dimension comparable à celle d'un sable (moins de 5 mm) : le matériau obtenu, le laitier granulé de haut-fourneau, est vitreux et possède des propriétés hydrauliques latentes.

5.1.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95% à 97% des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre.

En ce qui concerne la minéralogie, le laitier est caractérisé par une phase amorphe très majoritaire, de l'ordre de 90%. Pour les 10% restant, on parle alors de germes de cristallisation. Ces germes minéralogiques sont essentiellement des silicates ou des silicoaluminates de chaux [71].

5.1.3. Réactivité hydraulique du laitier

La réactivité du laitier de haut fourneau dépend de plusieurs paramètres :

✚ La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie pour un dosage inférieur à 15%, mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse [73]. Les calculs d'indice de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$M_{b1} = \frac{(CaO+MgO)}{SiO_2} \quad ; \quad M_{b2} = \frac{CaO}{SiO_2} \quad ; \quad M_{b3} = \frac{(CaO+MgO)}{(SiO_2+Al_2O_3)} \quad \text{Equation I. 7}$$

D'après l'indice de basicité du laitier ($M_b > 1$), le laitier est basique. Selon Alexandre et al, (1998) [71], la basicité élevée est à priori favorable.

✚ La surface spécifique a un rôle prédominant sur la réactivité hydraulique du laitier. Plus la finesse du laitier est élevée, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. La minéralogie du laitier a un effet sur sa réactivité hydraulique par le taux de vitrification. En effet la détermination du taux de vitrification est très importante car sa

structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin. De ce fait, le laitier possède une énergie plus élevée qu'à l'état cristallin. L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides [72]. Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent.

5.1.4. Hydratation du laitier

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant [71]. Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier [72]. Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution - concentration - précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier voir (Figure I. 28). L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. Cette précipitation fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés [71, 74].



Figure I. 28 : Prise du laitier [71]

5.1.5. Activation du laitier

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfato-calcique (ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction

d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate. La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux, le ciment et les sulfates agissent comme des réactifs [75].

5.1.6. Utilisation

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granulé peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable. Il est à noter que très peu de chercheurs ont exploré l'utilisation du laitier de haut fourneau comme ajout minéral dans les BTC.

6. Les fibres

Depuis l'Antiquité, l'homme a élaboré des matériaux composites par combinaison de matières de natures différentes dans le but d'obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques. De nombreux matériaux naturels lui ont fourni des modèles, tel que l'os rigide mais léger, formé de fibres de collagène dans une matrice minérale d'apatite dure et fragile, ou le bois, souple mais résistant formée d'un réseau de microfibrilles de cellulose cimentée dans une matrice d'hémicelluloses, de pectines et lignine [76, 77].

La famille des matériaux composites à fibres, apparue dans les années 1940 n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Leur bon rapport coût/performance leur a ouvert une très large gamme d'applications dans des domaines variés; l'industrie aérospatial, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration, etc. [78].

Toutefois, même si le développement des composites est qualifié de prometteur, cette progression est néanmoins jalonnée de quelques contraintes à surmonter dont par exemple celles liées à l'environnement, l'hygiène et la sécurité. La valorisation des matériaux composites classiques avec leur armature en fibres de verre, d'aramide, ou bien de carbone pose un grand problème à leur fin de vie. Pour y pallier les fibres naturelles sont de mise.

Elles sont issues de ressources renouvelables et elles sont biodégradables. Elles sont moins irritantes pour la peau et le système respiratoire des personnes qui les manipulent Par ailleurs les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres minérales [79, 80].

Le faible coût et les propriétés mécaniques spécifiques élevées (résistance et rigidité) des fibres végétales sont des avantages essentiels. Au contraire, leur propension à absorber de l'eau en grande quantité et leur faible tenue en température constituent les points faibles de l'utilisation de ces fibres végétales [81].

6.1. Les fibres végétales

6.1.1. Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses, de pectines et de lignine, en proportion relativement faible d'extractibles non

azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [82].

6.1.2. Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différentiation des fibres:

☛ Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (kénaf, jute, lin, ramie,...), et de feuilles (sisal, abaca, paille de graminée...) [75].

☛ Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides) provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [81].

☛ Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : (a) fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine (b) les fibres courtes ou étoupes sont associées aux fibres longues [75].

Les différents types de fibres naturelles sont présentés sur la Figure I. 29.

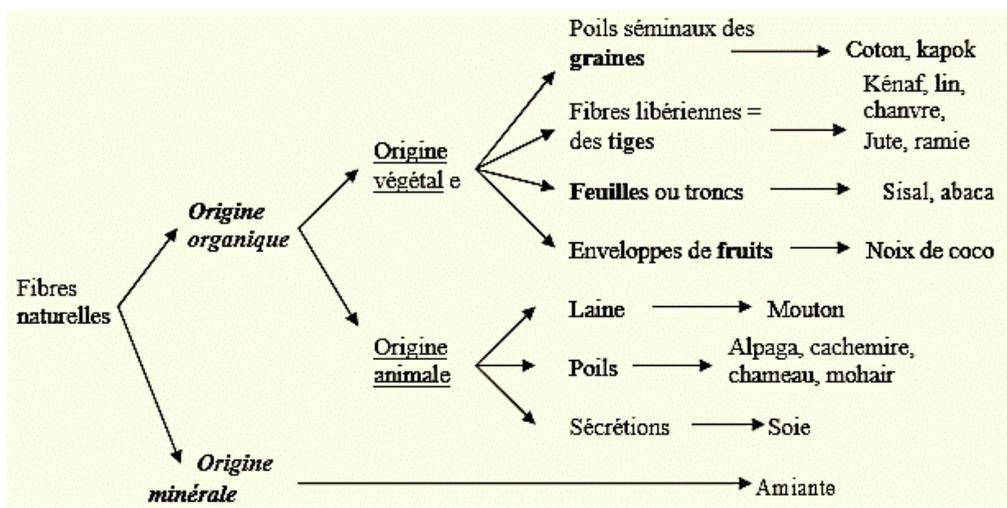


Figure I. 29 : Les différents types de fibres naturelles [83]

6.1.3 Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (Figure I. 30) [84]. La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire [85].

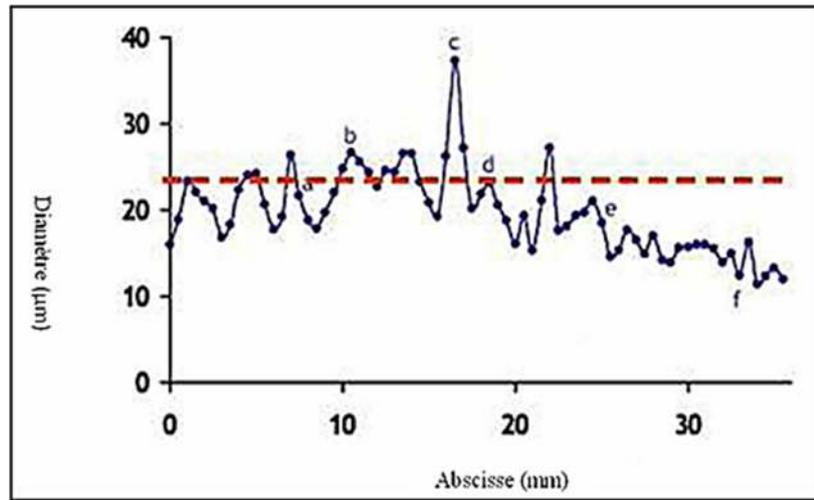


Figure I. 30 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin [83]

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

La Figure I. 31 présente, à titre d'exemple, la structure torsadée d'une fibre de coton. D'autres fibres ont des morphologies encore plus tourmentées. La morphologie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcés par de telles fibres [80]

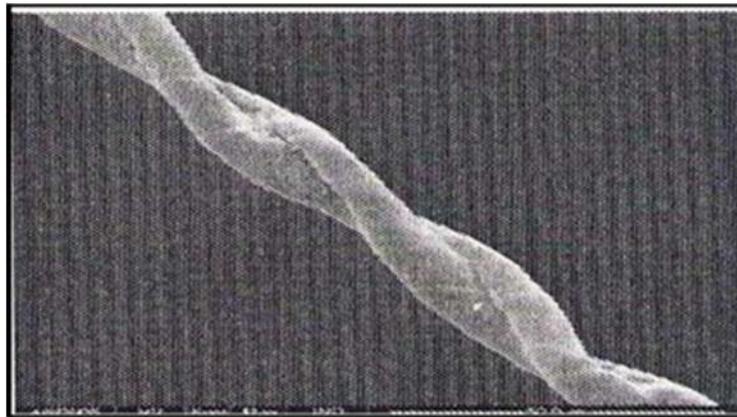


Figure I. 31 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [80].

6.1.4. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrilles cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicelluloses et pectines) qui est associée par des liaisons hydrogène et covalentes à la lignine [86].

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposées en couches superposées dans le sens radial. Ce sont ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois sous-couches de microfibrilles (S1, S2, S3) (Figure I. 32).

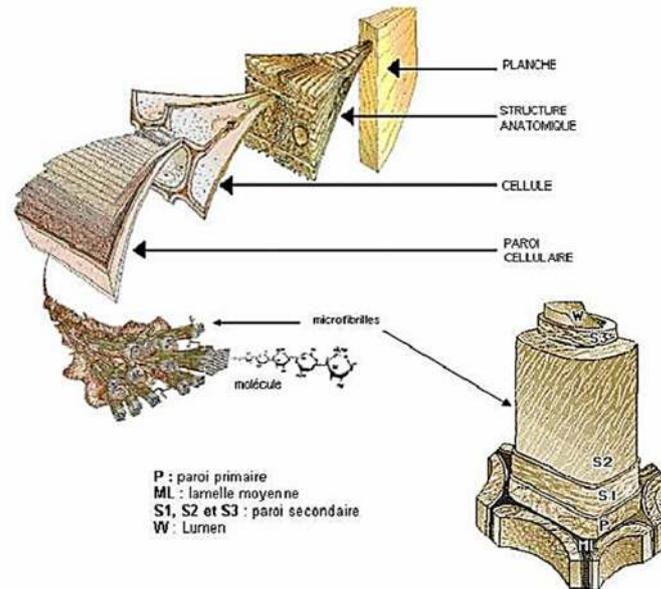


Figure I. 32 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington (Harrington ,1998)[76]).

Les microfibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre un angle micro-fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus l'angle des microfibrilles augmente, plus le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente [76].

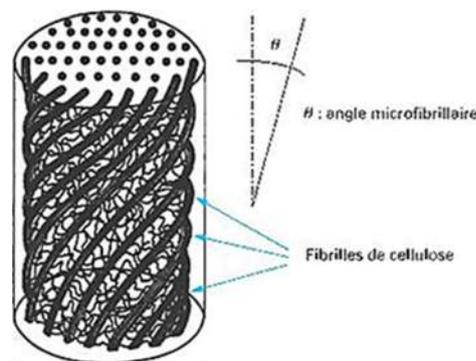


Figure I. 33 : Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale [82]

6.1.5. Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment les composées majoritaires sont la cellulose, les hémicelluloses les pectines et la lignine. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe.

Dans le bois, la cellulose est concentrée à l'intérieur de la fibre (Figure I. 34). Les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignine et d'hémicelluloses et les lamelles de jonction inter fibres sont composées presque uniquement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines (polymères de polysaccharides acides) augmente la complexité de la

matrice. Le réseau polysaccharidique peut également être solidifié par un réseau secondaire de protéines HRGP (Hydroxyproline Rich Glyco Proteins).

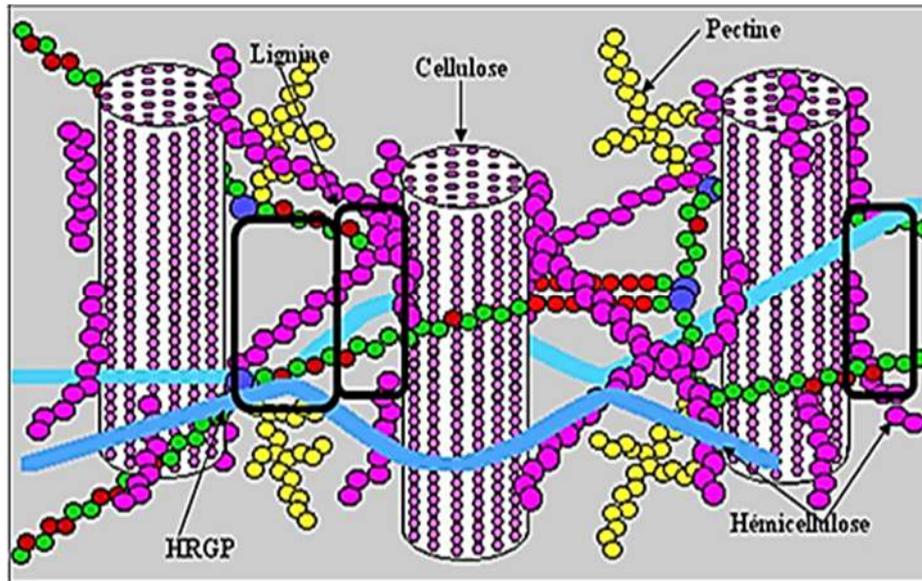


Figure I. 34 : Représentation schématique d'une fibre de bois [87].

6.1.5.1. Cellulose

La cellulose est un polymère qui existe à l'état naturel et qui est particulièrement important puisqu'il est le constituant principal de la masse végétale. L'extraction de la cellulose de coproduits agricoles et forestiers a déjà fait l'objet d'un grand nombre d'études [87]. Cette extraction est préférentiellement appelée « enrichissement en cellulose » car la matière obtenue est enrichie en cellulose plutôt que d'être constituée de cellulose pure. Présente à l'état presque pur (> 90%) dans la fibre de coton, elle est aussi, avec la lignine, l'un des constituants essentiels du bois.

D'un point de vue chimique, la cellulose est une molécule formée de longues chaînes dont le motif de base est le glucose (Figure I. 35). Les molécules cycliques de glucose adoptent la conformation « chaise », qui est plus stable que la conformation « bateau ». La cellulose I (ou cellulose "native") correspond à la cellulose existant à l'état naturel. Sa masse molaire est de l'ordre de $1,5$ à $2,0 \cdot 10^6$ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; les traitements qu'elle subit pour son extraction réduisent sensiblement cette valeur [88].

Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Malgré la présence multiple de groupements fonctionnels hautement réactifs que sont les hydroxyles, la cellulose réagit difficilement. Les interactions moléculaires inter caténares sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs car la rupture de ces interactions est le préalable à toute réaction. La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile, propriété qui est à l'origine, pour les fibres exploitées, de leur grand confort en tant que fibres textiles. Dans les conditions normales d'utilisation, elle peut contenir jusqu'à 70% d'eau plus ou moins liée. Le

remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogène entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques. Alors que la contrainte à la rupture des fibres de cellulose très cristalline peut atteindre 700 MPa à sec, elle peut perdre jusqu'à 30% de sa valeur en atmosphère humide. Toujours grâce à une grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. Comme tous les polymères qui contiennent de l'oxygène dans la chaîne principale, la cellulose est sensible à l'hydrolyse (fonction cétal ou acétal qui permet cette hydrolyse). En milieu acide par exemple, la coupure des chaînes est aléatoire et, à partir de la cellulose native ($DP \approx 10^4$), sont obtenus progressivement des espèces de degré de polymérisation inférieur puis des oses bien identifiés, jusqu'au glucose [89]. Selon Willtatter et Zechmeister (1913) la formule brute exacte de cette macromolécule est $(C_6H_{10}O_5)_n$. Elle est composée des unités de D-anhydrocopyranos reliées entre elle par des liaisons β 1-4. L'unité répétitive est le cellobiose (deux glucoses réunis). Ces unités élémentaires s'associent par paquet pour former les microfibrilles [90].

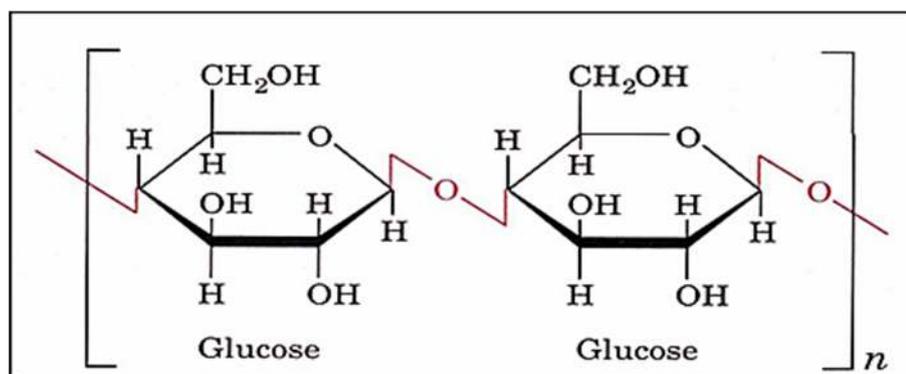


Figure I. 35 : Représentation de la chaîne de cellulose [91].

n : degré de polymérisation.

Le nombre de maillons D-glucopyranose (n), appelé degré de polymérisation (DP) n'est pas connu dans la cellulose native. De plus, il est toujours exprimé comme une moyenne puisque dans la plupart des échantillons, il y a une large distribution de masse moléculaire. Il diffère énormément selon l'origine de la cellulose, il est d'environ 26500 dans l'algue valonia 9000 dans le chanvre et dans le lin, et de l'ordre de 8000 pour l'épicéa [92]. La diffraction des rayons X par les monocristaux de la cellulose a permis d'établir que deux motifs β -D-glucopyranosyles adjacents ne sont pas dans le même plan moyen. Ceci est dû aux liaisons hydrogène intramoléculaire entre l'oxygène hétérocyclique et l'hydrogène du groupement hydroxyle fixé sur le carbone 3' (Figure I. 36). Ainsi la dimension de l'unité cellobiose est toujours de 10.3Å.

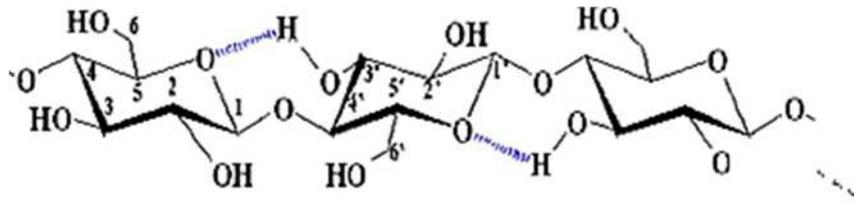


Figure I. 36 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculeaires

En raison du grand nombre de groupements hydroxyles sur la chaîne, il existe de multiples possibilités de liaisons hydrogène intermoléculaires. De plus il existe d'autres liaisons hydrogène mettant en jeu des molécules d'eau qui sont ainsi intimement liées à la cellulose. Toutes ces contraintes font de la cellulose une molécule fibrillaire et partiellement cristalline [90].

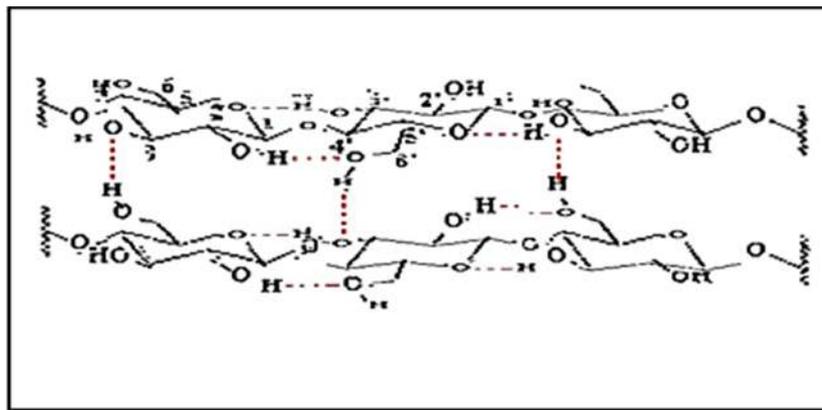


Figure I. 37 : Liaison hydrogène inter et intramoléculeaires au sein de la fibre de cellulose [90].

Cet arrangement moléculaire ordonné des chaînes cellulosiques parallèles entre elles est la base d'un édifice cristallin que l'on appelle microfibrilles. La hiérarchie de structure et l'organisation supramoléculaire de la cellulose sont schématisées dans (Figure I. 38) [88].

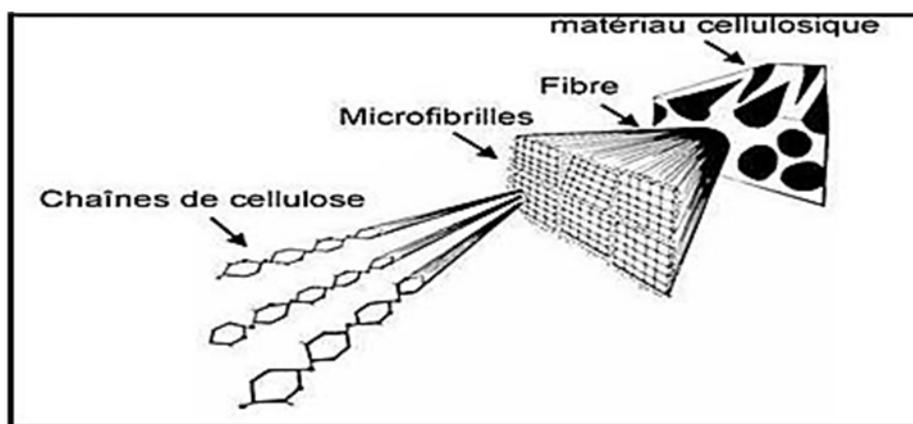


Figure I. 38 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique [88].

Dans la cellulose pure, la structure moléculaire est presque parfaitement régulière car elle ne contient de défauts que dans une unité sur mille environ. Le centre de ces microfibrilles est très cristallin tandis que les chaînes de surface sont de nature plus désordonnées et constituent des zones para cristallines. Ces zones, ainsi que les défauts de cristallinité qui surviennent lors de la biosynthèse de la cellulose forment la phase amorphe de la cellulose. Donc, les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines parfaitement ordonnées et de zones amorphes, au contraire, totalement désordonnées. (Figure I. 39) [89].

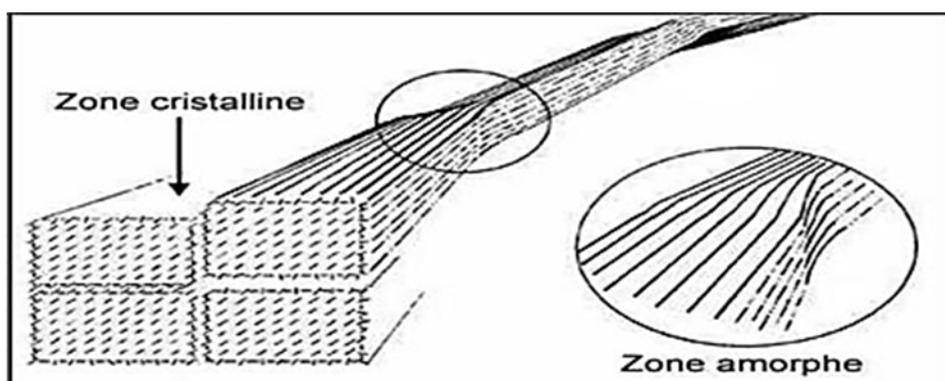


Figure I. 39 : Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille [88].

6.1.5.2. Hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tout polysaccharide soluble dans l'eau et pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions acides. Les hémicelluloses sont une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents). Elles sont donc assez mal définies. Dans leurs états naturels, leur structure est fonction de l'espèce végétale. Elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300. La Figure I. 40 montre les unités monosaccharidiques les plus représentatives des différentes familles d'hémicelluloses. Ce sont des polysaccharides dont la chaîne principale linéaire est constituée respectivement de xylose, de mannose et de galactose [93].

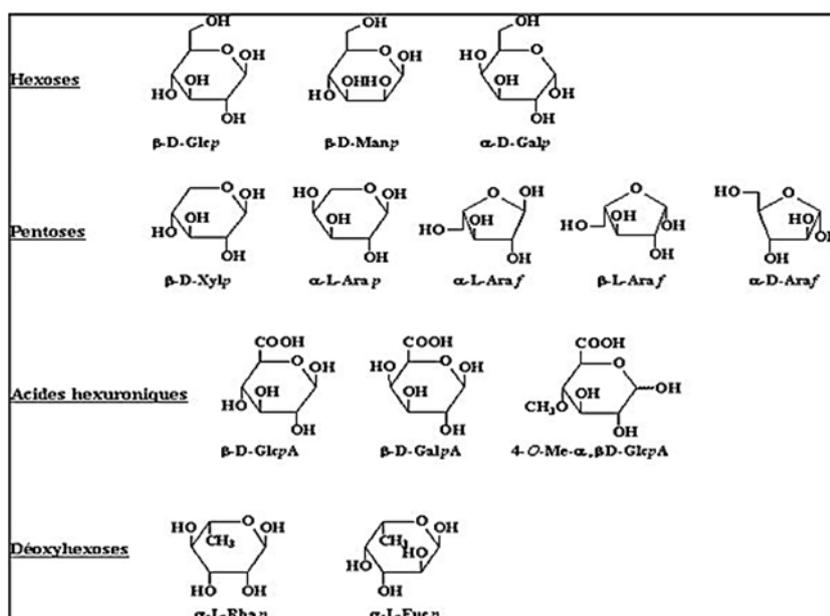


Figure I. 40 : Principaux glucides constituant les hémicelluloses [91].

Parmi les hémicelluloses les plus communes dans la paroi des cellules du bois, se trouvent les familles des xylanes, des mannanes et des galactanes. Ce sont des polysaccharides dont la chaîne principale est constituée respectivement de xylose, de mannose et de galactose. Ces chaînes peuvent être soit ramifiées par le greffage d'autres unités de sucres ou des groupements acétylés, soit entrecoupées par l'incorporation de sucres dans la chaîne linéaire.

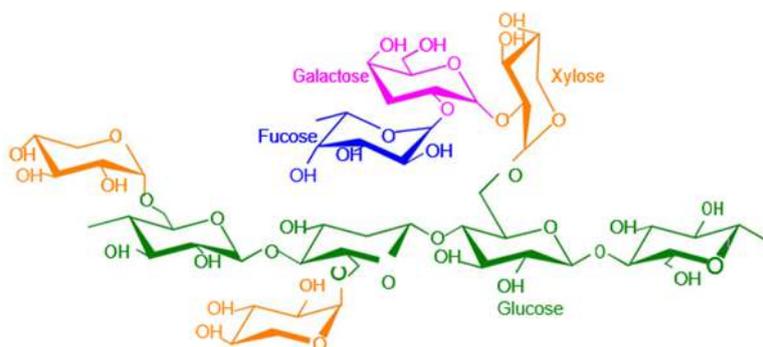


Figure I. 41 : Structure d'un type de xyloglucane

6.1.5.3. Pectines

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [94].

Sur le plan structural, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent un enchaînement d'unités d'acide α -D-galacturonique liées entre elles par des liaisons α (1-4), interrompu par la présence d'unités L-rhamnopyranose.

Les pectines portent aussi des substances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec le méthanol ou l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important sur les propriétés physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel [95].

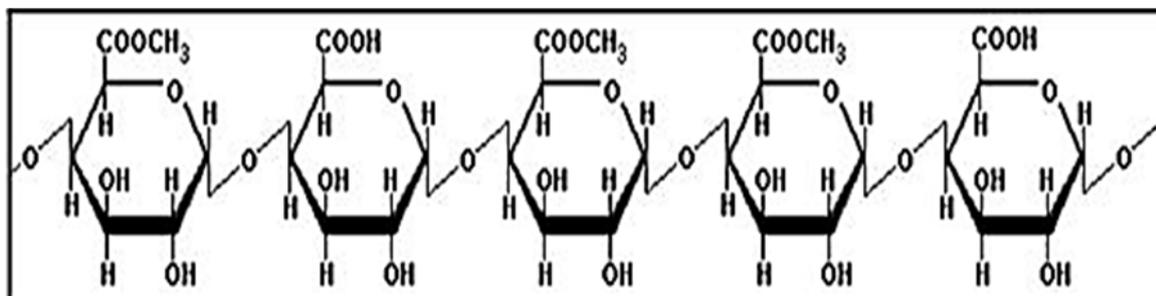


Figure I. 42 : structure de la pectine [93].

6.1.5.4. Lignine

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou "protolignine" constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière "incrustante" de la cellulose. La lignine est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique [96].

Parce qu'il est impossible d'isoler la lignine native du bois sans la dégrader, sa masse moléculaire reste encore inconnue. Nous pouvons trouver des masses moléculaires approximatives dont les valeurs moyennes sont de 5000 à 10000 g/mol pour les bois durs (des feuillus), et de 20000 g/mol pour les bois tendres (des Résineux). La Figure I. 43 présentes les motifs élémentaires de la lignine.

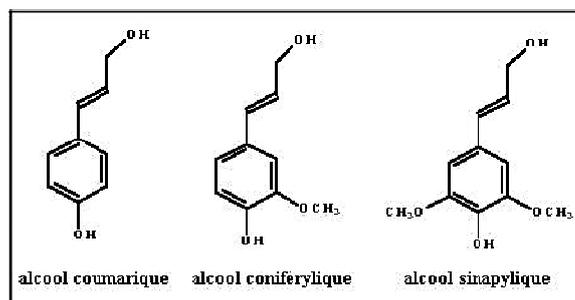


Figure I. 43 : Motifs élémentaires de la lignine [86].

La lignine est peu sensible à la dégradation biologique et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires [86].

6.1.5.5. Extractibles

Les substances extractibles sont des molécules de faible poids moléculaire se trouvant dans la structure poreuse du bois. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [97].

6.1.6. Propriétés mécaniques de la fibre végétale

Il est très difficile de présenter un tableau qui répertorie toutes les propriétés des fibres lignocellulosiques. La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques.

La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales (1,2 à 1,5 g/cm³) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de grande taille.

La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant un module d'élasticité relativement élevé (90-137 GPa), comparé à celui de la fibre de verre qui est de 75 GPa. Ainsi, un index de cristallinité de la cellulose d'une fibre élevé est indicateur de propriétés mécaniques élevées. Les fréquents défauts structuraux (Figure I. 44) observés de la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres.

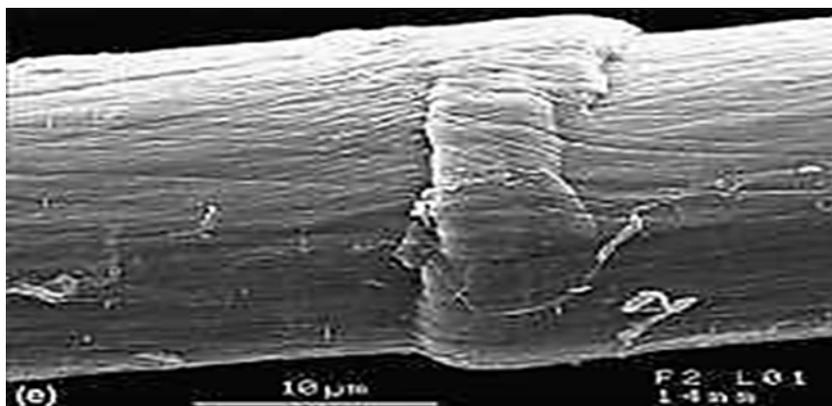


Figure I. 44 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [83].

L'angle microfibrillaire explique en partie la déformation élastique de la fibre végétale et dès lors son allongement à la rupture en traction. En effet, sous l'action de forces de traction relativement faibles, la fibre lignocellulosique subit une déformation réversible du fait de l'alignement progressif des microfibrilles cellulosiques avec l'axe de la fibre et une déformation élasto-viscoplastique des polymères amorphes [83].

Si la sollicitation de la fibre est plus forte, la déformation de celle-ci entre dans une phase irréversible qui peut se poursuivre jusqu'à la rupture. Un angle microfibrillaire élevé

suppose une déformation élastique plus importante pour une sollicitation de la fibre en traction faible [98].

Le Tableau I. 6 ci-dessous présente les propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec certaines fibres de renforcement conventionnelles.

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement (%)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (GPa)
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393-773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345-1035	27.6
Chanvre	–	1.6	690	–
Ramie	–	3.6-3.8	400-938	61.4-
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511-635	128 6.4-
Coco	1.2	30.0	175	22.0
Verre E	2.5	2.5	2000-3500	4.0-6.0
Verre S	2.5	2.8	4570	70.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000-3150	86.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	63.0-67.0

Tableau I. 6 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [85].

6.2. Le kénaf

Hibiscus Cannabinus L. communément dénommé kénaf, également connu sous une multitude de noms vernaculaires (deccan hemp, Guinea hemp, Java jute, chanvre de Bombay, teal, dah, gambo [99,100] et « Bouro » au Nord Bénin), est une plante de la famille des Malvaceae, du genre *Hibiscus*, de l'espèce *Hibiscus cannabinus*.

Il comporte plusieurs variétés et cultivars. C'est une plante pantropicale originaire du Soudan où elle a été domestiquée il y a 6000 ans comme plante à fibres, et introduite dans toutes les régions tropicales ou subtropicales, et un peu en Europe du sud-est [101]. C'est une plante herbacée annuelle dont la tige érigée, fine, cylindrique, et souvent épineuse chez les formes sauvages, a un diamètre de 1 à 2 cm et une taille de 1,5 à 3,5 m. Les feuilles, alternes et simples, font 10 à 15 cm de long, et une forme variable suivant leur position sur la tige : profondément lobées avec 3 à 7 lobes dans la partie inférieure, et peu profondément lobées ou pas lobées mais lancéolés dans la partie supérieure.

C'est une plante à enracinement pivotant dont les fleurs blanches, jaunes, ou pourpres suivant la variété sont axillaires (Figure I. 45), solitaires ou parfois groupées près de l'apex de

la plante, bisexuées, d'un diamètre de 7,5 à 10 cm. Le fruit est une capsule pubescente à bec court, ovoïde, de 2 cm de diamètre, contenant plusieurs graines réniformes à triangulaires. Suivant la variété, le cycle de développement du kénaf dure 4 à 5 mois. Les rendements moyens en tiges sèches du kénaf sont de 10 à 16 tonnes par hectare [102].



Figure I. 45 : Fleurs d'*Hibiscus Cannabinus* [75]

Le kénaf pousse naturellement dans les savanes herbeuses. Il est cultivé depuis le niveau de la mer jusqu'à une altitude de 2500 m, mais il ne supporte pas le froid. Il demande une pluviométrie modérée (500 à 625 mm d'eau réparties sur une période de 4-5 mois), des sols sablo-limoneux à pH neutre, bien drainés, riches en humus. Il est très sensible au manque d'eau, à la température, à la photopériode et aux nématodes.

Les travaux sur *H. cannabinus* réalisés par l'équipe de l'Unité de Recherche sur les Agroressources et la Santé Environnementale (URASE) de l'Ecole Supérieure d'Agronomie à l'Université de Lomé sous la direction du Professeur Komla Sanda ont permis d'identifier deux variétés de kénaf, dont l'une précoce (90 jours) avec une hauteur moyenne de 2,1 m, et l'autre tardive (150 jours) haute de 2,70 m [82]. Les rendements moyens de matière sèche de tige ont été de 12,4 et 17,57 tonnes.ha⁻¹ respectivement pour ces deux variétés. Le diamètre des tiges chez les deux variétés est compris entre 11 et 23 mm, inversement à la densité des plants sur le terrain. Les deux variétés ont montré une sensibilité élevée aux nématodes et aux champignons. La production mondiale de fibre de kénaf était estimée à 400 000 t/an en moyenne sur la période 1997-2001.

En Afrique et particulièrement au Bénin, la production de fibres de kénaf est très limitée et presque complètement consacrée à la production de cordages, c'est dans ce cadre qu'une usine de transformation des fibres de kénaf en sacs (communément appelé sac de jute) a été installée dans les années 75 au centre du pays mais à nos jours cette usine n'est plus fonctionnelle. Toutefois, une production industrielle est signalée au Nigeria et au Soudan [103].

Tous les organes du kénaf peuvent être valorisés à travers des usages très variés, comme source de légumes, d'huile, de tannins, de combustibles, de colorants, de fourrage et fumures, d'éthnomédicaments, etc [101].

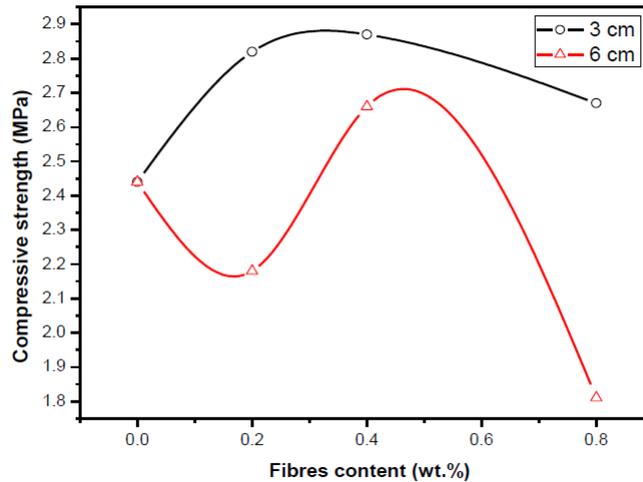


Figure I. 46 : Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres [102].

Dans le domaine des matériaux, le kénaf a été étudié ou exploité comme source de matière première pour la production de ficelles et cordage, de textiles bruts pour les sacs et toiles d'emballage, de litières, d'intissés industriels, de pâte à papier, de panneaux de particules ou de fibres, voire de matières plastiques composites [97]. Les fibres de kénaf produites au Burkina-Faso ont été utilisées par Millogo [104] dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques des briques d'adobes compressées.

La tige de kénaf est constituée à 35% de fibres longues ou filasses, principal constituant de l'écorce et à 65% de fibres courtes issues du bois ou «noyau». Cette présence de fibres longues, est à l'origine de l'exploitation traditionnelle du kénaf pour la production de ficelles et cordages, mais aussi de l'intérêt de cette plante pour la production papetière... Comme dans le cas du chanvre ou du lin, la présence de fibres longues ouvre de nouvelles perspectives de valorisation des fibres de kénaf.

6.2.1. Effet des fibres végétales sur les propriétés des blocs de terre crue

6.2.1.1. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques

Des études apparues depuis plusieurs années sur les BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction [105, 106, 107].

Millogo et *al.* (2014) [102], ont étudié la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres de kénaf produites au Burkina-Faso dans le cadre de la formulation des blocs d'adobes compressés. Ces blocs ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids dans deux longueurs (30 mm et 60 mm). Les résultats indiquent que la présence des fibres de kénaf améliore les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Le meilleur résultat a été obtenu avec l'utilisation de 30 mm de longueur de fibre (Figure I. 46), (Figure I. 47).

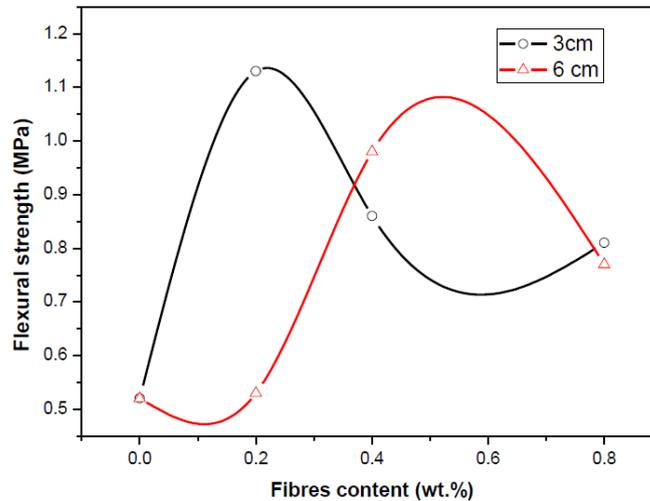


Figure I. 47 : Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres [102].

Ils ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques par la non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après ces auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile. Vergas et *al.* (1986)[108] ont constaté dans leur étude sur la résistance sismique de la maçonnerie, une augmentation de la résistance à la compression du BTC avec l'utilisation de 0.5-8,0% en poids de paille de longueur 100 mm. Ils ont justifié ce résultat par l'action de pontage des fissures créées dans le BTC par les fibres, ce qui limite la formation des microfissures produites par le retrait de séchage, et entrave leur propagation (la rupture brutale du BTC est ainsi évitée).

Stulz et Mukerji, dans leurs travaux sur les types de stabilisant physiques, citent la paille (blé, seigle, orge, etc) et les fibres végétales (sisal, chanvre, le coco et bagasse) comme une importante catégorie de stabilisants des BTC [109].

Sallehan et Yaacob ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier améliore la résistance à la compression des briques fibrées [110].

Dans ses travaux sur le développement de matériaux de construction en terre crue renforcée par les fibres les fibres de sisal, Namango a constaté que dans certaines limites, il y a une augmentation considérable de la résistance à la compression et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation du taux de fibres de sisal (Figure I. 48 et Figure I. 49) ou de poudre de manioc et de teneur en ciment, et qu'en dehors de ces valeurs limites, la présence des fibres de sisal a un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimée [111]. De son côté, Minke a constaté, que l'ajout de fibres telles que des poils d'animaux ou humains, coco, sisal, agave, le bambou et la paille peut aider à réduire le retrait, car la teneur en argile est réduite et une certaine quantité d'eau est absorbée par les des fibres [112]. Dans le même contexte, Villamisar et al. ont montré que l'utilisation des pelures de manioc accroît considérablement la résistance à sec des mélanges, ce qui est utile pour réduire les chutes causées par les problèmes de la manipulation du BTC [113].

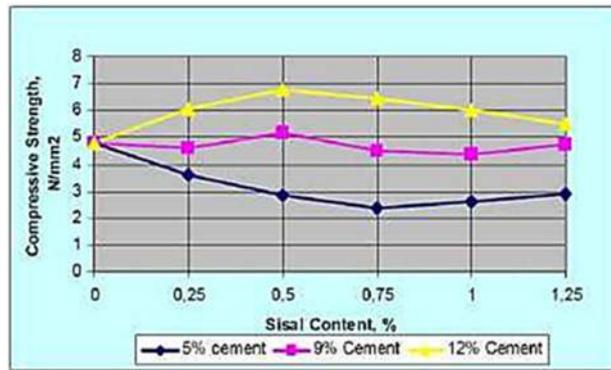


Figure I. 48 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en fibres de sisal [109].

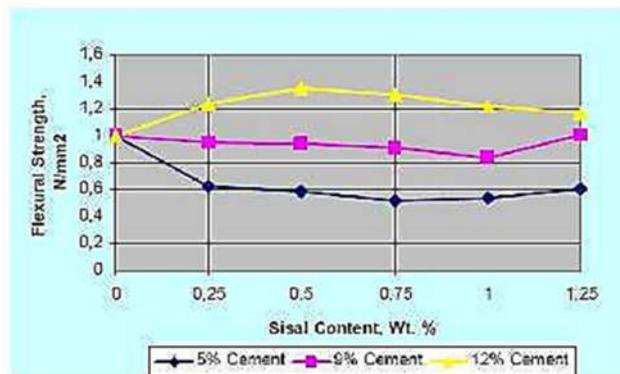


Figure I. 49 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en fibres de sisal [109].

Rigassi a cité dans son manuel de production des blocs de terre comprimée, que l'introduction des fibres dans le matériau terre est un moyen de création d'un réseau de fibres omnidirectionnel, ce qui se traduit par l'amélioration de la résistance à la traction et au cisaillement et contribue aussi à réduire le retrait. Mais sans donner d'arguments, l'auteur déclare que les fibres végétales sont incompatibles avec le mode de compactage des BTC, parce qu'elles rendent le mélange trop élastique [2].

Khedari et *al.* ont étudié des briques à base d'argile latéritique comprimée et stabilisée par des fibres de coco. Les résultats indiquent une légère diminution de la résistance à la compression (Figure I. 50). Les auteurs ont justifié cette baisse de résistance par l'effet des dimensions, des conditions de surface et le nombre de fibres présentes dans un volume donné. Donc l'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, d'où une réduction de la résistance à la compression [114].

Olivier et El Gharbi ont effectué une étude sur les blocs de terre stabilisée avec des fibres de sisal, et concluent que le point faible est l'interface entre mortier de terre et les blocs de terre. Les auteurs ont tenté d'améliorer cette interface en renforçant les blocs de terre comprimés par des fibres de sisal comme le mortier de terre. Ils ont aussi évalué l'avantage de l'utilisation du sisal [115].

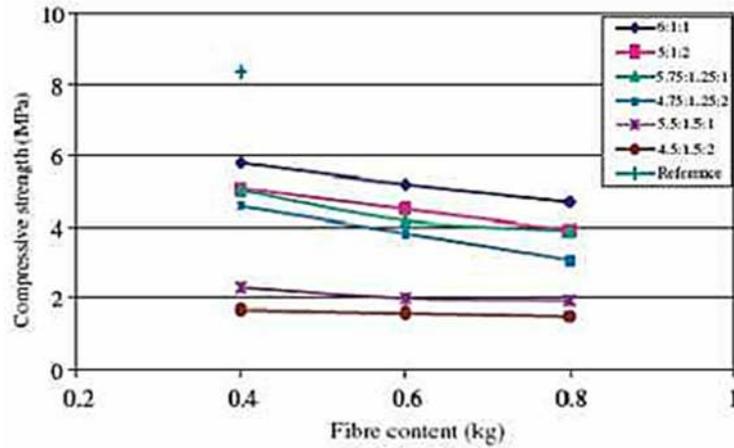


Figure I. 50 : L'influence de la teneur en fibres sur la résistance à la compression [112].

Eko et. al. ont étudié le renforcement des sols avec un mélange de ciment et de fibres végétales de bagasse de canne à sucre. Dans leur étude, ils ont utilisé 5 à 10% en poids de ciment et 5 à 15% en volume de fibres de bagasse. Ils ont constaté une amélioration de la résistance à la compression, non confinée à 28 jours avec l'augmentation de la teneur en ciment, jusqu'à un maximum d'environ 5 MPa, quand bien même une augmentation du volume de fibres est jugée préjudiciable au développement de la résistance [116].

Bouhicha et al (2005). ont employé différents teneurs et longueurs en paille d'orge hachée pour renforcer quatre types différents de sols sans stabilisants chimiques, dans le but d'étudier la possibilité d'améliorer leurs propriétés. Les résultats des essais ont prouvé les effets positifs de l'ajout de paille sur la réduction du retrait (Figure I. 51) et l'amélioration de la résistance à la compression (Figure I. 52), si une teneur optimale du renfort est utilisée. Les résistances à la flexion (Figure I. 53) et au cisaillement ont également augmenté pour les échantillons fibrés [117].

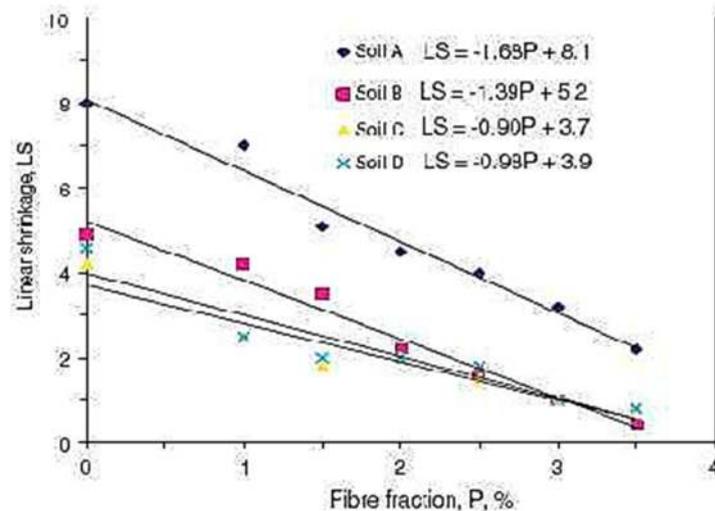


Figure I. 51 : Variation retrait linéaire en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].

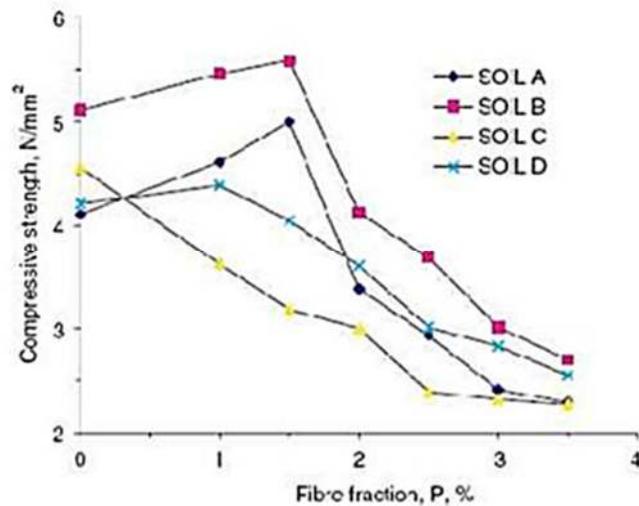


Figure I. 52 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].

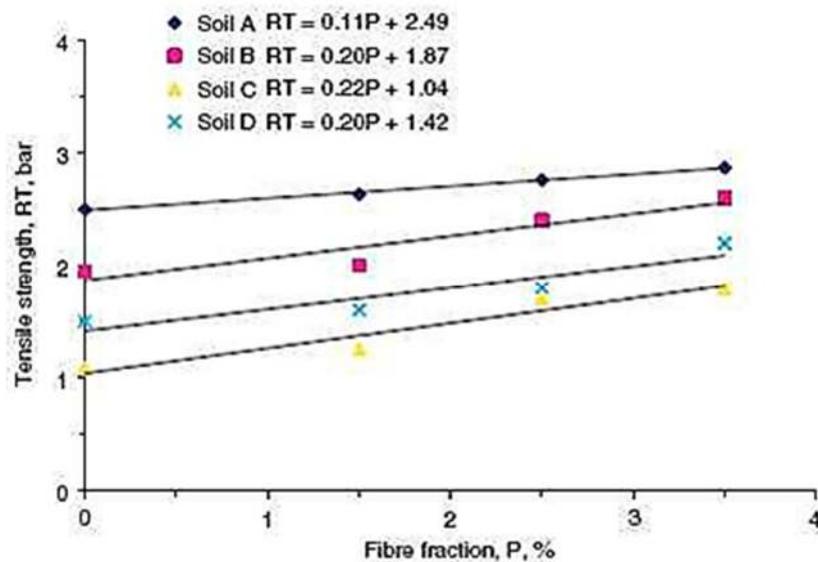


Figure I. 53 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée [115].

Dans le cadre d'une étude d'élaboration d'un essai de traction directe sur le BTC avec des fibres naturelles, Mesbah et al (2004) affirment que les avantages de l'utilisation des fibres naturelles comme renfort dans un bloc de terre comprimée comprennent à la fois l'amélioration de la ductilité en traction (Figure I. 54) comparativement à un bloc sans renfort, et l'inhibition de la propagation des fissures de traction après sa formation initiale. D'après les auteurs, il semble que les fibres n'ont pas d'effet sensible sur le comportement du matériau avant sa fissuration [118].

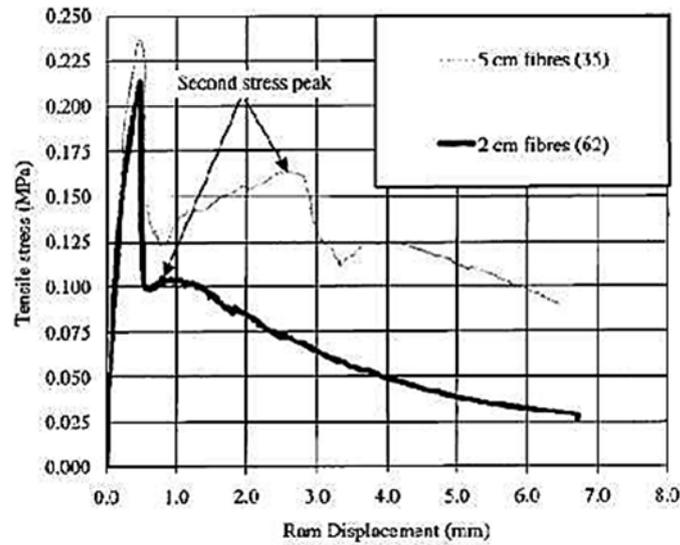


Figure I. 54 : Le comportement à la traction du bloc de terre comprimée renforcée par des fibres naturelles [116].

Outre les fibres d'origine naturelle, d'autres chercheurs ont également utilisé ses fibres synthétiques ou artificielles pour renforcer les blocs de terre comprimée. A titre d'exemple, nous pouvons citer l'étude menée par Eko et al. (2012) [119]. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé un sol latéritique stabilisé par 6% en ciment et renforcé par trois teneurs en fibres : 1.7%, 2% et 2.7% dans trois longueurs : 20 mm, 35 mm et 50 mm. Ils ont remarqué que la résistance à la traction croît avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une valeur optimale au-delà de laquelle la résistance diminue quand la teneur en fibres est accrue (Figure I. 55).

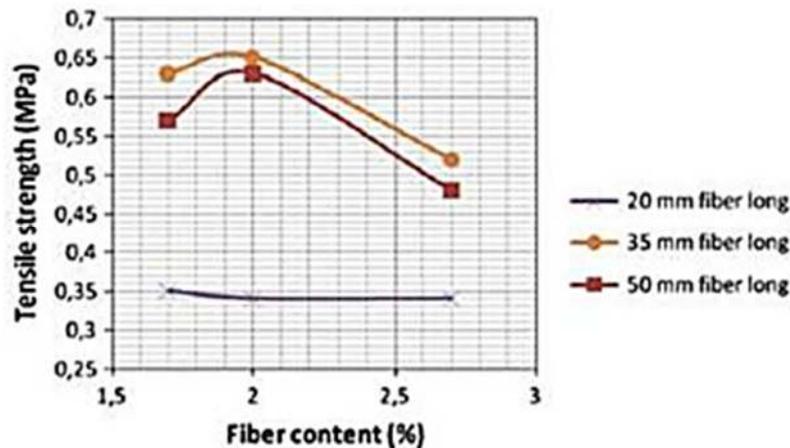


Figure I. 55 : Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la traction pour des blocs de terre comprimée stabilisée à 6% de ciment [117].

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

Les fibres végétales ont un caractère hydrophile favorisant ainsi l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette forte sensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans leur utilisation

pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur.

Sallehan et Yaacob [120] ont procédé par des essais d'absorption d'eau sur les BTC renforcés par les fibres brutes de palmier et ont conclu qu'il à une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres.

Ravishankar et Raghavan ont confirmé que pour les sols latéritiques stabilisés par la fibre de coco, le taux d'absorption de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de coco [121].

6.2.1.3. Effet des fibres sur les propriétés thermiques

Khedari et al. ont montré que la conductivité thermique des blocs de terre comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et que cette diminution atteint un taux important qui est de l'ordre de 50 % (Figure I. 56) [112]. Cette même observation a été faite par Millogo et al. (2014) (Figure I. 57) [102].

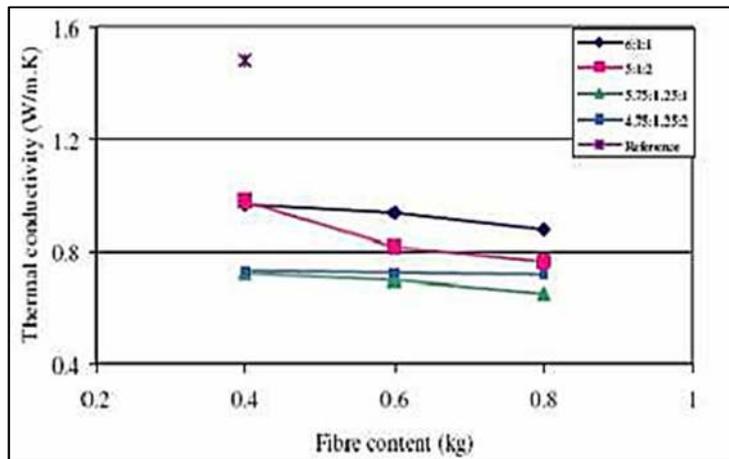


Figure I. 56 : L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique [112].

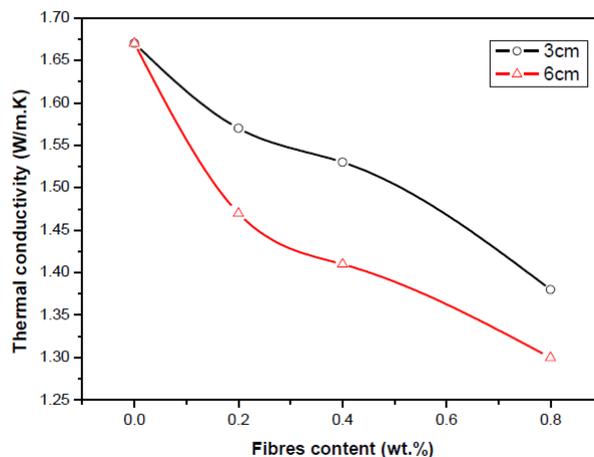


Figure I. 57 : L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du bloc d'adobe compressé [102]

7. Conclusion

Le présent chapitre a mis l'accent sur l'emploi des fibres végétales comme renfort du matériau terre envisagée pour la construction. A travers cette recherche bibliographique, nous avons montré que plusieurs travaux confirment que l'emploi des liants minéraux (ciment et chaux, notamment) comme stabilisants améliore la résistance mécanique et réduit la sensibilité à l'eau des BTC, alors que très peu de chercheurs ont exploré l'effet des ajouts minéraux tels que le laitier de haut fourneau. Mais la stabilisation des BTC par des fibres végétales ne fait pas consensus parmi les chercheurs. Certains ne recommandent pas l'utilisation des fibres végétales dans la fabrication du BTC à cause de leur incompatibilité avec le mode de compactage des BTC, alors que d'autres reconnaissent les fibres végétales comme une importante catégorie de stabilisants des BTC. Il faut noter aussi que la nature du sol et des fibres utilisées influent beaucoup sur les résultats. Différents types de fibres ont été utilisés, mais le kénaf a été peu usité. Souvent ces travaux focalisaient sur les comportements mécanique et hygrométrique des blocs de terre comprimée (BTC) renforcé par les fibres végétales sans pouvoir étudier l'effet de ces fibres sur l'isolation hygrothermique des blocs. Ainsi donc il apparaît nécessaire de mener un travail spécifique pour évaluer l'effet de l'introduction de fibres végétales sur les propriétés hygro-thermo-mécanique et surtout sur l'isolation hygrothermique de blocs de terre comprimée. C'est cette thématique que nous traitons dans ce travail de thèse.

Bibliographie

- [1] **CRATerre. GATE.** *Bloc de terre comprimée. Eléments de base.* , Eschborn, Allemagne, 28 p, 1991
- [2] **Rigassi V.** *Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995*
- [3] **Guettala A. (2003).** Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p.
- [4] **Houben H, Guillaud H.** *Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.*
- [5] **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** *Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979*
- [6] **Caillère S, Hénin S, Rautureau M.** *Minéralogie des argiles. Masson, Tomes 1 et 2, Paris France, 184p et 189 p, 1982.*
- [7] **Michiot, A.** *Caractérisations thermophysiques de matériaux à base d'argile: évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C, Université de Limoges, Thèse 2008*
- [8] **Bouras, O.** *Propriétés absorbantes d'argiles pontées organophiles : Synthèse et caractérisation, Université de Limoges, Thèse 2003.*
- [9] **Izemmouren, O.** *Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, Université Mohamed Khider – Biskra, thèse 2016.*
- [10] **SORGHO, B. (2013).** *Caractérisation et valorisation de quelques argiles du Burkina Faso : application au traitement des eaux et aux géomatériaux de construction.* Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou.
- [11] **Pialy, P.** *Étude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) : minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité. Université de Limoges, Thèse 2009.*
- [12] **Konan, K. L.** *Ineteraction entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium, Université de Limoges, Thèse 2006.*
- [13] **Camille Truche. (2010)** *Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain. Planète et Univers [physics], Université Paul Sabatier - Toulouse III.*
- [14] **Sora, N. S.** *Influence des fers sur les transformations thermiques de la Kaolinite, Université de Limoges, Thèse 2003.*
- [15] **Alipandi G. :** *Matériaux réfractaires et céramiques techniques. Tome 1. Eléments de*

céramurgie et de technologie. Editions Septina ; 1996.

- [16] **Bouchida, M. R (2010).** *Etudes de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques préparés à partir de kaolin - dolomite*, Université El - Hadj Lakhder – BATNA.
- [17] **Millogo, Y. (2008).** *Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées des liants hydrauliques: applications au génie civil (bâtiments et routes)*, Thèse de Doctorat de l'Université de Ouagadougou.
- [18] **MOORE R. K.** *Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. State of the Art Report. N°5. Transportation Research Board National Research Council, Washington, DC, 58p; 1987.*
- [19] **Samake, D.** *Traitement des eaux usées de tannerie à l'aide de matériaux à base d'argile*, Université Joseph Fourier de Grenoble/ Université de Bamako, 2008.
- [20] **Baroghel-Bouvy V.** *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse, interprétation ; Laboratoire Central des ponts et Chaussées ; Paris, 1994, 467p.*
- [21] **BULTEL F. (2001).** *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels.* Thèse de Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées (France).
- [22] **JOZJA, N.** *Etude de matériaux argileux albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité*, Université d'Orléans, Thèse 2003
- [23] **keita, I.** *Géomatériaux argileux du Mali pour la construction. Propriétés mécaniques, durabilité et rôle des tanins.* Thèse de Doctorat, Université des Sciences Techniques et Technologiques de Bamako ; Université de Limoges, 2014.
- [24] **Gauthier, M. (2008).** *Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes*, Université d'Orléans.
- [25] **Esharghawi, A. (2009).** *Élaboration de matériaux poreux à base de mullite par procédé SHS.* Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges.
- [26] **Lepluart, 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 de Lyon (France) ; 2002.

- [27] **Gavez-Coutier, R. ; François P. J.** : *Les sols contaminés par des métaux lourds : Distribution géochimique et techniques de restauration ; Vecteur Environnement, Volume 38, Numéro 3, P. 30-38 ; 2005.*
- [28] **Caillère S, Henri S, Rautureau M.** : *Minéralogie des argiles Tome 2 : classification et nomenclature, 189p ; 1982.*
- [29] **Caillere S., Henin S., Rautureau M.** : *Minéralogie des argiles Tome 2. Paris : Masson, 184p ; 1982.*
- [30] **Bultel F. (2001).** *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels.* Thèse de Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées (France).
- [31] **Jiménez Delgado M.C, Guerrero I.C.** *The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials vol 21 (2007) 237-251*
- [32] **Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R.** *Durability of lime stabilized earth blocks. Courrier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002.*
- [33] **Burrough VS. (2001).** *Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction,* PhD Thesis, University of New South Wales, Australia.
- [34] **M. Vénuat,** *Le traitement des sols à la chaux et au ciment, CERILH, 1980.*
- [35] **Houben H, Guillaud H.** *Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.*
- [36] **Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** *Performance of compacted cement stabilised soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.*
- [37] **Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS.** *Soft Ground Improvement in lowland and other Environments. ASCE Press. New York, 1996.*
- [38] **Winterkorn HF.** *Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.*
- [39] **USACE.** *Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.*
- [40] **Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R.** *Durability of lime stabilized earth blocks. Courrier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002*

- [41] **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*
- [42] **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.*
- [43] **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., volume146. : pp 37-43, 1986.*
- [44] **Centre for Development of Enterprise C.D.E).** *Compressed earth blocks: Testing procedures. In: C.D.E., ENTPE et CRATerre Coed, Brussels, Belgium, 2000.*
- [45] **Izemouren O, Guettala A.** *Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Matec web of conférence, vol 11 02001, 2014.*
- [46] **Verdeyen J., Roisin V, Nuyens J.** *Applications de la mécanique des sols", Dunod Ed. Paris, 1971.*
- [47] **Moszkowicz P, Barna R.** *Stabilisation - solidification des déchets. Techniques de l'ingénieur, Article G 2 080, Volume G. 04. 2001.*
- [48] **Ben Amor, K.** *Les conditions d'exploitation d'un produit montmorillonitique stabilisée à l'aide de ciment et mis en forme par extrusion, INSA, Rennes, Thèse 1995*
- [49] **Guettala, A. M. G,** «Béton de terre stabilisé, propriétés physico - mécaniques et influence de types d'argiles,» *Technique moderne, n° 11 - 2, pp. 21 - 26, 1977.*
- [50] **Roux, A. L.** *Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux, Université des sciences d'Orsay, 1969*
- [51] **Walker P. and Stace T.** *Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars, Materials and Structures Vol 30, pp 545 - 551, 1997*
- [52] **Gooding DEM.** *Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993*
- [53] **Heathcote, K, and Piper R.** *Strength of Cement Stabilised Pressed Earth Blocks with Low Cement Contents. J. Proc. Roy. Soc. New South Wales, vol. 127, pp. 33-37, 1994.*
- [54] **Walker, P.** *Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. Cement & Concrete Composites, 17, 4, pp. 301. 310, 1995.*

- [55] Walker P. *Specifications for Stabilised Pressed Earth Blocks*. *Masonry International*, 10, (1), pp. 1-6, 1996
- [56] Abdo, J. *Etude expérimentale de la stabilisation des arènes granitiques à la chaux, chez Thèse, Rennes, CGI, ENSMP, INSA, 1982, p. 133.*
- [57] Perret, P., «*Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux : étude globale du phénomène et applications,*» chez Thèse, Rennes, INSA, 1977.
- [58] Locat, J., M.A. Bérubé, Choquette, «*Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development.* » *Canadian Geotechnical journal*, n° 127, pp. 294 - 304, 1990.
- [59] S. A. Khattab, «*Etude multi - échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux.*» Université d'Orléans, 2002.
- [60] Roux, A. L., «*Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux argileux,*» Université des sciences d'Orsay, 1969.
- [61] Gedney, D.S., Bartholomew and associates, «*Lime stabilization, reaction, properties, design and construction,*» *State of the art report, vol. Transport Research Board*, n° 15, 1987.
- [62] Grim, R., J.L. Eades, «*A quick test to determine lime requirements for soil stabilization,*» *Highway Research Record*, n° 1139, 1966.
- [63] Metcalf, J.B., O.G. Ingles, *Soil stabilization: principles and practice.*, Sidney: Butterworths, 1970.
- [64] Lazzali, F., Z. Derriche, «*Analyse des mécanismes de stabilisation d'un sol gonflant par apport de chaux sous différentes formes,*» *Engineering Geology and Environnement*, pp. 79 - 84, 1977.
- [65] Vénuat M. *Le traitement des sols à la chaux et au ciment*, CERILH, 1980.
- [66] Locat J, Bérubé MA, Choquette 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.*
- [67] Moore, R.K. *Lime Stabilization. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. State of the art report 5. 59 p, 1987.*
- [68] 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*

- [69] **Toubeau, P.** *Optimisation des caractéristiques géotechniques et minéralogiques dans le traitement des sols: application aux bétons de terre.* U.E.R. des Sc. de la Terre, Paris 6, 1987
- [70] **Akpokodje EG.** *The stabilization of some arid zone soils with cement and lime.* Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985
- [71] **Ausroads.** *Guide to stabilisation in roadworks.* Ausroads Research Group, Sydney, 1998
- [72] **Alexandre I, Sebileau jl.** *Le laitier de haut fourneau, édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 340 p, 1988*
- [73] **Divet L, Le Roy R.** *Etude de la durabilité e vis-à-vis de la corrosion des armatures des bétons formulés avec des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau.* Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pp 63-84, 2013
- [74] **Van Rompaey G,** *Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chlorure.* The`se de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, p 462, 2006.
- [75] **Houze C.** *Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico- manganèse.* Universit_e Paris-Est Fance, 263p, 2013.
- [76] **Nenonene, A. Y.,** *''Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage''*, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [77] **Laurans F. A.Déjardin, J.Pilate,** *''Physiologie de la formation des parois de fibres de bois''*, composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39,2006.
- [78] **Anil, N.** *''composite get greener ''*, Material today, Vol 45, pp12, 2001.
- [79] **Bodros, E., C. BALEY,** *'' Etude des propriétés de biopolymer renforcés par des fibres de lin aléatoirement dispersées dans le plan de stratification''*, propriété aux interfaces et composites, Université de Bretagne-Sud, 2006
- [80] **Gouanvé, F., S.Marais, M. Métayer,** *' composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin''*, composites et matériaux avancées, Vol.16, pp.117.128 ,2006
- [81] **Nardin, M.,** *''interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales''*, revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006.
- [82] **Michaud, F.,** *''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage''* thèse Phd, univ Laval, 2003.

- [83] Baley C. (2004). *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Les techniques de l'ingénieur, AM 5 130.
- [84] Charle, K., C. morvan, J. Bréard, JP. Jernot, M. Gomina, "Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin" revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.
- [85] Ververis, C., K.Georghiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas." *Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production*. *Industrial Crops and Products* 19: 245–254, 2004.
- [86] ledzki, A.K. B, J. Gassan,"Composites reinforced with cellulose based fibres", *Prog. Polym. Sci.* 24 221–274, 1999
- [87] Couhert C. (2007). *Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno- cellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse*", Thèse de pour obtenir le de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Energétique.
- [88] Mitra, G.B., P.S. Mukherjee, "X-Ray diffraction study of fibrous polymers / Degree of paracrystallinity a new parameter for characterizing fibrous polymers", *Polymer*, Vol. 21, 1980, pp. 1403-1409.
- [89] Sedan, D. "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composites", thèse doctorat de l'université de limoges, matériaux céramiques et traitement de surface, 2007.
- [90] Berlioze, S. "Etude de l'estérification de la cellulose par une synthèse sans solvant. Application aux matériaux nano composites", thèse doctorat de l'université JOSEPH FOURIER, Sciences des Polymères, 2008
- [91] Joly, N. (2003), "synthèse et caractérisation de nouveaux films plastiques obtenues par acylation et réticulation de la cellulose", thèse doctorat de l'université de Limoges, chimie des substances Naturelles.
- [92] Satge, C. *Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides*, thèse doctorat de l'université de limoges, chimie des substances naturelles, 2002.
- [93] Hatsch, D., "Interaction hôte/pathogène : étude du modèle *Cumulus lupulus Fusarium graminearum*. Identification, génomique et transcriptomique du pathogène," thèse de doctorat de l'université de Louis Pasteur Strasbourg I, Sciences du Vivant – Aspects moléculaires et cellulaires de la biologie.2004.
- [94] Montiès, B., "Les polymères végétaux - Polymères pariétaux et alimentaires non azotés, Gauthier Villars (ed), Paris (1980).
- [95] Sharma, B.R., Naresh L., N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C. Merchant Lucid "Colloids Limited Jodhpur"-342005, Rajasthan, India,2006.

- [96] Thiebaud S. "Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Sciences des Agroressources, 1995.
- [97] Boustingorry P. "Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse renforcé par bois fragmenté -amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqué en gypse," thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure des Mine de Saint Etienne, Génie des procédés, 2002
- [98] Rowell, R.M.' *Composite Materials from Agricultural Resources*" Olsen, Ole; Rexen, Finn; Larsen, Jorgen, eds. *Research in industrial application of non food crops, I: plant fibers: Proceedings of a seminar; May; Copenhagen, Denmark.* Linkboy, Denmark. *Academy of Technical Science: 27-41, 1995.*
- [99] Berhaut J. *Flore Illustrée du Sénégal.* Dakar, Min. du Dév. Rural. Dir. Des Eaux et Forêts, 1979.
- [100] Stricker J.A., Prine G.M., Riddle T.C.. *Kenaf - A Possible New Crop for Central Florida.* *Forest Product Journal.*, **43**(7/8): 69-71, 1993
- [101] Webber C.L., Bledsoe R.E., Bledsoe V.K., Ray C.D., Blalock J.L.. *Industrial Grade Particleboard.* In *Kenaf Association International Conference Proceedings.* P. 38, 2000
- [102] Horn R.A., Wegner T.H., Kugler D.E.. *Newsprint from blends of kenaf CTMP and deinked recycled newsprint.* *Tappi Journal* **75**(12): 69 - 72, 1992
- [103] Bukenya-Ziraba, R.. *Hibiscus cannabinus L.* Fiche de Protabase. Grubben, G.J.H. & Denton, O.A. (Editeurs). *PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale)*, Wageningen, Pays Bas. <http://database.prota.org/recherche.htm>. 2004
- [104] 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
- [105] 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
- [106] 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.

- [107] **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.
- [108] **Vergas J, Bariola J, Blondet M.** *Seismic Strength of Adobe masonry.* *Materials & Structures*, 19, pp. 253-258, 1986.
- [109] **Stulz R, Mukerji K.** *Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions.* *Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.*
- [110] **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.
- [111] **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 fibres. Cassava powder and cement compositions. A doctoral dissertation.* *Brandenburg Technical University; Cottbus ,Germany, 2006.*
- [112] **Minke G.** *Earth Construction Handbook.* *Boston: WIT Press; 2000.*
- [113] **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.
- [114] **Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J.** *Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity.* *Cem Concr Compos*; 27(1):111–116, 2005.
- [115] **Oliver M. and El Gharbi Z.** *Sisal Fibre Reinforced Soil Masonry.* *Proceedings of the 4th International Masonry, London, pp. 55-58, Oct. 1995*
- [116] **Eko RM, Riskowski G.** *A Procedure for Processing Mixtures of Soil, Cement, and Sugarcane Bagasse.* *Agricultural Engineering Journal: the CIGR Journal of Scientific Research and Development, Manuscript BC 99 001, Vol. III, pp. 1-11, 2001.*
- [117] **Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S.** *Performance of composite soil reinforced with barley straw.* *Cem Concr Compos*, 27(5):617–21, 2005.
- [118] **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
- [119] **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.
- [120] **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.

- [121] **Ravishankar U, Raghavan S.** *Coir stabilised lateritic soil for pavements. In: Indian geotech conf, Ahmedabad, India; 2004.*

Chapitre

II. MATIERES PREMIERES ET METHODES EXPERIMENTALES

A travers la synthèse bibliographique, nous avons pu voir que la nature physicochimique et géotechnique du sol joue un rôle déterminant sur le comportement mécanique des blocs de terre comprimée et sur leur durabilité. De même, la nature des liants utilisés comme stabilisants ainsi que celle des fibres employées sont des paramètres importants qui influent sur le comportement des BTC. Dans ce chapitre nous présentons d'abord une caractérisation détaillée des additifs utilisés dans cette étude pour la formulation des BTC, puis les différentes méthodes expérimentales mises en œuvre pour déterminer les propriétés physicochimiques, mécaniques et thermiques des matériaux de ces biomatériaux.

1. Matières premières et matériaux utilisés

Nous avons utilisé dans ce travail comme matières minérales deux types de sols argileux et comme matière végétale des fibres de kénaf. Toutes ces matières premières proviennent du Bénin car l'objectif ultime de ce travail est de démontrer la viabilité de matériaux fabriqués à partir de matières premières locales pour la construction.

1.1. Aperçu géographique et géologique du Bénin

Le Bénin est situé en Afrique de l'Ouest, entre les méridiens 1°00'E et 3° 40'E et entre les parallèles 6°15'N et 12°00'N. (Figure II. 1) Il se trouve dans la zone intertropicale. La température y varie entre 22 et 37°C, et la pluviométrie entre 900 et 1450 mm. Il comprend deux zones climatiques séparées par le 8^{ème} parallèle : un climat tropical humide de type soudanien au Nord, avec une saison sèche et une pluvieuse, un climat de type subéquatorial au Sud, avec deux saisons sèches et deux pluvieuses. La végétation y est caractérisée par des savanes arborées et arbustives avec de rares îlots de forêts artificielles (palmiers, tecks, anacardiens ...). Le territoire béninois appartient à la zone mobile panafricaine plus précisément à la chaîne panafricaine des Dahoméyides [1]. Il est constitué d'un socle cristallin, des formations volcano- sédimentaires et des couvertures sédimentaires. Le socle cristallin est d'âge précambrien et occupe 85% du territoire. Il est de nature granito-migmatitique. Dans ce socle se retrouvent des formations volcano- sédimentaires, en relation avec la phase tardi-orogénique panafricaine. Les couvertures sédimentaires se reposent sur le socle cristallin et les formations volcano-sédimentaires. Elles constituent le bassin méso-cénozoïque côtier, le bassin paléozoïque de Kandi et le bassin précambrien de la Pendjari [2,3].

sur la bordure Nord-Est du Bassin Sédimentaire côtier, où affleurent les formations d'âge Maestrichtien (Crétacé supérieure), recouvertes localement de cuirasses latéritiques.

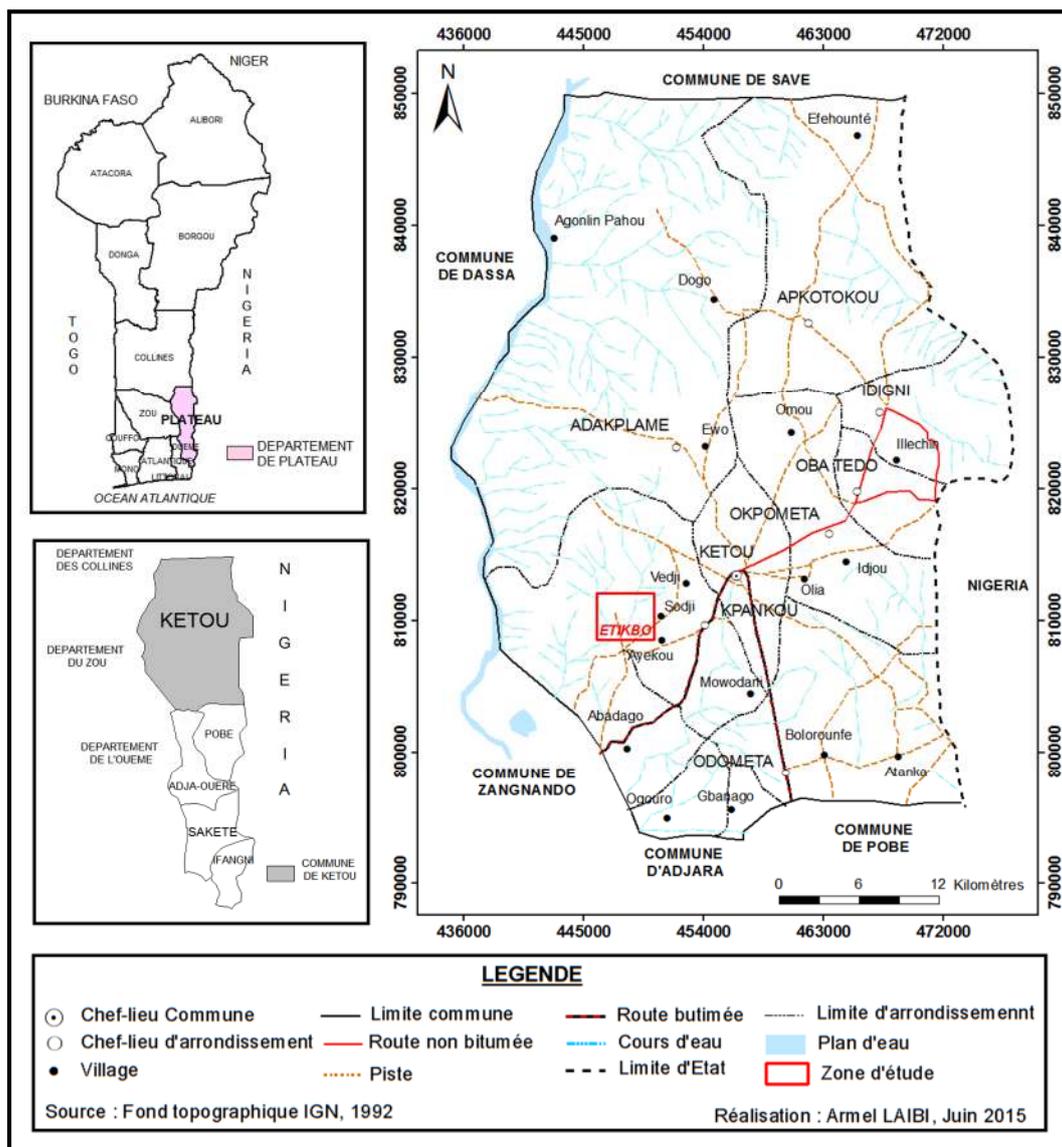


Figure II. 2 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons de Etigbo

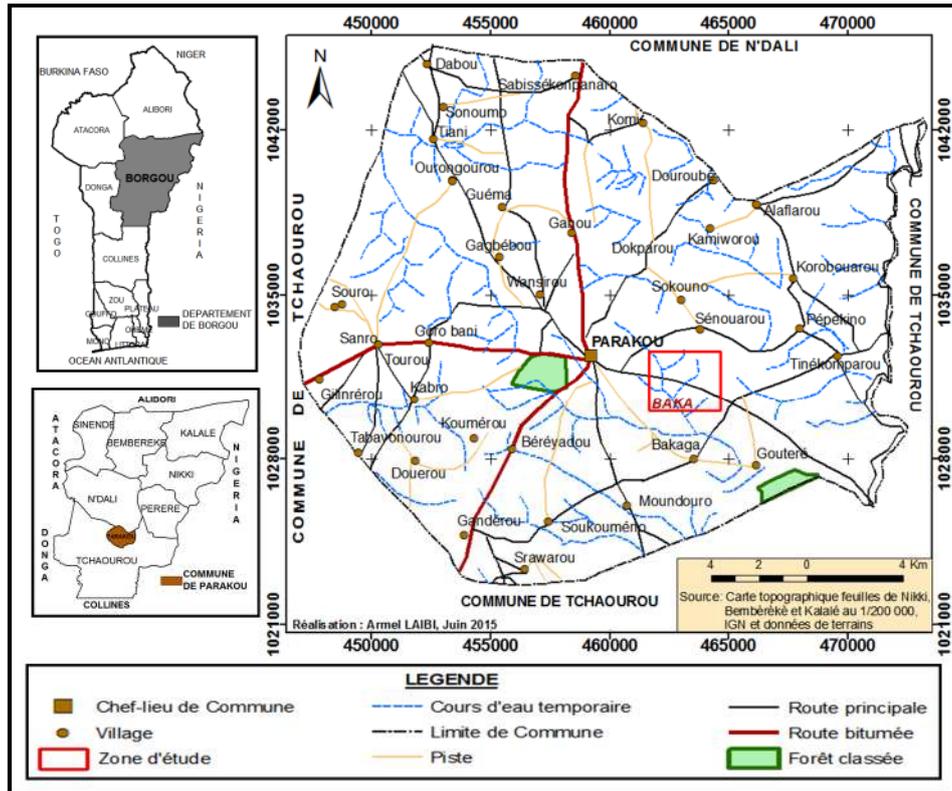


Figure II. 3 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons de Baka

1.1.1.2. Échantillonnage

Sur chacun des 2 sites, cinq puits sont forés de façon artisanale, suivant une équidistance de 100 m. Ces puits sont disposés en un losange ayant à ses sommets quatre puits et un puits au centre. Sur le site d'Etigbo, les prélèvements révèlent la présence d'argiles de couleurs variables allant du blanc au rouge en passant par le jaune. Les échantillons prélevés sur ce site sont notés ETI. Sur le site de Baka, on retrouve un sol argileux de couleur gris beige en général. Les échantillons de ce site sont notés BAK. Ce sol est utilisé depuis des décennies, par les populations locales, essentiellement pour la confection d'adobes et d'enduits pour le revêtement des toits et des murs obtenus à partir d'un mélange d'argile, de pain de singe et de beurre de karité dont les proportions sont propres à chaque artisan.

Les Figure II. 4 et II. 5 présentent respectivement les points d'implantation des puits de Baka et de Etigbo. Chaque puits est un trou circulaire de 1 m de rayon et de 4 m de profondeur. Il est repéré par ses coordonnées GPS.

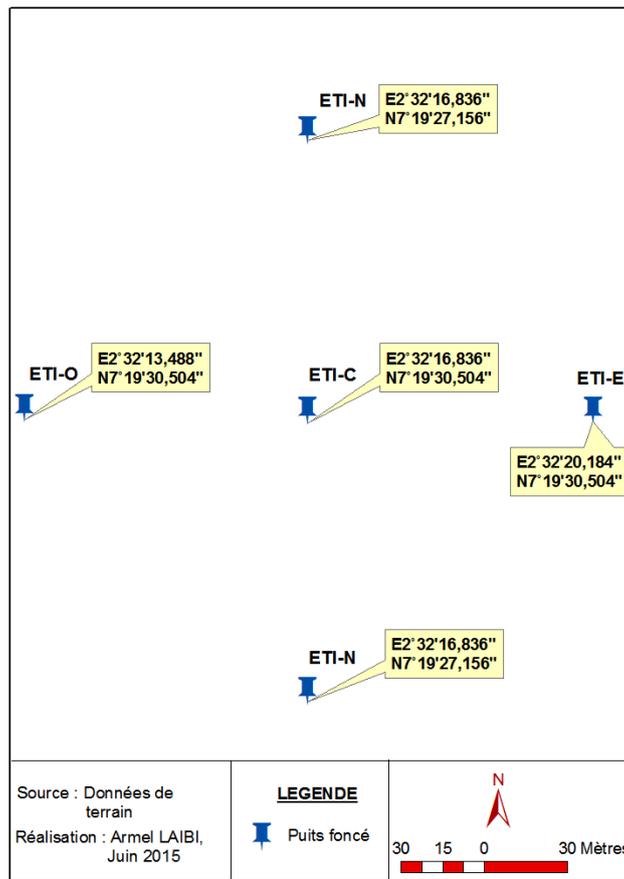


Figure II. 4: Carte d'implantation des puits de Etigo

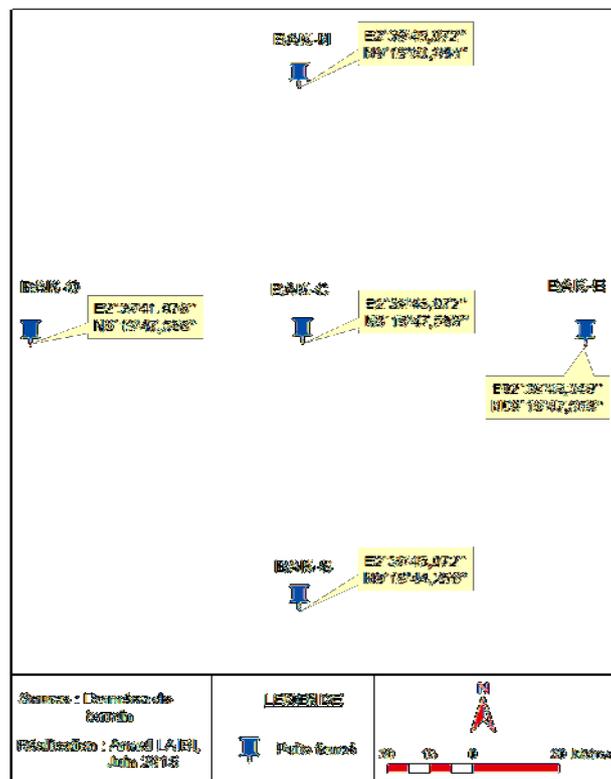


Figure II. 5: Carte d'implantation des puits de Baka

1.1.2. Le kénaf

Le kénaf est une plante herbacée annuelle de hauteur comprise entre 1,5-3,5 m avec une base ligneuse, de la famille des Malvacées. Les diamètres des tiges sont de 1-2 cm et les feuilles de 100-150 mm de longueur sont de forme variable (Figure II. 6). Les feuilles près de la base de la tige sont profondément lobées avec 3-7 lobes, tandis que celles près du sommet de la tige sont faiblement lobées.

Au Bénin, les feuilles de kénaf sont utilisées pour préparer des sauces. Les fleurs de couleur blanche, jaune ou violette ont 8-15 cm de diamètre (Figure II. 7). Quand elles sont blanches ou jaunes, le centre est encore violet foncé. Le fruit est une capsule de 2 cm de diamètre contenant plusieurs graines. En raison de leur haute résistance mécanique, les fibres de kénaf sont habituellement utilisées en Afrique de l'Ouest pour fabriquer des sacs. Les éleveurs du nord Bénin utilisent également les fibres de kénaf, après les opérations de rouissage, de délaniéage, de lavage et de séchage, dans le cordage dans le but d'attacher les animaux domestiques.



Figure II. 6 : Plants du kénaf



Figure II. 7 : Fleurs du kénaf

1.1.2.1. Origine du kénaf utilisé

Les plantes de kénaf cultivées près de Parakou, ont été coupées à l'âge de 6 mois et rouies en rivière puis défibrées manuellement. Pour cette étude, les fibres sont alors coupées à l'aide d'un massicot afin d'obtenir des longueurs de 5 mm, 10 mm, 20 mm et 30 mm (Figure II. 8).



Figure II. 8: Fibres du Kénaf

1.1.3. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le CPA-CEM I 42.5 ES, qui est composé à 95 % de clinker et 5 % de gypse. L'analyse chimique du clinker montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301. La composition chimique et minéralogique du clinker est présentée sur les Tableaux II. 1 et II. 2. La composition minéralogique potentielle du clinker est calculée selon la formule empirique de Bogue [5].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	Na ₂ O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
22.17	4.53	5.04	64.55	1.02	1.34	0.00	0.21	1.09	0.94	0.80

Tableau II. 1 : La composition chimique du clinker (%).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51.20	21.16	3.10	12.42

Tableau II. 2 : La composition minéralogique du clinker (%).

Les valeurs des masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé sont présentées dans le Tableau II. 3

Désignation du ciment	Masse volumique apparente	Masse volumique absolue
	(g/cm ³)	(g/cm ³)
CPA-CEM I 42.5 ES	1.144	3.232

Tableau II. 3 : Les masses volumiques du ciment utilisé

1.1.4. Le laitier de haut fourneau

Le laitier granulé obtenu par trempé à l'eau est fourni par le haut fourneau de Fos sur Mer, au moyen de granulateur de nouvelle génération (INBA®). Il est produit par ECOCEM France et répond à la norme européenne NF EN 15167-1, 2006. C'est un laitier moulu de classe A, suivant les distinctions faites dans la norme NF EN 206/CN, classe confirmée, en date du 28 Juin 2013, par le CERIB. Son taux de vitrification moyen est supérieur à 90% (mesure par diffraction de rayons X). Il se présente sous forme de sable de granulométrie 0-5 et de couleur blanchâtre (Figure II. 9). Sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans les tableaux II.4 et II.5



Figure II. 9 : Laitier de haut fourneau "Ecocem"

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O	S ²⁻	Perte au feu
37,2	11,2	0,7	43,4	6,6	0,3	0,01	0,29	0,22	0,4	0,94	< 1,5

Tableau II. 4 : La composition chimique du laitier de haut fourneau en %

$$Mb_1 = 1,34 ; Mb_2 = 1,16 ; Mb_3 = 1,03$$

$Mb_1 \geq 1,2$ donc le laitier utilisé est de la classe A selon NF EN 206-1/CN

Désignation du laitier	Masse volumique (g/cm ³)	Densité apparente	Surface spécifique blaine (cm ² /g)
ECOCEM	2,90 ± 0,03	0,8 ± 0,1	4450 ± 250

Tableau II. 5 : Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau

1.1.5. L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est l'eau de robinet du laboratoire GeM ; elle contient peu de sulfate et est délivrée à une température d'environ 20 ° C, selon la période de l'année. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

2. Méthodes expérimentales

2.1. Caractéristiques physico-chimiques

2.1.1. Le taux d'humidité

Le taux d'humidité est déterminé selon la norme NF P94-050. Les sols argileux absorbent facilement de l'eau (eau d'imbibition) au niveau de la surface des minéraux argileux. En effet, cette eau disparaît au séchage à la température de 105°C [6]. Le taux d'humidité (ou la teneur en eau) permet de quantifier la quantité totale d'eau contenue dans un matériau et renseigne sur son état d'hydratation. Il s'exprime en pourcentage de la masse de matière sèche. La relation II.1 permet d'évaluer le taux d'humidité.

$$\omega(\%) = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} * 100 \quad \text{Relation II. 1}$$

ω : Taux d'humidité

M_1 : masse de l'échantillon avant étuvage ;

M_2 : masse de l'échantillon après étuvage à 105 °C pendant 24 heures.

2.1.2. La perte au feu

La perte au feu (PF), exprimée en pourcentage, est la perte de poids d'un échantillon après calcination à 1000°C, rapportée au poids initial. Lors du chauffage, il se produit diverses réactions qui modifient l'échantillon (déshydratation et/ou déshydroxylation des hydroxydes, oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium, des minéraux argileux avec perte d'eau d'hydratation et/ou de constitution ; décomposition des carbonates et des matières organiques) [7]. Pour sa mesure, nous avons soumis une masse M_2 de l'échantillon préalablement étuvé à 105 °C pendant 24 heures à la cuisson à 1000°C dans un four Ceradel. M_3 est la masse obtenue après calcination et refroidissement. La perte au feu est calculée en utilisant la relation

$$PF(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_3} * 100 \quad \text{Relation II. 2}$$

2.1.3. La densité

La densité est une caractéristique physique qui permet d'apprécier la composition minéralogique d'un matériau argileux à partir des densités de minéraux données dans la littérature. Elle donne une idée de l'espèce minérale qui prédomine dans le matériau argileux. Pour déterminer la densité, nous avons utilisé la méthode du pycnomètre décrite par Keita [8]. Nous utilisons un pycnomètre à eau préalablement bien nettoyé et essuyé. Ce pycnomètre est rempli jusqu'au repère avec de l'eau permutée à 20 °C et la masse de l'ensemble du pycnomètre rempli d'eau est notée M_3 . Nous vidons environ la moitié de l'eau contenue dans le

pycnomètre. Une masse de 5 g de la poudre d'argile notée M4 a été introduite dans le pycnomètre. Nous complétons le volume du pycnomètre (contenant la poudre d'argile) avec de l'eau permutée jusqu'au repère en ajustant à l'aide d'une seringue. Après avoir remis la balance à zéro, nous pesons l'ensemble et noté la masse M5.

La relation II.1 permet d'accéder à la valeur de la densité.

$$d = \frac{M4}{M3+M4-M5} * \rho_{eau} \quad \text{Relation II. 3}$$

avec $\rho_{eau} = 1 \text{ g/cm}^3$

2.1.4. Mesure du coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres de kénaf est déterminé selon la méthode décrite par Magniont dans sa thèse sur la contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro-ressources [9].

Les mesures sont faites sur des échantillons de fibres préalablement découpées en brins de 25 à 35 mm. Cinq échantillons d'environ 1 g sont testés. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance précise à 0.001g près. Les échantillons sont initialement séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse, m_1 . Ils sont ensuite immergés dans de l'eau distillée pendant des durées prédéfinies : 1 minute, 2 minutes, 3 minutes, 5 minutes, 15 minutes, 30 minutes, 1h, 2h et 24 heures. A l'issue de chacune de ces périodes d'immersion, les fibres sont superficiellement séchées en utilisant du papier absorbant afin d'éliminer l'eau inter-fibres ainsi que l'eau adsorbée à leur surface. La masse est alors m_2 . Le coefficient d'absorption d'eau des fibres est alors déterminé par l'équation suivante :

$$\alpha (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 \quad \text{Relation II. 4}$$

m_1 : masse sèche des fibres (g)

m_2 : masse saturée superficiellement sèche des fibres après immersion (g)

2.2. La composition minéralogique

2.2.1. La diffraction des rayons X (D.R.X.)

La diffractométrie des rayons X est une méthode couramment utilisée en science des matériaux sur des poudres pour l'identification des espèces minérales cristallisées contenues dans un matériau. Chaque solide cristallin peut être identifié par son diagramme aux rayons X qui est comme une empreinte digitale. Grâce à cette technique, on est capable par exemple de distinguer les différents types d'argiles et de déterminer leur environnement dans les dépôts. L'appareil de diffraction des rayons X est constitué d'une source de rayons X, d'un support pour l'échantillon qui se présente sous forme de poudre, et d'un détecteur de rayons X diffractés. La Figure II. 10 est un schéma simplifié d'un diffractomètre de rayons X sur poudre.

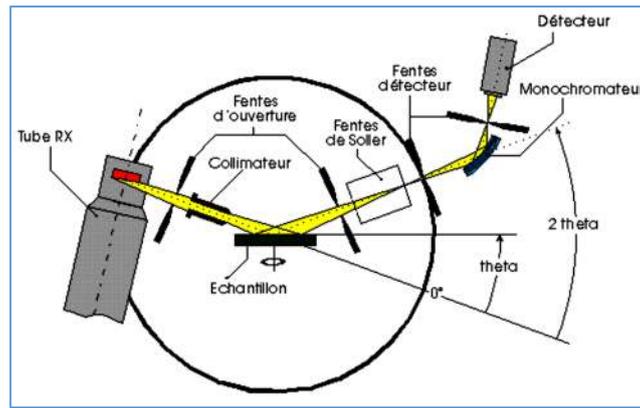


Figure II. 10: Schéma simplifié d'un diffractomètre de poudre de rayon X [10]

Lorsqu'on considère une famille de plans (hkl) caractérisée par la distance inter-réticulaire d_{hkl} et irradiée sous un angle θ par un faisceau de rayons X monochromatique (λ), et si le cristal est relativement petit, chaque atome de ce cristal est baigné dans un faisceau d'intensité constante et diffuse une onde de façon cohérente. Les ondes diffractées interfèrent et donnent lieu à une onde de forte intensité dans la direction de diffraction θ . A chaque structure cristalline correspondent des raies de diffraction bien précises. Le faisceau des rayons X est diffracté par une famille de plans réticulaires (h,k,l) et la réflexion de la lumière se fait sous un angle θ égal à la moitié de la déviation selon la loi de Bragg [11]:

$$n\lambda = 2d(hkl) \sin \theta \quad \text{Relation II. 5}$$

Avec n le nombre entier où « ordre de diffraction » ; λ la longueur d'onde du faisceau incident et diffracté ; $d_{(hkl)}$ la distance réticulaire entre les plans parallèles consécutifs et θ l'angle de Bragg.

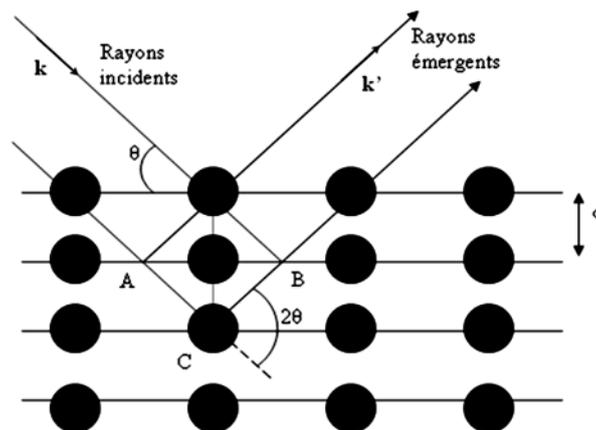


Figure II. 11: Illustration de la diffraction des rayons X selon BRAGG

Le diffractomètre utilisé est un appareil de marque Bruker D 5000 avec un tube arrière en graphite fonctionnant sous une tension de 40 kV et une intensité de 50 mA avec la raie $K\alpha_1$ du cuivre, piloté par un ordinateur muni d'un logiciel Diffracplus D Quant version 2.2. Le temps d'acquisition est de 60 minutes.

Dans notre travail, la diffraction des rayons X est réalisée sur deux types de préparations (poudre et lame orientée) avec un temps d'acquisition d'une heure environ et un angle d'incidence initiale de 3 degrés :

- **diffractogramme sur poudre** du sol total brut (fraction < 100µm). Dans ce cas la réflexion permet d'accéder, en l'absence de toute orientation préférentielle, à toutes les raies (hkl).

- **diffractogramme sur lame orientée** avec des préparations de la fraction < 2 µm traitées par saturation à l'éthylène-glycol et chauffées à 490°C pendant 4 heures. Dans ce cas la poudre est compactée sur une surface plane, les plaquettes des minéraux argileux se déposent parallèlement à cette surface (perpendiculaire à l'axe structural c). Ainsi, un diffractogramme effectué sur une lame orientée ne montrera que les raies (00l) correspondants aux plans structuraux perpendiculaires à l'axe **c** [12,13]. La technique des lames orientées étant pratiquée sur la fraction inférieure à 2 µm, elle nécessite la séparation de la phase minérale argileuse. Ceci consiste à introduire 10 g d'argiles dans une éprouvette contenant 1 litre d'eau distillée. Après une décantation de l'ensemble pendant 16 heures, on siphonne la suspension contenue dans les 10 cm supérieurs de l'éprouvette. Quelques gouttes de cette suspension sont ensuite étalées sur une lame de verre. Cette dernière est séchée à l'air pendant 24 heures. Les diffractogrammes ont été traités par le logiciel X'Pert High Score Plus.

2.2.2. Cristallinité des fibres de Kéna : Méthode de Ségal

De nombreuses études se réfèrent à la méthode de Ségal pour l'estimation de l'indice de cristallinité des fibres naturelles [14,15]. Cet indice, I_c , est déterminé d'après l'équation II.6, en utilisant les intensités des raies (002) (I_{002} , $2\theta = 22,7^\circ$), et (110) (I_{AM} , $2\theta = 18^\circ$) (Figure II. 12). I_{002} représente à la fois le matériau amorphe et cristallin alors que I_{AM} représente seulement la partie amorphe. Cette méthode suppose que la contribution de la partie amorphe soit la même à 18° qu'à $22,7^\circ$, et que la cellulose cristalline ne contribue pas à l'intensité diffractée à 18° [15]. Cette détermination de l'indice de cristallinité reste cependant discutable car elle ne prend en compte que les intensités des raies et non l'intensité intégrée des pics de diffraction.

$$I_c = \frac{I_{002} - I_{AM}}{I_{002}} * 100$$

Relation II. 6

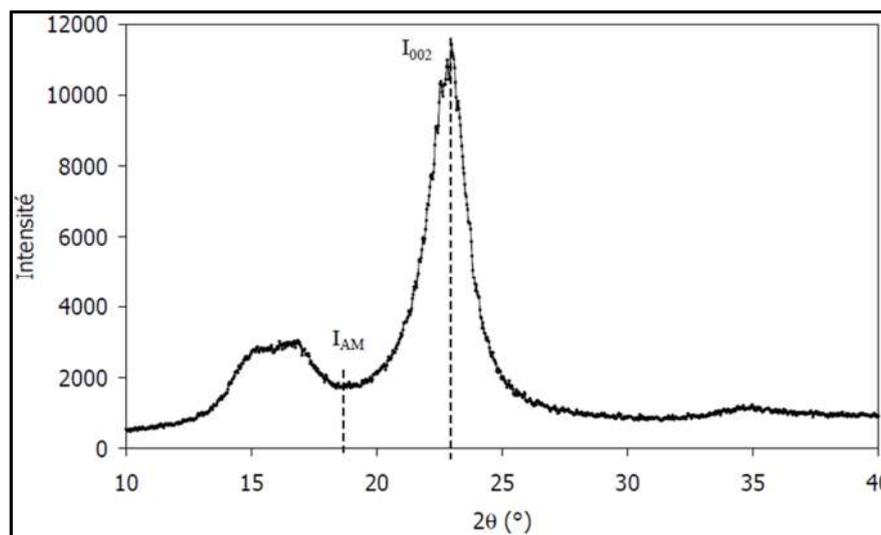


Figure II. 12: Diffractogramme type d'une fibre de chanvre entre 10° et 40°. I_{AM} correspond à l'intensité diffractée à $2\theta = 18^\circ$; I_{002} est l'intensité diffractée à $2\theta = 22,7^\circ$. [16]

2.3. Les analyses thermiques différentielle et gravimétrique (ATD/ATG)

Une substance soumise à un traitement thermique peut subir des modifications de ses propriétés physico-chimiques, par exemple un changement de phase, une modification de structure, une décomposition, une variation de volume, etc.

L'analyse thermique permet d'observer ces modifications en fonction de la température. Parmi les techniques mises en œuvre, l'analyse thermique différentielle (ATD), l'analyse thermogravimétrique (ATG) et l'analyse dilatométrique sont les plus couramment pratiquées.

- L'ATD est une méthode d'analyse qualitative et quantitative basée sur l'étude des phénomènes thermiques qui se produisent au sein d'une substance chauffée ou refroidie de manière régulière. Elle apporte une contribution à la détermination de la composition minéralogique des matériaux et est complémentaire à l'analyse par diffraction de rayons X. Lors des différentes réactions chimiques et transformations minéralogiques qui interviennent par exemple au cours de la cuisson d'un minéral argileux, les phénomènes thermiques se traduisent par un dégagement de chaleur (réaction exothermique) ou une absorption de la chaleur (réaction endothermique) [17,18]. Ces phénomènes sont déterminés en fonction de l'évolution de la température.

- L'ATG permet de suivre les variations de masse d'un échantillon lors d'un traitement thermique. Elle peut donc être utilisée dans ce cas pour suivre l'évolution de la masse d'un composé pendant un cycle thermique [13].

L'ATD et L'ATG sont effectuées simultanément entre 20°C et 1250°C à l'aide du dispositif SETARAM Scientific & Industrial Equipment série Setsys 24 (Figure II. 13). Cet appareil permet de coupler l'analyse thermique différentielle et l'analyse thermogravimétrique. La masse de l'échantillon utilisée est de 59,6 mg ainsi que celle de la référence (la référence est l'alumine préalablement calcinée à 1500°C). L'ensemble échantillon - référence est placé dans deux

creusets identiques en platine et monté sur le porte-creuset lié à la balance. La vitesse de chauffe adoptée est 10°C/min, sans palier avec une vitesse de refroidissement de 20°C/min.



Figure II. 13: Photo du SETARAM Scientific & industrial - série Setsys 24

2.4. Analyse dilatométrique

L'analyse dilatométrique des argiles fournit des indications précieuses sur leur comportement à la cuisson. Elle permet notamment de mettre en évidence les variations volumiques (dilatation–retrait) en fonction de la température.

Les mesures dilatométriques ont été faites sur un dilatomètre Adamel type DI24. L'appareil est équipé d'un four à résistance. Il permet d'effectuer des investigations dans une gamme de température entre l'ambiante et 1400°C. La chaîne de mesure est constituée d'un poussoir en alumine maintenu en contact avec l'échantillon par un ressort, et d'un capteur de déplacement inductif, qui assure la mesure de la variation de la longueur au cours de l'essai.

2.5. La spectroscopie infrarouge (IR)

Les mesures de spectroscopie infrarouge (I.R.) sont réalisées sur un spectromètre à transformée de Fourier de type Perkin Elmer (Spectrum one, Boston, U.S.A). La source est un globalar (SiC) dont le module est celui du corps noir, lequel est par définition, susceptible d'absorber complètement le rayonnement qu'il reçoit. Le contrôle du déplacement d'un miroir se fait à l'aide d'un laser He-Ne de longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm (rouge) alors que l'autre miroir est fixe. Pour appliquer cette technique dans le cas d'échantillons solides, il est nécessaire, au préalable, de mélanger une petite quantité de l'échantillon finement broyé à un composé transparent dans le domaine spectral étudié (5000-450 cm^{-1}). A cette fin, nous employons le bromure de potassium (KBr). Les échantillons à analyser sont préparés sous forme de pastilles en mélangeant 5 % en Masse de fibres (ou du sol) préalablement broyées à 95 % en masse de KBr. La spectroscopie I.R. est une des méthodes les plus efficaces pour

l'identification des molécules organiques et inorganiques à partir de leurs propriétés vibrationnelles. En effet, le rayonnement I.R. excite des modes de vibration (déformation, élongation) spécifiques de liaisons chimiques. La comparaison entre rayonnement incident et transmis à travers l'échantillon suffit alors à déterminer les principales fonctions chimiques présentes dans l'échantillon.

La loi de Beer-Lambert permet de déterminer l'énergie absorbée :

$$I = I_0 \text{Exp}(-\varepsilon.l.C) \qquad \text{Relation II. 7}$$

avec:

I : Intensité de la radiation transmise;

I_0 : Intensité de la radiation incidente;

ε : Coefficient d'extinction;

C : Concentration de l'élément absorbant;

l : Epaisseur de la substance absorbante

2.6. Méthode d'analyse chimique

La composition chimique des échantillons a été déterminée par spectrométrie d'émission Plasma ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry).

2.6.1. Principe de la méthode

La spectrométrie atomique d'émission, utilisant la technique du plasma d'argon induit par des hautes fréquences (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry ICP AES) comme source d'ionisation et d'excitation, a pour principale application l'analyse d'échantillons sous forme liquide. Le terme plasma désigne des gaz partiellement ionisés. La source ICP apparaît comme une flamme blanche, brillante et très intense. Sa température (>7000 K), plus élevée que celle de la spectrométrie de flamme (3000 K), est à l'origine de l'intérêt qu'elle suscite en analyse. En effet, à ces températures, les espèces moléculaires sont parfaitement dissociées en atomes excités et/ou ions libres. Ceci permet l'analyse d'un grand nombre d'éléments avec une très bonne sensibilité (limite de détection dans l'eau de l'ordre du $\mu\text{g/L}$ pour beaucoup d'éléments). Comme la plupart des techniques physico-chimiques, c'est une méthode comparative : les concentrations élémentaires de l'échantillon à analyser sont déterminées à partir de courbes d'étalonnage réalisées quotidiennement avec des solutions contenant des quantités connues des éléments à doser.

L'échantillon à doser, préalablement mis en solution, est pompé et converti en aérosol (ensemble de très fines particules liquides dans un flux gazeux) par nébulisation. Cet aérosol est ensuite transporté jusqu'au plasma où il est vaporisé, atomisé, excité et/ou ionisé. Chaque atome ou ion excité émet une radiation caractéristique lors de son retour à l'état fondamental. L'intensité de chacune des longueurs d'onde émises est directement proportionnelle à la quantité d'atomes de l'espèce impliquée. Un photomultiplicateur, placé dans le champ, convertit l'intensité lumineuse observée pour chaque longueur d'onde en un courant électrique d'intensité

proportionnelle à la concentration en élément dosé. Un appareil ICP AES classique comprend donc les éléments suivants :

- un système d'introduction d'échantillon qui permet d'amener l'échantillon au plasma,
- une torche plasma ;
- un générateur haute fréquence ;
- un système optique qui analyse le spectre émis ;

des systèmes de détection et de traitement du signal qui permettent les déterminations qualitatives et quantitatives à partir du rayonnement émis.

➤

2.6.2. Mise en solution

L'échantillon de granulométrie inférieure ou égale à 100 μm , préalablement séché à 110°C pendant 24 heures, est pesé (50 mg) puis introduit dans un tube en téflon. Il est ensuite dissous par l'action de 9 mL du fluorure d'hydrogène HF (28% en volume) et de 3 mL de l'acide nitrique HNO₃ (68% en volume) dans un dispositif micro-onde (CEM, MARS 5). La dissolution est réalisée au cours d'une montée (en 35 min) en température (T_{max} = 180°C) et en pression (pression atteinte = 3 MPa), suivie d'un palier de 20 min. La descente se fait à la température ambiante. La mise en solution est une étape capitale pour l'obtention de résultats fiables et reproductibles. Tout doit donc être fait pour éviter les contaminations, la dissolution incomplète ou la perte de matière.

2.7. Caractéristiques mécaniques des fibres de KénaF

2.7.1. Résistance à la traction

La caractérisation mécanique des fibres de kénaF procède de la même méthodologie que les fibres de coton. Les fibres sont collées sur un cadre en papier de 3,5 cm de hauteur et 2 cm de largeur. Les longueurs de jauge utilisées sont de 5, 10, 20 et 30 mm. Le cadre est ensuite disposé dans les mors à serrage manuel de la machine d'essai (Instron type 5566) munie d'une cellule de 10 kN pour l'essai de traction monotone uniaxial. La sollicitation est appliquée à vitesse de déplacement de traverse constante (soit 10% de l_0 par minute). Pendant l'essai, la force appliquée sur l'échantillon et le déplacement de son point d'application (déplacement de la traverse mobile) sont enregistrés.

2.7.2. Approche statistique selon le formalisme de Weibull

Les fibres végétales en général et en particulier les fibres de kénaF contiennent des défauts intrinsèques développés lors de sa croissance mais également des défauts induits par les différents traitements mécaniques permettant son extraction. Une approche statistique selon le formalisme de Weibull [19] a été menée sur les valeurs de contrainte à la rupture pour chacune des sept variétés étudiées. Cette méthode d'étude utilise un concept de rupture exclusif à partir d'un seul défaut. Elle fournit un indicateur de la fiabilité d'un matériau représentatif de la

dispersion des contraintes pour une rupture fragile. Cet indicateur est le module de Weibull (m).

L'approche de Weibull s'appuie sur plusieurs hypothèses [20, 21] :

- ✚ le matériau doit présenter une rupture fragile ;
- ✚ la rupture est contrôlée par la présence d'un défaut critique ;
- ✚ la rupture du matériau intervient au moment de la rupture de l'élément le plus faible (contrairement à une autre théorie consistant à dire qu'après la rupture d'un élément la charge est redistribuée sur les autres éléments, la rupture du matériau se produit lorsque l'ensemble ne peut plus résister à la charge redistribuée), aucune interaction entre les zones de contraintes autour des défauts ;
- ✚ le matériau est supposé homogène à grande échelle. La probabilité de trouver un défaut est la même partout.

Selon cette théorie, la probabilité de survie d'une fibre de longueur L soumise à une contrainte σ est donnée par la relation II.8

$$P_s = \text{Exp} \left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \text{Relation II. 8}$$

Cette équation est connue sous le nom d'équation de Weibull à trois paramètres. σ_0 est la contrainte caractéristique (paramètre d'échelle) et L_0 est la longueur moyenne de fibre ne contenant qu'un seul défaut. σ_u est la contrainte seuil de rupture ; elle est prise égale à 0 afin de simplifier l'analyse [22].

Finalement on en déduit l'expression de la probabilité de survie P_s (relation II.9)

$$P_s = \text{Exp} \left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \text{Relation II. 9}$$

La probabilité de rupture est donc :

$$P_r = 1 - P_s ; P_r = 1 - \text{Exp} \left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \text{Relation II. 10}$$

Si on normalise l'équation par rapport à L_0 , pour des raisons de simplicité, on obtient alors :

$$P_r = 1 - \text{Exp} \left[-L^* \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \text{Relation II. 11}$$

L^* est maintenant sans dimension et σ_0 est exprimée en MPa

Dans la pratique, les valeurs des contraintes à rupture σ_i sont rangées par ordre croissant pour les n échantillons identiques testés dans les mêmes conditions expérimentales. Ainsi, la probabilité de rupture de l'échantillon de rang i peut être calculée à l'aide de différents estimateurs

$$P_r = \frac{i}{n+i} \quad \text{Relation II. 12}$$

Cet estimateur était le plus utilisé pour des populations d'échantillons supérieures à 20. Cependant, des études plus récentes ont montré qu'il biaise davantage les résultats obtenus que l'estimateur suivant :

$$P_r = \frac{i-0,5}{n} \quad \text{Relation II. 13}$$

Ce deuxième estimateur est le plus approprié pour des populations d'échantillons comprises entre 20 et 50. C'est cet estimateur qui sera utilisé ici

$$P_r = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad \text{Relation II. 14}$$

Cet estimateur est utilisé dans le cas de populations d'échantillons inférieures à 6.

$$P_r = \frac{i-\frac{3}{8}}{3+\frac{1}{4}} \quad \text{Relation II. 15}$$

Ce dernier estimateur est utilisé dans le cas de populations d'échantillons inférieures à 10

La probabilité de survie s'écrit :

$$P_s = 1 - \frac{i-0,5}{n} \quad \text{Relation II. 16}$$

la relation (II.11) peut alors être reformulée (relation II.17)

$$\ln \ln \left(\frac{1}{P_s} \right) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) + \ln(L) \quad \text{Relation II. 17}$$

Dans le cas d'une distribution homogène de défauts d'un même type dans le matériau, la représentation de $\ln \ln(1/P_s)$ en fonction de $\ln(\sigma)$ est une droite de pente m . Des exemples de tracés pour des variétés de fibres de lin sont présentés dans la Figure II. 14.

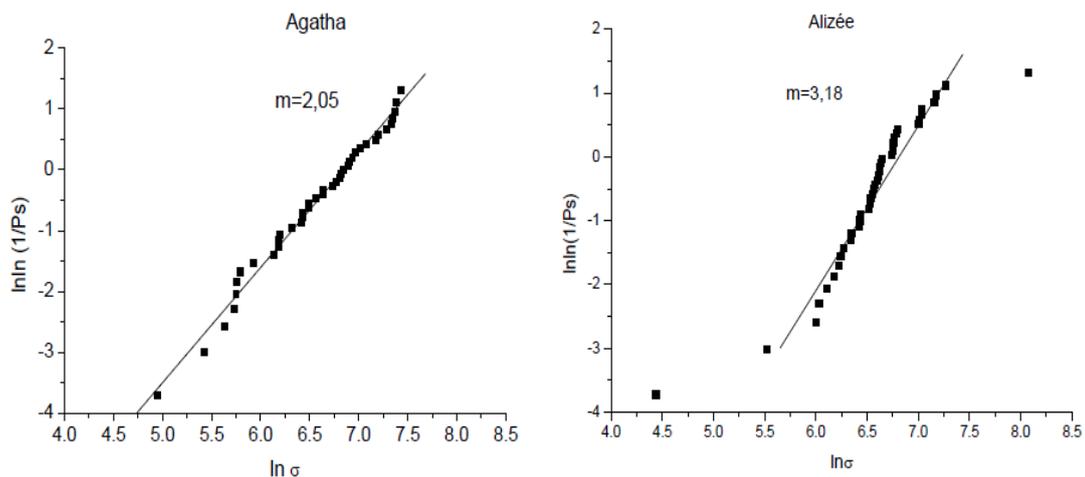


Figure II. 14 : Distributions de Weibull représentant la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture pour deux variétés de lin [23]

2.8. Caractéristiques géotechniques

2.8.1. Analyse granulométrique

Le champ adéquat d'application technologique de matériaux argileux est fortement fonction de la connaissance de leurs caractéristiques granulométriques. Basées sur des principes variés : séparation mécanique ou par l'intermédiaire d'un fluide (gaz ou liquide), variation de résistance électrique, imagerie, diffraction ou absorption de rayonnements, les techniques d'analyse granulométrique (distribution de différents grains ou particules en fonction de leurs poids, taille, forme...) sont multiples. Les plus courantes sont :

- le tamisage ;
- la sédimentométrie ;
- la sédigraphie ;
- le compteur de Coulter ;
- l'analyse par imagerie (microscopie) ;
- la diffraction laser.

Néanmoins, toutes ces techniques ne peuvent être appliquées et/ou appropriées à la même fraction granulométrique. Le choix de la méthode d'analyse, lié aux objectifs de notre étude, repose surtout sur la taille des particules mais également sa distribution. Dans le cadre de ce travail, les différentes techniques granulométriques appliquées sont le tamisage, la sédimentométrie et la diffraction laser.

2.8.1.1. Tamisage et sédimentométrie

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie sont menées selon les normes NF P18-560[24] et NF P94-057 [25], respectivement.

Le tamisage est pratiqué pour des grains de diamètre supérieur à 80 μm , et la sédimentométrie pour les grains les plus fins. La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente (loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

2.8.1.2. Granulométrie par diffraction laser

La granulométrie laser est une technique permettant la quantification de la distribution des tailles des particules par le calcul des rayons et de la fréquence statistique en classes de taille. Elle est une technique de mesure indirecte couramment utilisée et donne accès à la mesure de tailles généralement comprises entre 0,05 et 900 μm . Le principe de l'analyse granulométrique par diffraction laser est basé sur les théories de diffraction de Fraunhofer et de Mie (Figure II. 15), ainsi que sur la théorie de la sphère équivalente qui stipulent que l'angle de diffraction du rayon laser émis par une source de lumière intense et cohérente est inversement proportionnel à la taille de la particule [26, 27, 28].

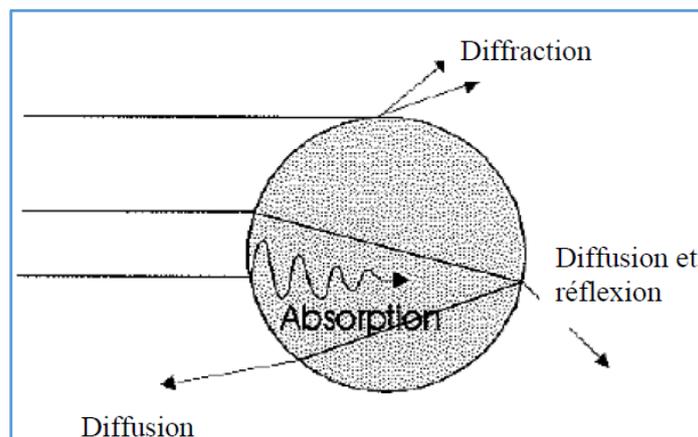


Figure II. 15: Phénomènes physiques impliqués dans la théorie de Mie

➤ Modèle de Fraunhofer

La théorie de Fraunhofer indique que lorsqu'une particule est éclairée par un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, il apparaît un motif de diffraction sous forme de franges concentriques alternativement claires et sombres [29]. Ainsi donc lorsque la dimension de la particule est grande devant la longueur d'onde incidente, ou lorsque le matériau est très absorbant, l'effet de bord des particules contribue pour une part prépondérante à l'intensité totale diffusée.

L'interférence provient alors principalement du contour de la particule, c'est-à-dire de la diffraction créée par la courbure de la lumière à l'interface. Dans ce cas, le modèle mathématique utilisé pour le calcul de la courbe granulométrique est la théorie de Fraunhofer qui présente l'avantage de s'affranchir totalement des propriétés optiques de l'échantillon et du milieu porteur.

➤ Modèle de Mie

En revanche, lorsque la dimension de la particule avoisine la longueur d'onde incidente, la théorie de Fraunhofer n'est plus adaptée à la description de la diffusion car les phénomènes de réflexion et de réfraction interviennent pour une part non négligeable dans l'intensité diffusée. C'est alors la théorie de Mie qui s'applique, laquelle prend en compte les indices de réfraction de l'échantillon et du milieu porteur. Ceci signifie que le faisceau laser traversant la cellule d'analyse va se propager sans déflexion jusqu'à ce qu'il rencontre une particule dont l'indice de réfraction est différent de l'indice de la phase continue. Ce changement d'indice va créer une réfraction du faisceau laser. La partie réfractée de la lumière pénétrant dans la particule va ressortir en étant toujours soumise aux phénomènes de réflexion et réfraction dus à la différence des milieux. En ayant subi plusieurs variations de son axe de propagation, le rayon va finalement arriver sur le détecteur.

Le granulomètre Malvern Mastersizer 2000 utilise cette théorie pour l'ensemble du spectre granulométrique bien que celle-ci se réduise à la théorie de Fraunhofer lorsque les particules sont de taille plus importante.

➤ Théorie de la sphère équivalente

Cette théorie est basée sur l'impossibilité de caractériser la géométrie d'un grain grâce à une seule valeur de taille. Dans le cas d'un parallélépipède rectangle, par exemple, trois mesures sont nécessaires pour caractériser la taille de l'objet. Seule une sphère parfaite peut être caractérisée par une seule valeur de taille qui est son diamètre. Le but de la théorie de la sphère équivalente est de décrire par une seule valeur la taille d'un objet en trois dimensions.

D'autres valeurs uniques caractéristiques d'une particule sont mesurables : sa masse par exemple. S'il était possible de déterminer la masse de chaque particule, le rayon d'une sphère de masse équivalente pourrait être calculé par la formule suivante :

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}} \qquad \text{Relation II. 18}$$

m : la masse de la particule,

r : le rayon de la sphère,

ρ : la masse volumique de la particule.

Le diamètre 2r de la sphère du même poids que la particule est donc calculable. C'est la théorie de la sphère équivalente. Une propriété de la particule est donc mesurée et rapportée à une sphère de diamètre calculable, donnant un nombre unique pour caractériser la taille de la particule.

La taille d'une particule sera donc toujours rapportée, au granulomètre laser, à la taille de la sphère de volume équivalent à cette particule. Par exemple, le diamètre de la sphère équivalente à un cylindre de 20 μm de diamètre et 100 μm de longueur est de 39,1 μm . Un autre cas est la mesure d'une particule aplatie (cas des particules argileuses). Une particule de 20 μm de diamètre et de 2 μm d'épaisseur donnera un diamètre de la sphère équivalente d'environ 5 μm . Par tamisage, ces deux particules auraient donné la même valeur granulométrique. Grâce à la diffraction laser, ces particules apparaîtront différentes.

Les distributions granulométriques des sols étudiés sont obtenues à l'aide d'un granulomètre laser MASTERSIZER 2000 MALVERN. Le matériau brut est mis en suspension dans de l'eau osmosée, contenant comme défloculant de l'hexamétaphosphate de sodium (HMP), à raison de 1 gramme par litre. La suspension obtenue est préalablement soumise durant 5 minutes aux ultrasons pour désagglomération avant d'être introduite (quelques gouttes) dans la machine.



Figure II. 16: Granulomètre Laser MASTERSIZER 2000 MALVERN

2.8.2. Les limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg est menée selon la norme NF P 94-051[30]. Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_l),
- le passage de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_l - W_p$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité [31]. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

2.8.3. L'essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène est conduit selon la norme NF P 94-068 [32]. Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction [33]. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce test consiste à former avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entourée d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu clair. On dira alors que le test est positif [34].

2.8.4. L'essai Proctor

L'essai est mené selon la norme NF P 94-093 [35]. Il a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identique des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche (δ_{OPM}) varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale (W_{OPM}). Il existe deux types d'essais Proctor. Selon l'intensité de compactage utilisé, l'essai sera appelé essai Proctor normal ou essai Proctor modifié. L'essai Proctor normal a été choisi pour notre étude.

2.8.5. Equivalent de sable

L'essai est fait selon la norme NF EN 933-8 [36]. Réalisé sur la fraction des matériaux passant au tamis de 5 mm, l'essai d'équivalent de sable rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les plus fins (argiles par exemple). Selon la valeur de l'Equivalent de Sable (ES) obtenu, le sol est ainsi qualifié.

2.8.6. Teneur en matières organiques

La détermination de la teneur en matières organiques est effectuée par attaque à l'eau oxygénée [37]. La teneur en matières organiques (C_{MOC}) contenues dans le sol est égale au rapport de la différence entre la masse initiale de l'échantillon m_o et la masse de l'échantillon après la réaction m_1 à la masse initiale d'essai m_o (100 grammes).

$$C_{MOC} = \frac{100(m_o - m_1)}{m_o}$$

Relation II. 19

La masse m_1 est obtenue après les opérations suivantes :

- peser 100 g d'échantillon et le mettre dans un bécher de 500 mL ;
- ajouter 200 cm³ d'eau distillée et 20 cm³ d'eau oxygénée, 10 volumes ;
- laisser reposer le mélange pendant 2 heures ;
- sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de masse ;
- Peser le mélange.

2.9. Confection des Blocs de Terre Comprimés (BTC)

Dans le cadre de notre étude nous confectionnons les éprouvettes 4*4*16 cm³ en un premier temps afin d'étudier les comportements de notre matériau terre et dans un second temps les blocs de maçonnerie 29,5*14*9 cm³.

2.9.1. Confection des éprouvettes 4*4*16 cm³

Les éprouvettes 4*4*16 cm³ sont réalisées en utilisant la technique classique (malaxage, compactage et démoulage). Le sol sec est tout d'abord concassé grossièrement pour obtenir des particules de dimension inférieure à 5 mm. La préparation des mélanges s'effectue en ajoutant des liants et/ou des fibres prédécoupées au sol pour un malaxage à sec dans un malaxeur de

laboratoire de marque Perrier Controlab de type B0026/F (Figure II. 17) pendant 2 minutes. L'eau est ensuite versée. Le mélange est ensuite placé dans des moules à éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Figure II. 18). Il est alors compacté selon le mode statique à simple effet par une presse (Figure II. 19).



Figure II. 17: Malaxeur ayant servi à l'élaboration des éprouvettes

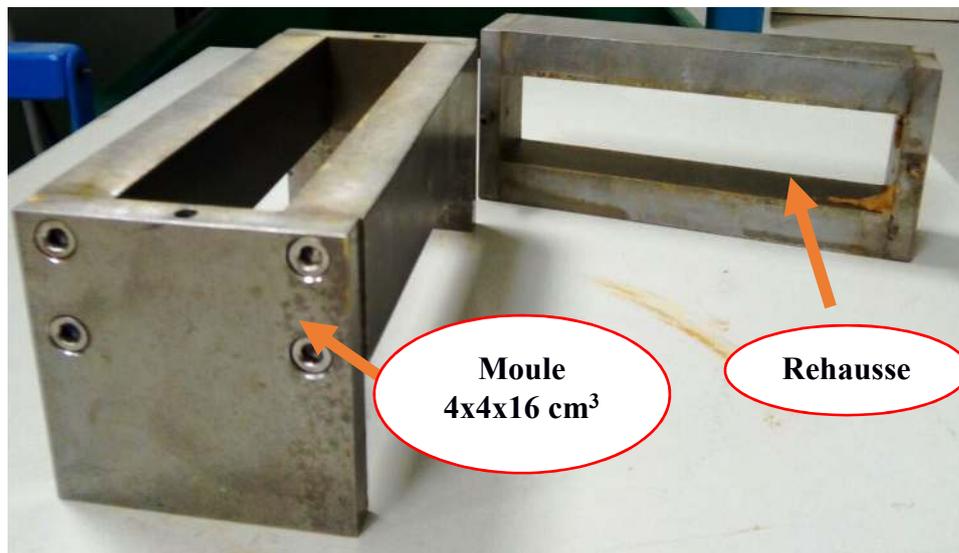


Figure II. 18 : Image du moule $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ utilisé



Figure II. 19: Presse pour la confection des BTC et pour les essais de flexion et de compression

2.9.2. Confection des blocs de maçonneries

Pour fabriquer les blocs de maçonnerie de dimension $29,5*14*9 \text{ cm}^3$ nous utilisons la même procédure que celle des éprouvettes $4*4*16 \text{ cm}^3$ sauf que dans ce cas la « MecoPress » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et un plus grand malaxeur ont été utilisés. En effet la MecoPress est une presse à briques de terre compressée (BTC) fabriquée et commercialisée par le groupe « MecoConcept » et qui regroupe un concentré d'innovations. Les caractéristiques de la MecoPress sont regroupées dans le

Caractéristiques	Valeurs
Changement de moule	15 min
Temps de cycle	17 secondes
Moteur, 230V monophasé*	1,5 kW
Consommation moyenne	0,3kWh
Pression hydraulique max	180 bars
Force de compression théorique	30 tonnes

Tableau II. 6.

Caractéristiques	Valeurs
Changement de moule	15 min
Temps de cycle	17 secondes
Moteur, 230V monophasé*	1,5 kW
Consommation moyenne	0,3kWh
Pression hydraulique max	180 bars
Force de compression théorique	30 tonnes

Tableau II. 6 : Données techniques de la MecoPress



Figure II. 20 : Malaxeur ayant servi à élaborer les blocs



Figure II. 21 : Presse MecoPress pour BTC

2.10. Optimisation de la teneur en eau

D'après nos recherches bibliographiques, le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux, et la détermination de la teneur en eau optimale pour le BTC à partir de l'essai Proctor est inappropriée, car l'énergie de compactage n'est pas la même que celle d'un compactage statique usité pour la fabrication des BTC. Nous procédons donc directement, en appliquant un compactage statique par le biais d'une presse hydraulique. Dans le but de trouver une teneur en eau et une contrainte de compactage optimales, nous déterminons le poids volumique sec de chaque éprouvette formulée en faisant varier la teneur en eau et la contrainte de compactage. Nous faisons varier la teneur en eau autour de deux points de la teneur en eau optimale obtenue à l'essai Proctor et la contrainte de compactage de 1 à 7 MPa. Nous utilisons la relation II.20 pour la détermination du poids volumique sec :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+W} \quad \gamma = \frac{mt}{vt} * g \quad \text{Relation II. 20}$$

Avec γ_d le poids volumique sec en N/m³ ; γ le poids volumique humide en ; mt la masse du bloc humide en kg ; vt le volume du bloc humide ; ω la teneur en eau du bloc et g l'intensité de la pesanteur en N/kg.

2.11. Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés afin de faciliter la lecture du mémoire. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules qui désignent la première lettre de chaque constituant du mélange, et des chiffres qui représentent le taux de chaque constituant dans le mélange. A titre d'exemple, $BF_{0,5}C_3$ désigne un bloc de

terre comprimée renforcé par 0,5% de fibres de longueur 3cm et stabilisé par 3% de ciment. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le Tableau II. 7

Code	Désignation
B_0	Bloc de terre comprimée sans aucun ajout
$BF_{0,5}^{0,5}$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 0,5 cm
$BF_{0,5}^1$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 1 cm
$BF_{0,5}^2$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 2 cm
$BF_{0,5}^3$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm
$BF_1^{0,5}$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1% de fibre de longueur 0,5 cm
BF_1^1	Bloc de terre comprimé renforcé par 1% de fibre de longueur 1 cm
BF_1^2	Bloc de terre comprimé renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm
BF_1^3	Bloc de terre comprimé renforcé par 1% de fibre de longueur 3 cm
$BF_{1,5}^{0,5}$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 0,5 cm
$BF_{1,5}^1$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 1 cm
$BF_{1,5}^2$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 2 cm
$BF_{1,5}^3$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 3 cm
BC_3	Bloc de terre comprimé stabilisé par 3% de ciment
BC_5	Bloc de terre comprimé stabilisé par 5% de ciment
BC_7	Bloc de terre comprimé stabilisé par 7% de ciment
$BF_{0,5}^3 C_3$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 3% de ciment
$BF_{0,5}^3 C_5$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 5% de ciment
$BF_{0,5}^3 C_7$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 7% de ciment
$BF_{1,5}^2 C_3$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 3% de ciment
$BF_{1,5}^2 C_5$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 5% de ciment
$BF_{1,5}^2 C_7$	Bloc de terre comprimé renforcé par 1,5% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 7% de ciment
$BC_3 L_5$	Bloc de terre comprimé stabilisé par 3% de ciment et 5% de laitier de haut fourneau
$BC_3 L_{10}$	Bloc de terre comprimé stabilisé par 3% de ciment et 10% de laitier de haut fourneau
$BC_5 L_5$	Bloc de terre comprimé stabilisé par 5% de ciment et 5% de laitier de haut fourneau
$BC_5 L_{10}$	Bloc de terre comprimé stabilisé par 5% de ciment et 10% de laitier de haut fourneau
$BF_{0,5}^3 C_3 L_{10}$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 3% de ciment et 10% de laitier de haut fourneau
$BF_{0,5}^3 C_5 L_{10}$	Bloc de terre comprimé renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 5% de ciment et 10% de laitier de haut fourneau

Tableau II. 7 : Codification des mélanges

2.12. Cure des blocs

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de sa fragilité. Il est ensuite conservé dans une chambre climatique à une température de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ afin d'éviter un dessèchement

trop rapide. Comme pour les bétons, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période minimum de cure de 7 jours est indispensable. Pour étudier l'influence du mode de cure sur le comportement mécanique des blocs, nous avons exploré les modes suivantes :

- Le bloc stabilisé aux liants est conservé dans une chambre climatique à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ jusqu'à stabilisation de sa masse

- Le bloc stabilisé est placé en un premier temps dans une enceinte climatique à 20°C et à 90% d'humidité relative pendant 28 jours afin de favoriser au maximum l'hydratation des liants, puis en un second temps dans la chambre climatique à 20°C et à 50% d'humidité relative jusqu'à stabilisation de sa masse.

- Les blocs stabilisés au liant sont couverts d'un film de plastique et placés dans la chambre climatique à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ pendant 28 jours. Après cette période de 28 jours le film plastique est enlevé et certains blocs sont laissés dans la chambre climatique et d'autres placés à l'étuve à 40°C jusqu'à stabilisation de leur masse.



Figure II. 22 : Les éprouvettes dans la chambre climatique à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$



Figure II. 23 : Les éprouvettes dans la chambre climatique à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $90\% \pm 5\%$



Figure II. 24 : Les éprouvettes recouvertes des films en plastique dans la chambre climatique à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$

2.13. Méthodes de caractérisation hygro-thermomécaniques des blocs

2.13.1. Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre crue comprimée. Il s'agit de soumettre une éprouvette $4*4*8\text{ cm}^3$ dans le cas des éprouvettes $4*4*16\text{ cm}^3$ et un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de ciment dans le cas des blocs de maçonnerie selon la norme XP P 13-901 à une compression simple jusqu'à la rupture. Afin de favoriser les déplacements transversaux libres de l'échantillon, un système anti-fretage constitué d'une membrane de Néoprène graissée et d'une plaque est utilisé (Figure II. 25).

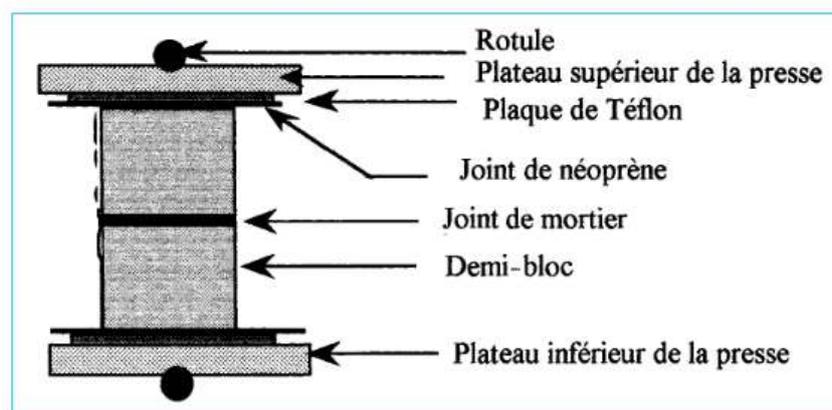


Figure II. 25 : Schéma du principe de l'essai de compression [38]

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_C = \frac{F}{S} \quad \text{Relation II. 21}$$

R_C : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Force maximale en (N).

S : Section comprimée en mm^2

La résistance à la compression moyenne des blocs est la moyenne arithmétique des résistances à la compression de 6 essais réalisés sur des échantillons d'une même formulation.

2.13.2. Résistance à la compression à l'état humide

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la flexion et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable. Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté le fait que les deux demi-blocs sont d'abord immergés complètement dans l'eau durant deux heures (XP P13-901).

2.13.3. Résistance à la flexion à l'état sec et à l'état humide

L'essai de flexion trois points (Figure II. 26) est effectué sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 40x40x160 mm³ et des blocs de maçonnerie à l'état sec et à l'état humide (immersion totale dans l'eau pendant deux heures). Les mesures sont réalisées sur une presse Mécanique Zwick d'une capacité de 50 kN. La vitesse de déplacement de traverse est de 0,1 mm.min⁻¹. Les valeurs de la force et du déplacement de traverse sont enregistrées simultanément.

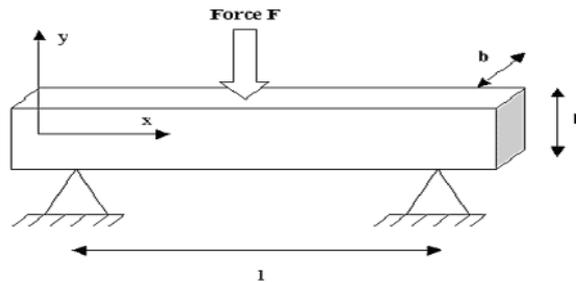


Figure II. 26 : Schéma du montage de flexion 3 points

L'éprouvette repose sur deux appuis simples distants de $l = 100$ mm et la charge F est appliquée au centre de l'échantillon, symétriquement par rapport aux appuis (Figure II. 26). Les composites de section $b \times h$ étant supposés homogènes, la contrainte normale de traction σ appliquée sur la section de la poutre prismatique est déterminée par l'équation :

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad \text{Relation II. 22}$$

2.14. Détermination des coefficients de transfert hydrique

2.14.1. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (figure 2.20). Le coefficient d'absorption d'eau C_b correspond au taux d'absorption après un temps égal à 10 min. Le coefficient C_b d'absorption d'eau est exprimé par la formule suivante :

$$C_b = 100 * \frac{(m_h - m_s)}{s\sqrt{t}} \quad \text{Relation II. 23}$$

$m_h - m_s$: est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai

S : surface de la face immergée, en centimètres carrés ;

t : est la durée d'immersion du bloc en minutes.

Il est considéré qu'une brique est :

Faiblement capillaire lorsque $C_b \leq 20$; Peu capillaire lorsque $C_b < 40$

2.14.2. Absorption totale d'eau

Cet essai consiste à immerger le bloc dans un bac à eau pendant des durées différentes : 1, 2, 3 et 4 jours, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids du bloc à l'état sec P_s . L'absorption totale est déterminée par la formule suivante :

$$A(\%) = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \quad \text{Relation II. 24}$$

2.14.3. Imbibition par capillarité

Les propriétés d'imbibition par capillarité d'un matériau poreux sont directement liées à la taille et à la forme des pores, ainsi qu'à la connectivité du réseau poreux. Les essais d'imbibition d'eau par capillarité renseignent sur les cinétiques de succion en régime bi-phasique eau/air.

Le principe de ces essais est donc de suivre la masse d'eau absorbée par le matériau au cours du temps afin de déterminer selon la loi de *Washburn* (relation II.5) (influence de la gravité étant négligeable) le coefficient de cinétique de prise de masse en eau A [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$] et le coefficient d'ascension de la frange capillaire B [$\text{m}/\text{s}^{0.5}$] (relations II.6 et II.7)

$$LdL = \frac{r_c \sigma}{4\eta} dt ; \quad \text{Influence de la gravité étant négligeable} \quad \text{Relation II. 25}$$

$$dw = A\sqrt{t} , \text{ avec } A = \rho\pi r_c^2 \sqrt{\frac{r_c \sigma}{2\eta}} \quad \text{Relation II. 26}$$

$$L = B\sqrt{t} , \text{ avec } B = \sqrt{\frac{r_c \sigma}{2\eta}} \quad \text{Relation II. 27}$$

Où h [m] est la distance parcourue par le ménisque, r_c [m] est le rayon du capillaire, η [10^{-3} kg/m.s] est la viscosité dynamique de l'eau, σ [0.0723 N.m⁻¹] est la tension superficielle eau/vapeur, ρ est la masse volumique de l'eau et t [s] est le temps d'imbibition. La procédure de mesure des coefficients de *Washburn* suit la norme *NF B10-502* (1973), la préconisation *Unesco-RILEM n°II-6* (1978) et la norme européenne *EN 1925* (1999). Les essais sont effectués sur des éprouvettes $4*4*16$ cm³.

Les surfaces latérales des échantillons sont rendues imperméables et leur base est immergée sur 5 mm. Le bac d'essai est ensuite couvert afin de limiter l'évaporation et conserver une humidité relative de 100% autour des échantillons (Figure II. 27). La seule précaution à prendre consiste, avant chaque pesée et à l'aide d'un chiffon légèrement humide, à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon. Le suivi de masse des éprouvettes est réalisé à [1min ; 2min ; 3min ; 10min ; 15 min ; 30 min ; 1h ; 2h ; 4h ; 8h ; 12h ; 24h et 48h].



Figure II. 27 : Essai de remontée capillaire

La forme des courbes de capillarité renseigne sur l'homogénéité des réseaux [39]. En effet, pour un réseau uni-modal, (voir Figure II. 28.a), les valeurs maximales prises en compte dans la détermination graphique des coefficients A et B sont atteintes de manière synchrone. Ce cas reflète l'existence d'une famille de pore prédominante et bien connectée. Un autre cas peut être décrit (voir Figure II. 28.b) et qui s'exprime par des ruptures de pentes qui traduisent soit l'existence de deux ou plusieurs réseaux de pores distincts intervenant conjointement (avec des vitesses différentes), soit des hétérogénéités stratigraphiques marquées (en particulier pour les roches sédimentaires).

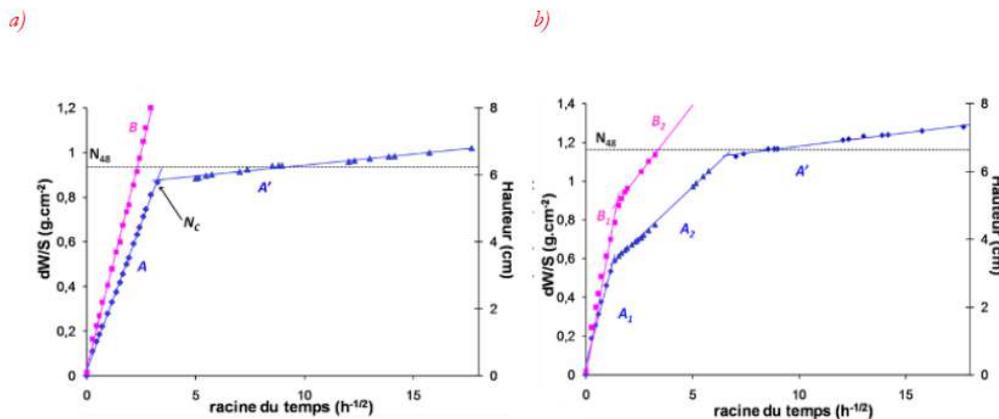


Figure II. 28 : Courbe de capillarité caractéristique a) d'un réseau homogène b) d'un réseau hétérogène. A et A' coefficients de prise de masse, B coefficient d'ascension de la frange capillaire, N_c porosité capillaire et N_{48} porosité libre [40]

2.15. Détermination des propriétés thermiques

La conductivité thermique et la chaleur volumique des matériaux sont déterminées sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en utilisant la méthode du film chaud. La mesure est réalisée sur des éprouvettes de masse stabilisée et initialement en équilibre thermique avec

l'environnement de mesure (laboratoire d'ambiance régulée à 20°C et 50 % d'humidité relative). Lors de la mesure, les 6 faces de l'éprouvette sont isolées thermiquement de l'ambiance du laboratoire par 10 cm d'isolant thermique (mousse de polyuréthane). Une puissance de chauffage de 266W/m² est imposée par un film chauffant (ruban de cuivre sur circuit imprimé). Les températures sur les faces chauffée et non chauffée sont chacune mesurées par un assemblage de 5 thermocouples de type K montés en parallèle permettant une mesure moyenne sur une surface d'environ 10 cm².

Les paramètres thermophysiques sont déterminés sur la phase finale de l'historique de température durant laquelle les évolutions des températures sur les faces chauffée et non chauffée sont parallèles (approximation aux temps longs).

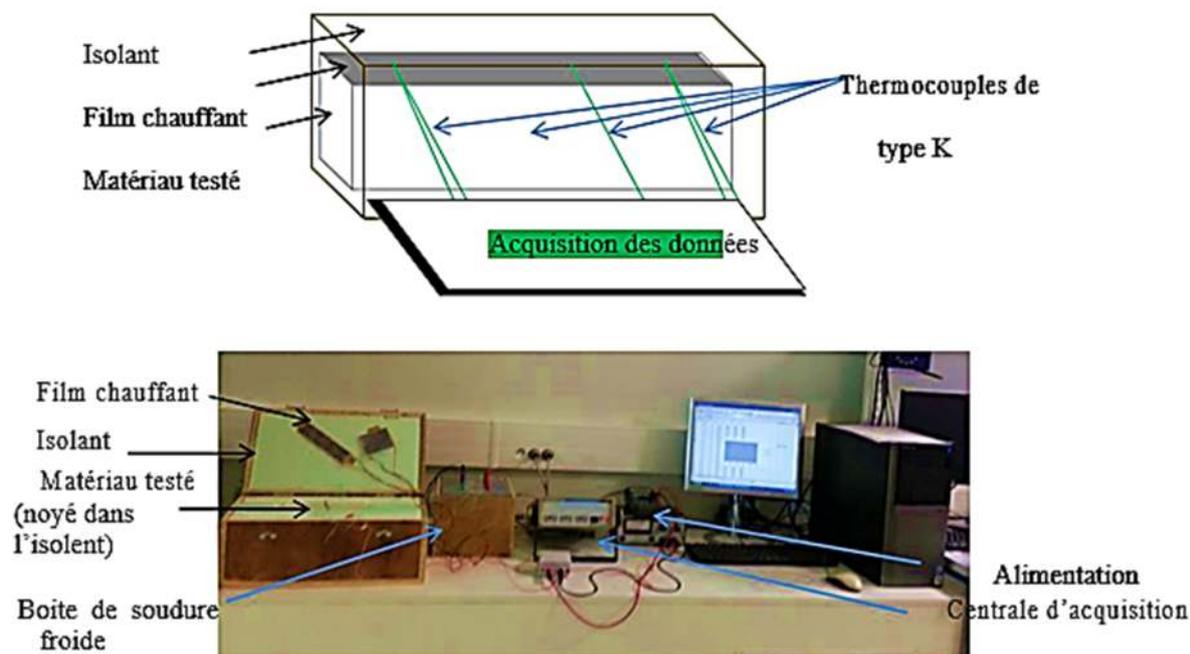


Figure II. 29 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des propriétés thermiques

2.16. Méthodes de caractérisation microstructurales des blocs

2.16.1. Porosimétrie par intrusion de mercure

La méthode d'intrusion au mercure constitue l'un des principaux outils d'investigation des matériaux poreux car elle permet une investigation du réseau poreux dans une plage étendue de tailles [41]. Le principe de la porosimétrie par intrusion au mercure consiste à mesurer le volume de mercure injecté dans l'échantillon poreux pour chaque palier de pression appliqué.

En raison de sa tension superficielle élevée, le mercure se comporte comme un liquide non-mouillant lorsqu'il est en contact avec la plupart des matières solides. Par conséquent, il ne pénètre dans les pores que sous une pression appliquée [42]. La pression (P) nécessaire pour introduire le mercure dans la matière poreuse est une fonction de l'angle de contact (θ), de sa tension superficielle (σ) et du rayon de pore (r). Cette interrelation est exprimée par la loi de Laplace (Relation II. 28)

$$p = -\frac{2\beta \cdot \cos \theta}{r}$$

Relation II. 28

Où β est la tension superficielle (0.485 N.m⁻¹) et θ est l'angle de contact entre le mercure et le pore (130°). Les échantillons de dimension 2,5*2,5*2,5 cm³ sont séchés d'abord à 40°C avant d'être introduits dans le pénétromètre.



Figure II. 30 : Descriptif d'un prosimètre au mercure utilisé

Le principal résultat de cette méthode est la distribution des tailles de pores et cela à partir d'une courbe caractéristique de l'essai $dV/d\log D=f(r)$. Elle traduit le volume de mercure injecté pour chaque rayon capillaire accessible et donc à partir de laquelle nous déterminons le type de porosité (micro, méso ou macro porosité) et le mode de distribution des pores : mono, bi ou poly modale. Cet essai peut présenter certaines imperfections (séchage préalable nécessaire, altération possible de la microstructure à des pressions élevées de mercure, les plus gros vides tels que les bulles d'air ou zones microporeuses présentes aux interfaces pâte-granulat ne peuvent non plus être correctement quantifiés, la structure poreuse dans les domaines mésoporeux et microporeux (ouverture de pores inférieures 6 nm) n'est pas complètement accessible par intrusion de mercure), mais cet essai reste un moyen de comparaison entre les différentes formulations étudiées.

2.16.2. Porosité accessible à l'eau

La porosité totale (n) d'un matériau poreux est définie comme le rapport du volume des vides (somme du volume d'eau et du volume d'air) sur le volume total de l'échantillon (relation II.29). Elle est exprimée en pourcentage.

$$n = \frac{V_v}{V_t} * 100 = \frac{(V_t - V_s)}{V_t} * 100$$

Relation II. 29

L'échantillon préalablement séché à 40°C est placé dans un dessiccateur étanche sur une grille en céramique perforée afin d'optimiser la surface de contact. Une fois le dessiccateur fermé, le vide est fait à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression

constante de 50 mbar. Ensuite, le vide est maintenu pendant au moins 4h. L'étape suivante est l'immersion dans l'eau déminéralisée à mi-hauteur des éprouvettes durant 48h et la dernière étape est l'immersion complète des éprouvettes dans l'eau déminéralisée durant 24h supplémentaires. A l'issue de la saturation, les éprouvettes saturées sont pesées, tout en restant immergées dans l'eau pour obtenir la masse en immersion M_{hyd} . Elles sont ensuite essuyées avec un chiffon humide puis pesées dans l'air pour obtenir la masse saturée dans l'air (M_{sat}). La densité de l'eau étant égale à 1, la porosité totale est calculée suivant la Relation II. 30

$$n = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{hyd}} * 100 \text{ avec } \begin{cases} V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho \omega} \\ V_t = \frac{M_{sat} - M_{hyd}}{\rho \omega} \end{cases} \quad \text{Relation II. 30}$$

On peut déduire de la valeur de la porosité totale, la teneur en eau maximale (w_{max}) qui correspond à la quantité d'eau maximale que l'échantillon peut retenir dans ses pores intra granulaires. Cette teneur en eau maximale est calculée comme suit (Relation II. 31)

$$\omega_{max} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Relation II. 31}$$



Figure II. 31 : Dispositif de saturation pour la détermination de la porosité accessible à l'eau

2.16.3. La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

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

- d'un canon à électrons et d'une colonne électronique, dont la fonction est de produire une sonde électronique fine sur l'échantillon ;
- d'une platine porte-objet permettant de déplacer l'échantillon dans les trois directions ;
- d'un détecteur permettant de capter et d'analyser les rayonnements émis par l'échantillon.

Le MEB permet de fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition élémentaire d'un objet solide.

La qualité des images obtenues en microscopie électronique à balayage dépend grandement de la qualité et de la préparation de l'échantillon à caractériser. Idéalement, celui-ci doit être absolument propre, si possible plat et conducteur des charges électriques (pour éviter les phénomènes parasites d'accumulation de charges). Toutes ces conditions imposent donc un travail préalable de découpe, de polissage si nécessaire et de métallisation (dépôt d'une fine couche d'un matériau conducteur électrique à la surface de l'échantillon).

Le microscope électronique à balayage utilisé est un ZEISS EVO®40 (Figure II. 32), équipé de détecteurs SEI (Secondary Electron Images) et BSE (Back-Scattered Electron). Il peut fonctionner sous vide poussé (HV) et sous vide partiel (LV). Il est également associé à un analyseur EDX de marque BRUKER (accélération 20 keV) pour l'identification des éléments chimiques.



Figure II. 32: Microscope électronique à balayage ZEISS EVO®40

3. Conclusion

L'analyse des matériaux argileux nécessite le couplage de plusieurs techniques complémentaires. Chaque technique apporte une nouvelle information ou confirme les informations déjà obtenues.

Ce chapitre a permis de présenter les matériaux qui font l'objet de ce travail de thèse. Les différentes techniques de préparation des échantillons et de caractérisation physique, chimique, structurale, thermique et mécanique ont été également décrites. Les résultats de ces caractérisations seront présentés dans le chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] **Bessoles, B., & Trompette, R.** *La chaîne panafricaine "zone mobile d'Afrique central (partie sud) et zone mobile soudanaise. Orléans: Bureau de recherches géologiques et minières, (1980).*
- [2] **AFFATON, P., LASSERE, J. L., & Vincent, P.** *Note explicative des cartes géologiques au 1/200000 de la République du Togo et de la République populaire du Bénin entre les 9e et 10e degré de la latitude Nord (feuille Bssari-Djoujou et feuille Parakou-Nikki . Orleans : Rapp BRGM N° 78 RDM 055 AF, (1978).*
- [3] **Alidou, S.** *Etude géologique du bassin Paléozoïque de Kandi (Nord Est du BENIN). Dijon: Thèse de Doctorat d'Etat, (1983).*
- [4] **IHETA, B., KIROV, M., & TSAWLASSOU, G. E.** *Rapport sur les recherches géologiques d'argiles dans la zone du bassin côtier:Secteur Gbédji - Kotovi , Massi , Zogbodomè. Bénin: Rapport, (1983)*
- [5] **Bogue R.H.** *Chemistry of Portland Cement. New York, Reinhold, vol. 790, (1955).*
- [6] **Brunauer, S., Emmet, & Teller. (1938).** *Adsorption of gasses in multimolécular layers. Journal of American Chemistry Society, Vol. 60, Pp.309-319, (1955).*
- [7] **PIALY, P.** *Étude de quelques matériaux argileux du site de Lembo (Cameroun) : minéralogie, comportement au frittage et analyse des propriétés d'élasticité. Thèse de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LOMOGES, (2009).*
- [8] **KEITA, I.** *Géomatériaux argileux du Mali pour la construction.Propriétés mécaniques, durabilité et rôle des tanins. Thèse de Doctorat, Université des Sciences Techniques et Technologiques de Bamako ; Université de Limoges, (2014).*
- [9] **Camille, M.** *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. Thèse de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, (2010).*
- [10] **ESHARGHAWI, A.** *Élaboration de matériaux poreux à base de mullite par procédé SHS. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, (2009).*
- [11] **PROTAS, J..** *Diffraction des rayonnements Introduction aux concepts et méthodes. Dunod, (1999)*
- [12] **BRINDLEY, G. W., & BROWN, G.** *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical society Monograph, (1980).*
- [13] **JOUENNE, C. A.** *Traité de céramiques et matériaux minéraux. Septima, (1990).*

- [14] Segal, L., J.J. Creely, A.E. Martin Jr., and C.M. Conrad. "An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose using the X-Ray Diffractometer", *Textile Research Journal*, 1958, pp. 786-794, (1958).
- [15] Ouajai, S., & Shanks, R. A. *Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatment. Polymer Degradation and Stability*, Vol. 89, pp. 327-335, (2005).
- [16] David, S. *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment, influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges*, (2007).
- [17] NANA, K. L. *Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite-muscovite. Limoges : Thèse Doctorat de l'Université de Limoges (France)*, (2004).
- [18] SORGHO, B. *Caractérisation et valorisation de quelques argiles du Burkina Faso : application au traitement des eaux et aux géomatériaux de construction. Thèse de Doctorat, UNIVERSITE de OUAGADOUGOU*, (2013).
- [19] Weibull, W. A. « *A statistical distribution function of wide acceptability* », *appl. Mech*, vol. 18, p. 293–297, (1951).
- [20] Calvo M. « *Application of the Weibull statistics to the characterization of metallic glass ribbons* », *Journal of Materials Science*, vol. 24, no. 5, p. 1801–1808, (1989)
- [21] Zafeiropoulos, N. E., G. G. Dijon, et C. A. Baillie, « *A study of the effect of surface treatments on the tensile strength of flax fibres: Part I. Application of Gaussian statistics* », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 2, p. 621–628, (2007).
- [22] van der Zwaag, S. « *The concept of filament strength and the Weibull modulus* », *ASTM J. Test. Eval.*, vol. 17, no. 5, p. 292–298, (1989).
- [23] Thuault, A. *Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, France, Chimie des Matériaux*, (2011).
- [24] NF P18-560. *Analyse granulométrique par tamisage*. AFNOR, (Octobre 1978).
- [25] NF P94-057. *Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation*. AFNOR, (Mai 1992).
- [26] De Weerd C., Thoenes D., Goossens H.W.J. *Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. Particle charact*, 4, 14-19p, (1987).

- [27] Duval O., Gaillard H., Le Bissonnais Y. *Utilisation de la granulométrie à diffraction laser pour la caractérisation des matériaux-sols et des sédiments*. In: *Livre des résumés-Publications ASF, 8ème Congrès Français de Sédimentologie*, 36, 117, (2001).
- [28] Rawle A. *Basic principles of particle size analysis*. Malvern Technical paper, Disponible sur: www.malvern.co.uk, (2001).
- [29] Ferreol, V. *La granulométrie laser*. Ecole des Mines de Paris. Disponible dans http://www.ensmp.fr/Fr/CENRG/SCPI_TEP/DocsPersonnel/DocMateriel/Granulo.htm, (2002).
- [30] NFP94-051. *Détermination des limites d'Atterberg*. AFNOR, (Mars 1993).
- [31] MILLOGO, Y. *Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route)*. THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE OUAGADOUGOU, (2008).
- [32] NFP94-068. *Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche*. AFNOR, (Novembre 1993).
- [33] Osula, A. D. O. *Lime modification of problem laterite*. *Eng Geol.*, 30, 141-154, (1991).
- [34] Osula, A. D. O. *comparative evaluation of cement and lime modification of laterite*. *Eng Geol.*, 42, 71-81, (1996).
- [35] NFP94-093. *Détermination des références de compactage d'un matériau*. AFNOR, (Octobre 1999).
- [36] NF EN 933-8. *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable*. Paris: Association Française de Normalisation (AFNOR), (Août 1999).
- [37] Staljanssens M, Miuy J, Marcoen Fabry J, RasseL A. *Destruction de la matière organique par calcination a basse température en vue de l'analyse minéralogique des sols*. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 98: 393-403, (1975).
- [38] Olivier, M., Mesbah, A., El Gharbi, Z., & Morel, J. C. *Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée*. *Materials and Structures*, 30(9), 515-517, 1997.
- [39] Colas E. *Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration*. Thèse de doctorat. Ecole doctorale Sciences, technologies, santé, (2011).

- [40] **Bromblet P.** *Guide Altérations de la pierre. Association MEDISTONE*, (2010).
- [41] **Trabelsi A.** *Etudes numérique et expérimentale des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle*, (2010).
- [42] **Lu S-G, Malik Z, Chen D-P, Wu C-F.** *Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. CATENA;123:79–87*, (2014).

Chapitre

III. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

Le terme « sol » désigne la couche superficielle de l'écorce terrestre qualifiée selon sa nature ou ses caractéristiques productives (point de vue agronomique). En pédologie, il désigne la formation naturelle de surface en contact avec l'atmosphère, et qui résulte de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence des processus physiques, chimiques et biologiques. La partie superficielle du sol correspond à la partie arable des agronomes, qui est également influencée par l'homme.

Les sols argileux sont des matières minérales complexes dont l'usage nécessite une caractérisation préalable afin de pouvoir définir ses propriétés et par suite les domaines d'application appropriés.

Dans ce chapitre, nous présentons la caractérisation physico-chimique, géotechnique et mécanique des différentes matières premières utilisées dans cette étude, par des techniques telles que la diffraction des rayons X (DRX), la spectrométrie infrarouge (IR), les analyses thermique différentielle et thermogravimétrique (ATD/TG), la microscopie électronique à balayage (MEB)... Afin de faciliter la lecture, les échantillons de Baka seront notés BAK et ceux d'Etigbo ETI.

1. Caractérisation géotechnique des sols étudiés

1.1. Le taux d'humidité

Pour évaluer le taux d'humidité naturelle des échantillons, nous avons prélevé une masse M_1 que nous avons placée dans une étuve réglée à 105°C pendant 24 heures. Au sortir de l'étuve et après refroidissement, nous enregistrons une nouvelle masse M_2 .

Le taux d'humidité (ω) des deux échantillons étudiés a été évalué selon la relation II.1 du chapitre II. Les valeurs obtenues pour BAK et ETI sont respectivement 3,71 % et 4,54 %.

1.1.1. La perte au feu

Pour déterminer la perte au feu, une masse M_2 de l'échantillon est préalablement séchée à 105°C , puis elle est placée dans un four (*SYBRON type 6000 Furnace*) réglé à 1000°C pendant 2 heures. Après refroidissement, nous enregistrons une nouvelle masse M_3 . La perte au feu correspondant au pourcentage de matières volatiles est 6,99 % et 13,91 %, respectivement pour BAK et ETI. Cette perte au feu, déterminée à partir de la relation II.2 du chapitre II, correspondrait à la déshydroxylation des minéraux argileux présents dans l'échantillon et à leur décarboxylation. La valeur élevée de la perte au feu de ETI par rapport à BAK indique que le taux de fines que refermerait ETI est plus élevé que celui de BAK.

1.1.2. La densité

La densité des échantillons est déterminée à partir de la relation II.3 du chapitre II. Elle est de 2,65 et 2,57 pour BAK et ETI, respectivement. Ces valeurs indiqueraient la prédominance des minéraux argileux dans les deux échantillons. La valeur de la densité de l'échantillon ETI est très proche de celle du kaolin.

1.1.3. Teneur en matière organiques

Les teneurs en matière organique des échantillons des deux sites étudiés sont présentées dans le Tableau III. 1. BAK a une teneur en matière organique inférieure à 2%. C'est donc un sol très pauvre en matière organique qui peut être qualifié géotechniquement de sol inorganique [1,2]. La teneur en matière organique de ETI est légèrement supérieure au seuil de 2% et est acceptable géotechniquement. Ces faibles teneurs laissent présager que la matière organique aura un rôle négligeable dans les procédés de fabrication (stabilisation ou cuisson) des briques à partir de ces échantillons.

Echantillon	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	C_{MOC} (%)
BAK	248,93 ± 10,05	300,63 ± 8,50	299,93 ± 8,61	1,33 ± 0,31
ETI	220,92 ± 9,98	270,6 ± 10,11	269,45 ± 10,12	2,67 ± 0,04

Tableau III. 1 : Les teneurs en matières organiques de BAK et de ETI

1.1.4. Analyses granulométriques

1.1.4.1. Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie

Les courbes granulométriques totales (tamisage et sédimentométrie) des échantillons BAK et ETI sont présentées graphiquement sur les Figure III. 1 et III. 2

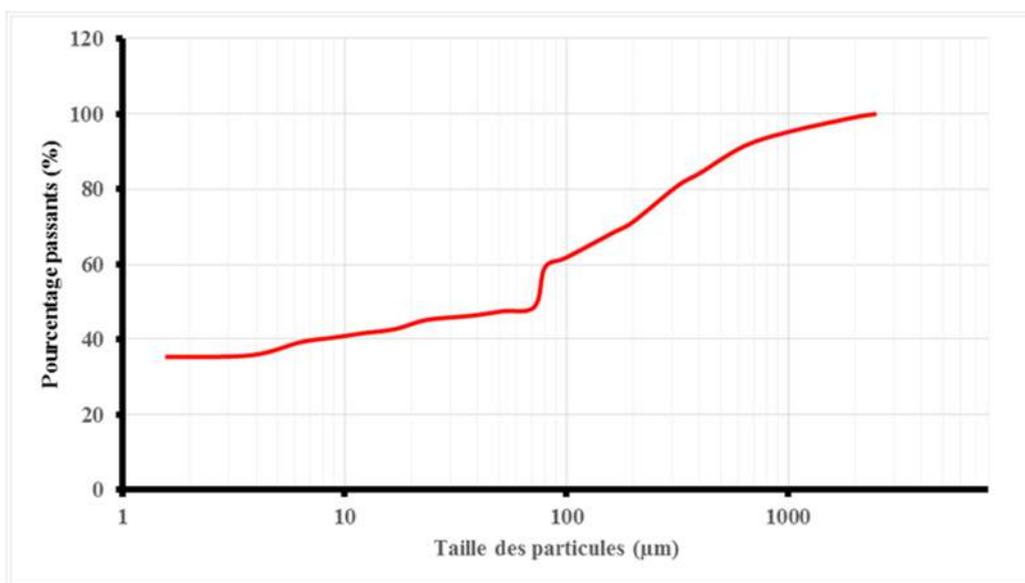


Figure III. 1 : Courbe granulométrique totale de BAK

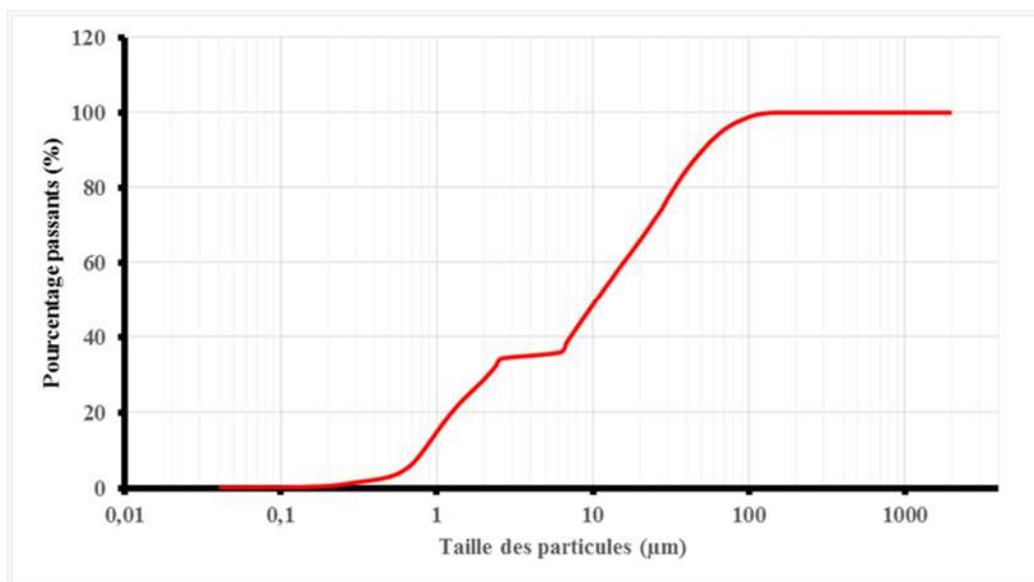


Figure III. 2 : Courbe granulométrique totale de ETI

L'examen de ces courbes nous a permis de déterminer les fractions granulométriques de nos échantillons comparées aux sols de références que nous présentons au niveau du

Echantillon	Produits finis	Fractions granulométriques	Stabilisants (principaux)	Référence
Sols de référence	Briques crues	Argile : 15 à 25% Limon : 20 à 30% Sable : 45 à 65% Optimal : (Argile : 20% Limon : 22 % Sable : 58%)	-	[]
	Briques crues stabilisées	Argile + Limon : 15% Sable fin : 30% Sable grossier : 30% Gravier fin 25%	Ciment (4 - 6% ou 8%)	[]
Argile : 35% sable fin : 25% sable grossier : 25% gravier fin 15%		Chaux (5 – 8% ou 12%)		
<i>BAK</i>		Argile : 14,8% Limon : 23,5% Sable : 61,7%	—	-
<i>ETI</i>		Argile : 43,5% Limon : 53,5% Sable : 3%	-	-

Tableau III. 2. De l'analyse de ce tableau, il ressort que BAK est un échantillon limono-sableux et ETI, un échantillon argilo-limoneux. En établissant une comparaison entre ces échantillons et ceux des sols de référence, BAK pourrait être éligible pour la confection des briques crues.

Echantillon	Produits finis	Fractions granulométriques	Stabilisants (principaux)	Référence
Sols de référence	Briques crues	Argile : 15 à 25% Limon : 20 à 30% Sable : 45 à 65% Optimal : (Argile : 20% Limon : 22 % Sable : 58%)	-	[3]

	Briques crues stabilisées	Argile + Limon : 15% Sable fin : 30% Sable grossier : 30% Gravier fin 25%	Ciment (4 - 6% ou 8%)	[4]
		Argile : 35% sable fin : 25% sable grossier : 25% gravier fin 15%	Chaux (5 - 8% ou 12%)	
<i>BAK</i>		Argile : 14,8% Limon : 23,5% Sable : 61,7%	—	-
<i>ETI</i>		Argile : 43,5% Limon : 53,5% Sable : 3%	-	-

Tableau III. 2 : Compositions granulométriques de BAK, ETI et quelques matériaux de référence

1.1.4.2. Analyse granulométrique de diffraction laser

Les courbes d'analyse granulométrique complète des échantillons BAKA et ETI sont représentées respectivement sur la Figure III. 3 et la Figure III. 4.

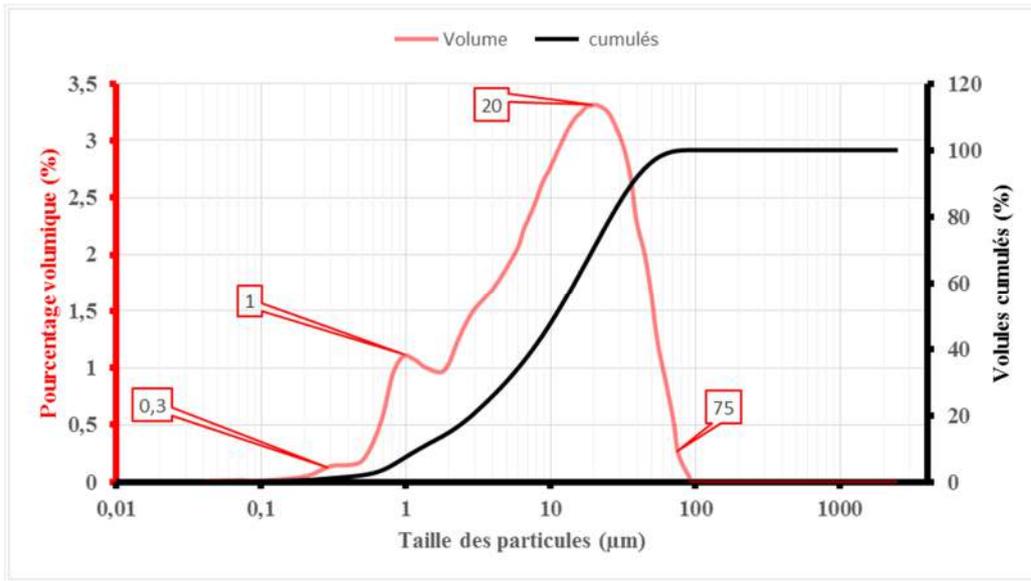


Figure III. 3 : Distribution granulométrique de BAK

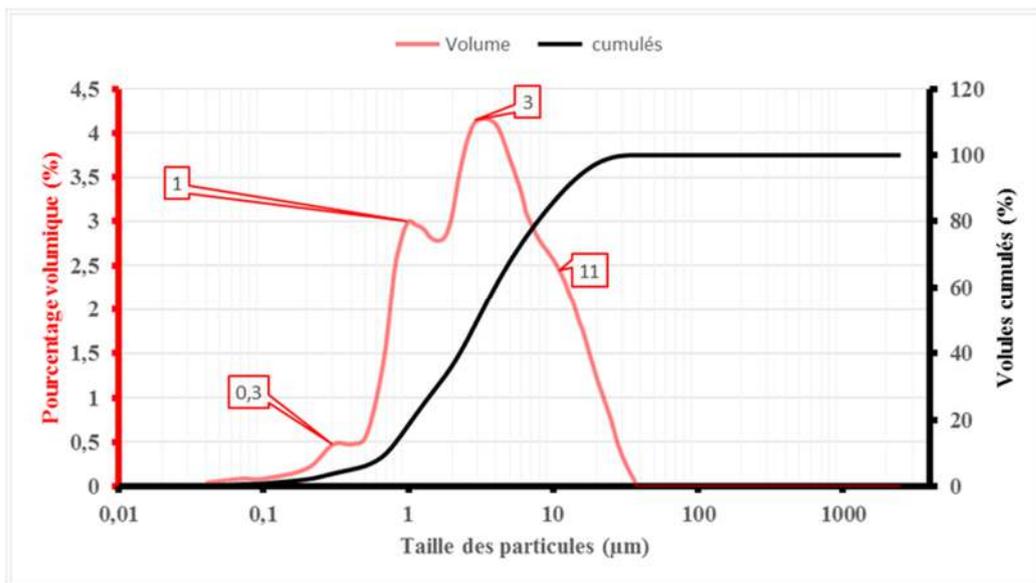


Figure III. 4 : Distribution granulométrique de ETI

Il ressort de l'observation des courbes granulométriques (pourcentage volumique en fonction de la taille des particules) que :

- l'échantillon BAK est constitué de 4 populations : 2 modes correspondent à la fraction argileuse dont l'un à 0,3 µm et l'autre à 1,0 µm ; le troisième mode correspond à la fraction limoneuse à 20,0 µm et un dernier à la fraction sableuse à 75 µm.
- l'échantillon ETI est constitué également de 4 populations dont 2 modes qui correspondent à la fraction argileuse (une à 0,3 µm et l'autre à 1,0 µm) et les deux autres à la fraction limoneuse (une à 3,0 µm et l'autre à 11,0 µm). Ces résultats sont compatibles avec les

compositions granulométriques de ces échantillons déterminées auparavant par tamisage et sédimentométrie.

A partir de la courbe des volumes cumulés, il a été évalué pour les deux échantillons le diamètre maximum correspondant à un volume cumulé de 10% (d_{10}), 50% (d_{50}) et 90% (d_{90}) du volume total des particules. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le Tableau III. 3.

Echantillon	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
BAK	1,57	7,29	22,48
ETI	0,82	4,60	16,02

Tableau III. 3 : Principaux paramètres granulométriques.

1.1.5. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont été déterminées et comparées à celles prescrites pour la fabrication de blocs de terre compactée (Tableau III. 4). Il appert qu'avec une plasticité moyenne ($IP = 14\%$), BAK est apte pour la confection de blocs de terre comprimée (BTC). Selon le Guide de Terrassement Routier (GTR), le traitement à la chaux est nécessaire avec des sols de type A3 et A4, c'est-à-dire des sols ayant une limite de liquidité importante et un indice de plasticité supérieur à 20 [2]. BAK ne peut donc pas être stabilisé avec de la chaux et cela est en accord avec les résultats du Tableau III. 2. En ce qui concerne ETI, son indice de plasticité indique qu'il pourrait être stabilisé avec de la chaux. Cependant, les résultats de l'analyse granulométrique (Tableau III. 2) indiquent un taux de sable très bas conjugué à un taux de limon + argiles très élevé, ce qui explique que ce sol ne peut pas être utilisé pour la fabrication de BTC, même avec un amendement au ciment ou à la chaux.

Limites d'Atterberg	BAK	ETI	Zone limite pour une BTC	Zone préférentielle pour une BTC	Référence bibliographique
W_L (%)	28	68	25 à 50	30 à 35	[3]
W_P (%)	14	30	10 à 25	12 à 22	
I_P (%)	14	38	7 à 29	7 à 18	

Tableau III. 4 : Limites d'Atterberg de BAK et de ETI

III.1.1 Equivalent de sable (ES) et Essai au bleu de méthylène (VBS)

Le

Tableau III. 5 présente les résultats des essais au bleu de méthylène (VBS) et de l'équivalent de sable (ES). D'après les valeurs de VBS, BAK est un sol limoneux-sableux et ETI, un sol argilo-limoneux comme déjà mis en évidence par l'analyse granulométrique. En combinant les résultats des limites d'Atterberg et ceux de l'essai VBS, et en considérant la classification de GTR [5], il ressort que BAK est un sol de type A2 et ETI un sol de type A3. BAK est donc apte pour une utilisation dans la confection des BTC, contrairement à ETI qui peut être valorisé dans le domaine de la céramique.

Echantillon	ES	VBS (g/100g)	Classification
BAK	13	1,1	sol sablo-limoneux
ETI	3	3,2	sol limoneux-argileux de plasticité moyenne

Tableau III. 5 : Equivalent de sable (ES) et Essai au bleu de méthylène (VBS) de BAK et de ETI

1.2. Essai Proctor normal

Connaissant la nature des deux sols, la densité en eau optimale a été évaluée grâce à l'essai Proctor normal. ETI étant riche en fraction argileuse, il s'est révélé inapproprié à la réalisation de l'essai. La Figure III. 5 présente la courbe Proctor normal de BAK.

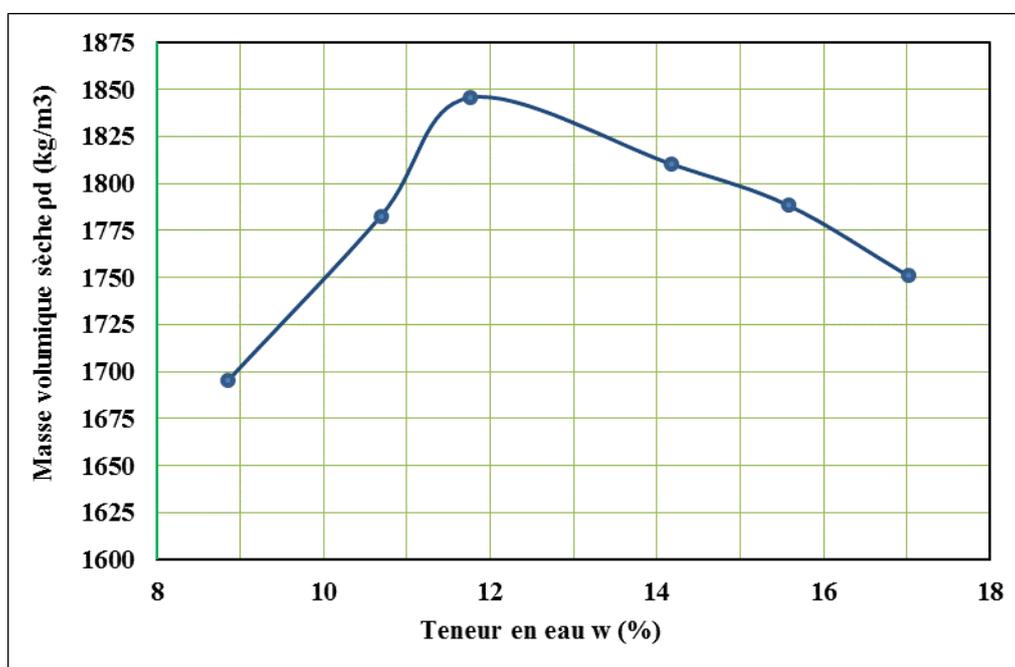


Figure III. 5 : Courbe Proctor normal de BAK.

D'après la Figure III. 5 la masse volumique optimale ($\rho_{d_{opt}}$) de BAK est de 1846 kg/m³ et la teneur en eau optimale (W_{opt}) est de 12 %. Une argile pure a une courbe Proctor plus allongée et une W_{opt} plus élevée. La masse volumique ($\rho_{d_{opt}}$) de ce sol étant compris entre 1760 et 2100 Kg/m³, il est donc qualifié de sol à malaxage satisfaisant.

2. Caractérisation physico-chimique et minéralogique des sols

2.1. Analyses chimiques

Le Tableau III. 6 présente les résultats de l'analyse chimique élémentaire de BAK et de ETI. De l'analyse de ces données, il ressort que la silice et l'alumine sont les oxydes majeurs dans les deux échantillons, traduisant que ce sont des aluminosilicates. De façon générale, le

rapport silice/alumine est un indicateur de la teneur d'un échantillon en minéraux argileux et ce rapport est de 4,73 pour l'échantillon BAK. Il peut être comparé à celui des minéraux argileux de type 2:1, qui du fait des nombreuses substitutions possibles, est compris entre 2 et 4 [6,7, 8, 9]. Cette valeur élevée suggère la présence d'une quantité importante de silice libre dans BAK, et ceci est corrélé aux résultats d'analyse granulométrique (Tableau III. 2). Le rapport silice/alumine est égal à 1,2 pour ETI, ce qui est très proche de celui des kaolins purs (1,1) [10,11]. Le taux élevé d'alumine et la faible teneur en éléments alcalins (K_2O et Na_2O) indique la possibilité d'une utilisation comme matière première pour la confection de produits réfractaires [12]. ETI se caractérise aussi par sa teneur particulièrement élevée en Fe_2O_3 (13,20 %) qui induit une couleur rouge brique. La coloration intense est un atout pour cet échantillon car il peut être utilisé comme colorant naturel pour les blocs de terre stabilisée et les tuiles [13]. ETI a une perte au feu (13,91%) relativement élevée ce qui suggère aussi que sa teneur en phases argileuses est plus élevée que celle de BAK.

Echantillon	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	PF (%)	Total (%)
BAK	72,01	15,20	3,01	0,01	0,30	0,31	0,23	1,58	0,77	<	6,99	100,41
ETI	39,37	30,90	13,20	0,02	0,10	<	0,03	0,21	1,58	0,24	13,91	99,56

Tableau III. 6 : Analyses chimiques (% massique) de BAK et de ETI

2.2. Identification des minéraux

2.2.1. Diffraction des rayons X

Les Figure III. 6 et Figure III. 7 présentent, respectivement, les diffractogrammes des échantillons BAK et ETI.

Le dépouillement du diffractogramme de BAK (Figure III. 6) révèle qu'il est composé de kaolinite ($2SiO_2, Al_2O_3, 2H_2O$), d'illite ($K_2O, 2H_2O, 2Al_2(Si_3Al)O_{10}(OH)$), auxquels sont associés du quartz (SiO_2), de l'anatase (TiO_2) et de la microcline ($KAlSi_3O_8$).

ETI (Figure III. 7) est essentiellement constitué de kaolinite ($2SiO_2, Al_2O_3, 2H_2O$), d'hématite (Fe_2O_3), d'anatase (TiO_2) et de quartz (SiO_2). La première réflexion de l'illite (001) à 10 Å n'est affectée ni par le traitement à l'éthylène-glycol, ni par le traitement thermique (Figure III. 8 et Figure III. 9) tandis que les raies de la kaolinite ont disparu avec le chauffage à 490°C. BAK est donc un mélange kaolinite-illite avec une teneur élevée en quartz. On est donc en présence d'un mélange naturel semblable aux mélanges rencontrés en céramique silicatée avec lesquels du quartz est souvent ajouté aux minéraux argileux. Dans le cas des blocs de terre comprimée, l'illite et la kaolinite sont des minéraux importants dans les compositions puisqu'ils ne favorisent pas un phénomène de retrait/gonflement lors du séchage et de la ré humidification. La kaolinite est une espèce minérale réfractaire qui limite le fluage à haute température et elle est dominante dans ETI. Cette forte teneur en kaolinite est recherchée dans le domaine des céramiques réfractaires

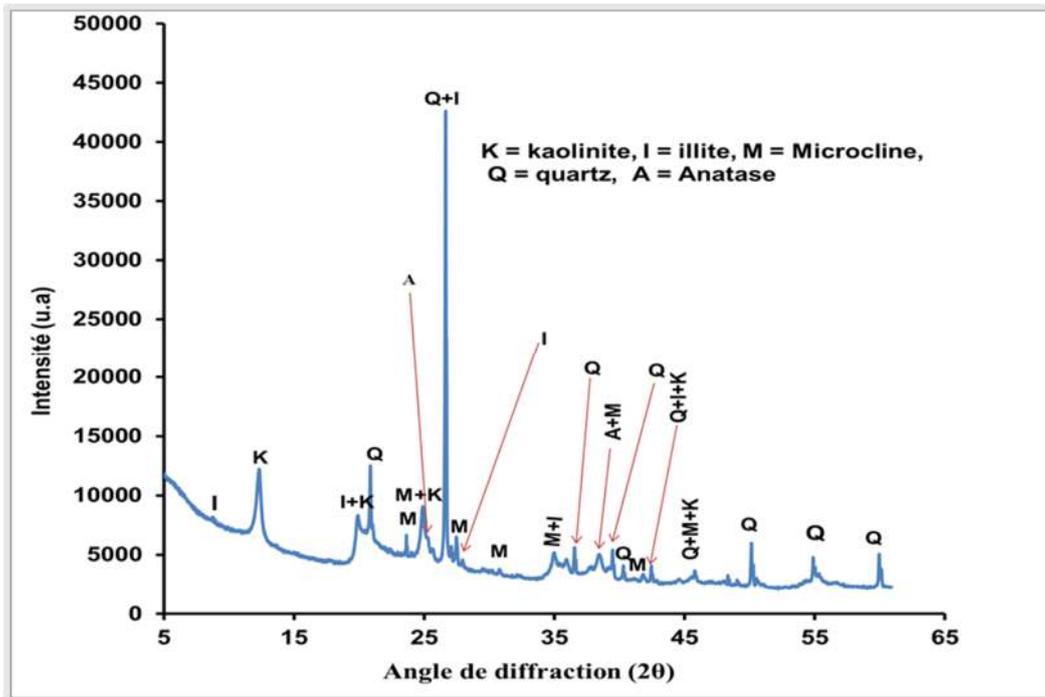


Figure III. 6 : Diffractogramme de BAK.

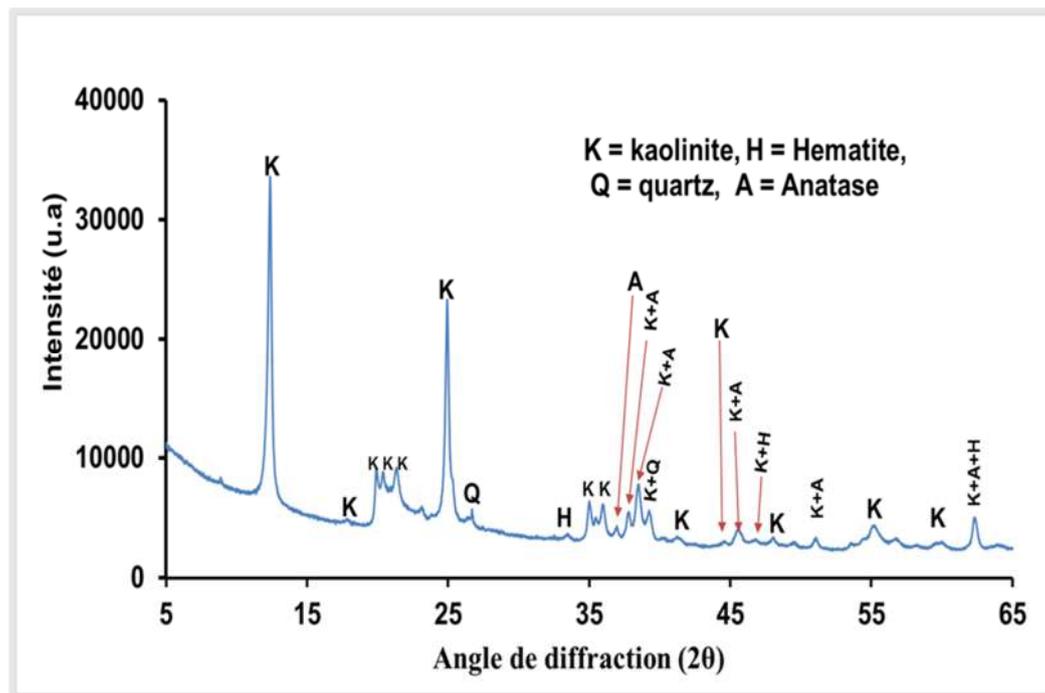


Figure III. 7 : Diffractogramme de ETI

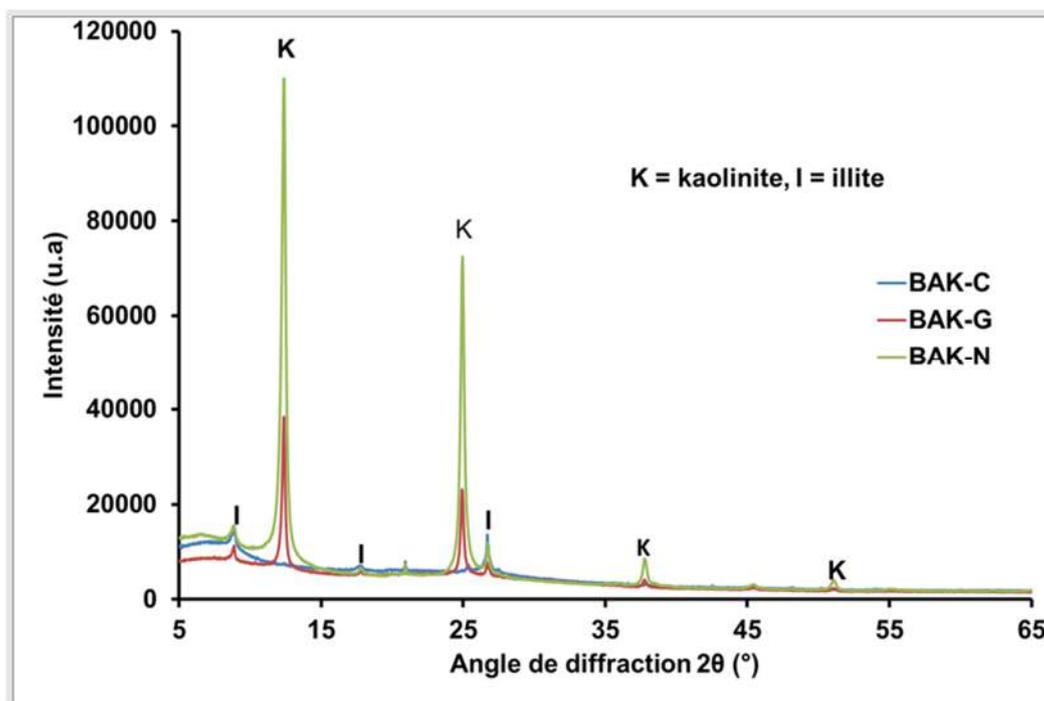


Figure III. 8 : Diffractogrammes de la fraction Normale (N), traitée à éthylène-glycol (G), chauffée à 490°C (C) de BAK

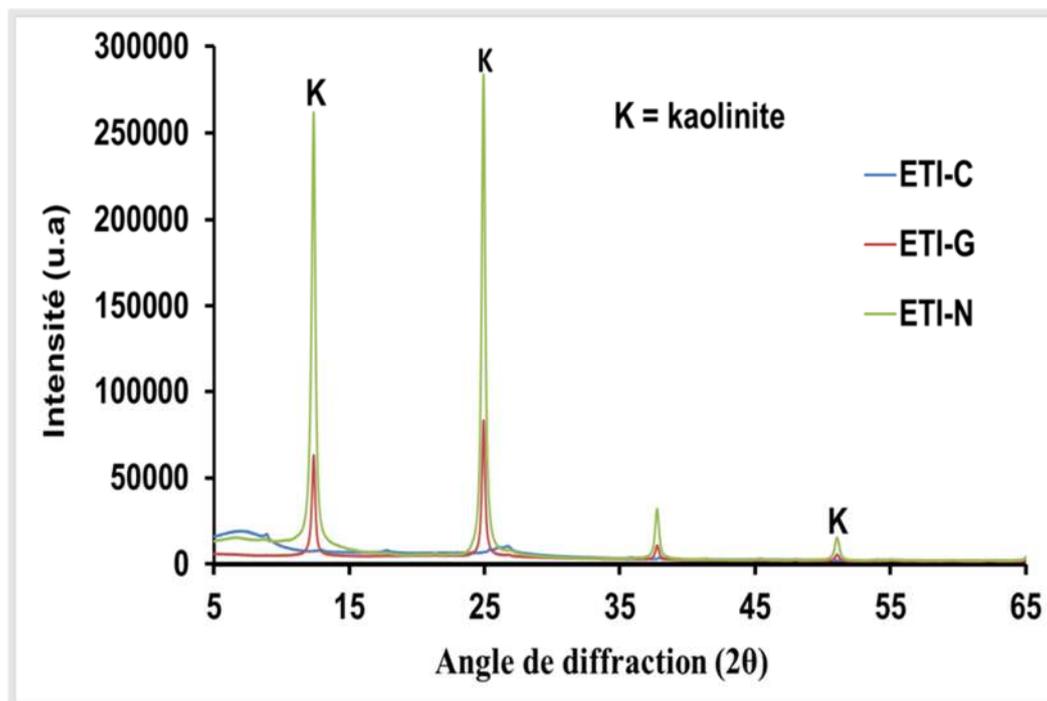


Figure III. 9 : Diffractogrammes de la fraction Normale (N) de ETI, traitée à l'éthylène-glycol (G) et chauffée à 490°C (C).

Le rapprochement des résultats de la diffraction des rayons X et ceux de l'analyse chimique élémentaire et l'utilisation de la loi des mélanges généralisée a permis d'évaluer les quantités relatives des minéraux dans les deux matières premières locales (Tableau III. 7).

Echantillons	Kaolinite (%)	Illite (%)	Quartz (%)	Microcline (%)	Hématite (%)	Anatase (%)
BAK	33,1	13,7	49,4	3,0	-	0,8
ETI	78,2	-	7,0	-	13,2	1,6

Tableau III. 7 : Composition minéralogique de BAK et de ETI

La composition minéralogique révèle que l'échantillon BAK a une forte teneur en Quartz (49,4%) et en kaolinite (33,1%). On en déduit que le quartz est la source de silice libre comme indiqué précédemment avec le calcul du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. L'échantillon ETI a une teneur élevée en kaolinite (78,1%) comme le confirme les valeurs du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Il a aussi une teneur importante en hématite Fe_2O_3 (13,2%) qui a un rôle de colorant. Les fortes teneurs en quartz ont un rôle de dégraissant de la kaolinite. Cela favorise l'utilisation de la matière première de BAK dans les formulations des éco-matériaux tels que les briques, les tuiles... ETI a une composition favorable aux formulations des produits céramiques tels que les carreaux étant donné sa forte teneur en kaolinite.

2.2.2. Analyses Thermiques

2.2.2.1. Analyses thermique différentielles et thermogravimétriques (ATD/ATG)

Les Figure III. 10 et III. 11 présentent les courbes des analyses thermiques différentielles et thermogravimétriques (ATG/TG) de BAK et de ETI, respectivement.

On remarque que ces thermogrammes présentent des similitudes, puisque 3 pics endothermiques sont mis en évidence sur les thermogrammes des deux échantillons et 3 pics exothermiques sur celui de BAK contre 2 sur celui de ETI.

Les températures associées à ces pics ainsi que la nature des phénomènes sont reportées dans le Tableau III. 8 et le Tableau III. 9.

Dans le cas de BAK, aux températures inférieures à 200°C l'analyse révèle que la combustion de la matière organique crée une perte de masse de 1,54%. Cette valeur est proche de celle déterminée par traitement chimique (1,33%) (Tableau III. 1). Aux mêmes températures, le thermogramme de ETI indique une perte de masse de 12,02% (Tableau III. 9) attribuable à plusieurs phénomènes y compris la combustion de la matière organique.

L'absence du pic endothermique de la transformation allotropique du quartz sur le thermogramme de ETI (Figure III. 11) confirme la faible teneur en quartz décelée dans la minéralogie. Ces thermogrammes confirment que BAK contient de la kaolinite et du quartz et que ETI contient majoritairement de la kaolinite.

Nature du pic	Température (°C)	Perte de masse (%)	Observations	Référence bibliographique
Endothermique	71	3,16	Perte d'eau hygroscopique	
Exothermique	313	1,54	Combustion de la matière organique	[14, 15]
Endothermique	508	7,47	Déshydroxylation de la kaolinite (Equation I)	[8,16]
	580	-	Passage du quartz α au quartz β	[8]
Exothermique	952	-	Formation de mullite ou de spinelle (Equation II)	[8,17]
Phase vitreuse	1171	-	Formation d'une deuxième génération de mullite	[18]

Tableau III. 8 : Analyses thermiques de BAK

Nature du pic	Température (°C)	Perte de masse (%)	Observations	Référence bibliographique
Endothermique	56,22	1,26	Perte de l'eau hygroscopique	
Exothermique	326,58	12,02	Combustion de la matière organique	[15,16]
Endothermique	513	-	Déshydroxylation de la kaolinite et formation de la metakaolinite (Equation I)	[8,17]
Exothermique	985	-	Formation de mullite ou de spinelle (Equation II)	[8]
Phase vitreuse	1212	-	Formation d'une deuxième génération de mullite	[8,18]

Tableau III. 9 : Analyses thermiques de ETI

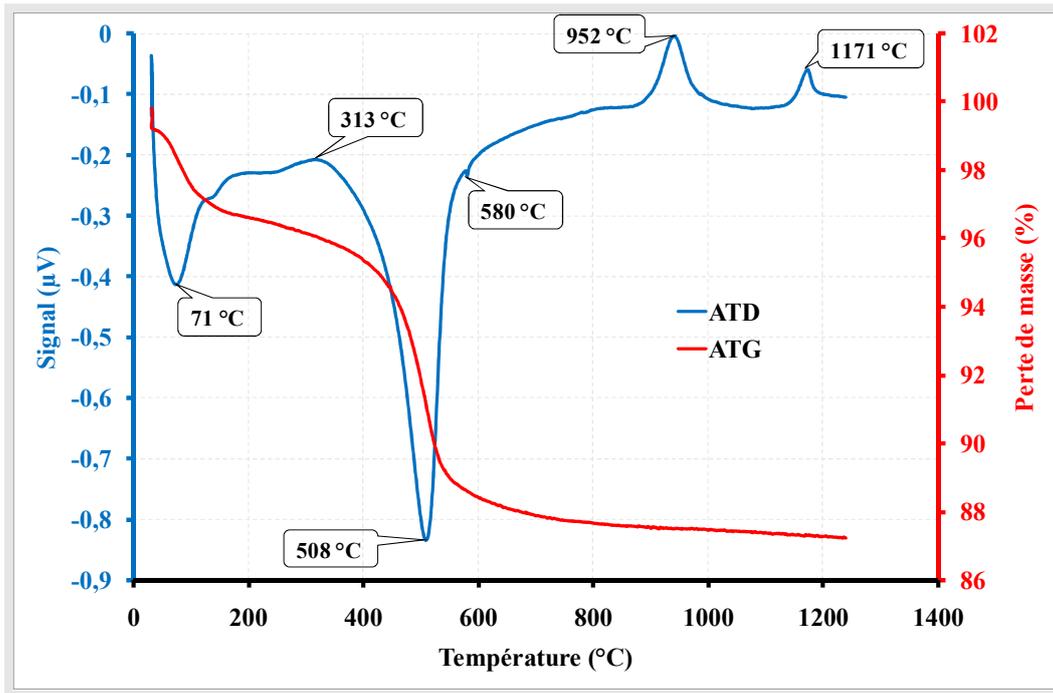


Figure III. 10 : Thermogrammes ATD/TG de BAK.

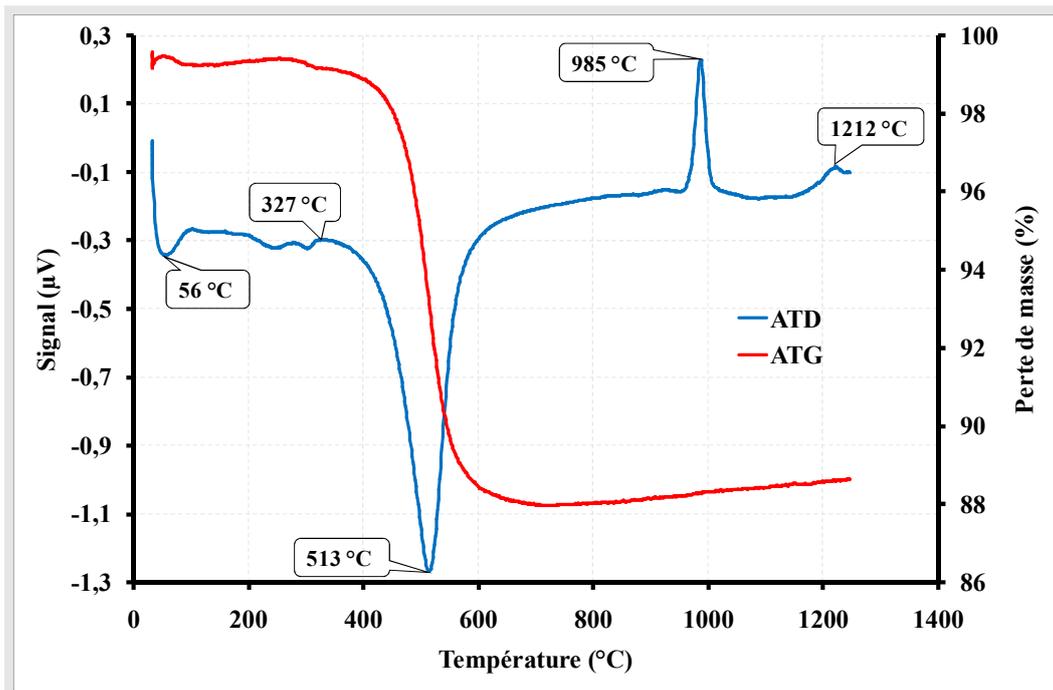
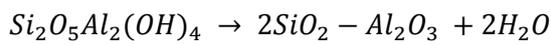


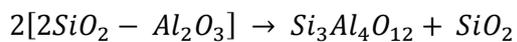
Figure III. 11 : Thermogrammes ATD/TG de ETI.



Equation III. 1

Kaolinite

Métakaolinite



Equation III. 2

Métakaolinite

Spinelle

Silice amorphe

2.2.2.2. Analyse dilatométrique

Nous avons étudié le comportement thermique des deux sols par l'analyse dilatométrique qui donne l'évolution dimensionnelle des matériaux en fonction de la température.

Le dilatogramme de l'argile BAK (Figure III. 12) présente un retrait entre 28 et 100°C correspondant à la déshydratation du matériau. Puis vient une légère dilatation entre 100°C et 130°C due à l'agitation thermique que subit l'échantillon sous l'effet de l'élévation de la température. Entre 130 °C et 450 °C, on observe un autre retrait qui serait lié à la combustion de la matière organique. Un autre retrait entre 450°C et 600°C traduit la déshydroxylation de la kaolinite et de l'illite. Immédiatement après ce retrait, la petite dilatation serait due à la transformation du quartz de la forme α vers la forme β . Entre 650 et 900°C, survient la densification de la phase désorganisée de la métakaolinite. La réorganisation structurale intervient entre 900°C et 1100°C. Puis vient un début de frittage entre 1100°C et 1250°C. La courbe de refroidissement est quasi linéaire; elle est toujours marquée par la transformation inverse du quartz β en quartz α .

Quasiment les mêmes phénomènes thermiques sont observés sur le dilatogramme de ETI (Figure III. 13). La différence est que les températures de ces événements thermiques ne sont pas les mêmes. On note ici l'absence de la dilatation qui est associée à la transformation du quartz de la forme α vers la forme β , ce qui est dû à la quasi absence du quartz dans l'échantillon. Ce résultat est conforme à ceux des analyses thermiques différentielles et gravimétriques, ainsi qu'aux résultats de diffraction des rayons X. Entre 650°C et 950°C, on observe une densification de la phase désorganisée de la métakaolinite suivie de la réorganisation structurale entre 950°C et 1175°C. Puis vient un début de frittage entre 1175°C et 1280°C.

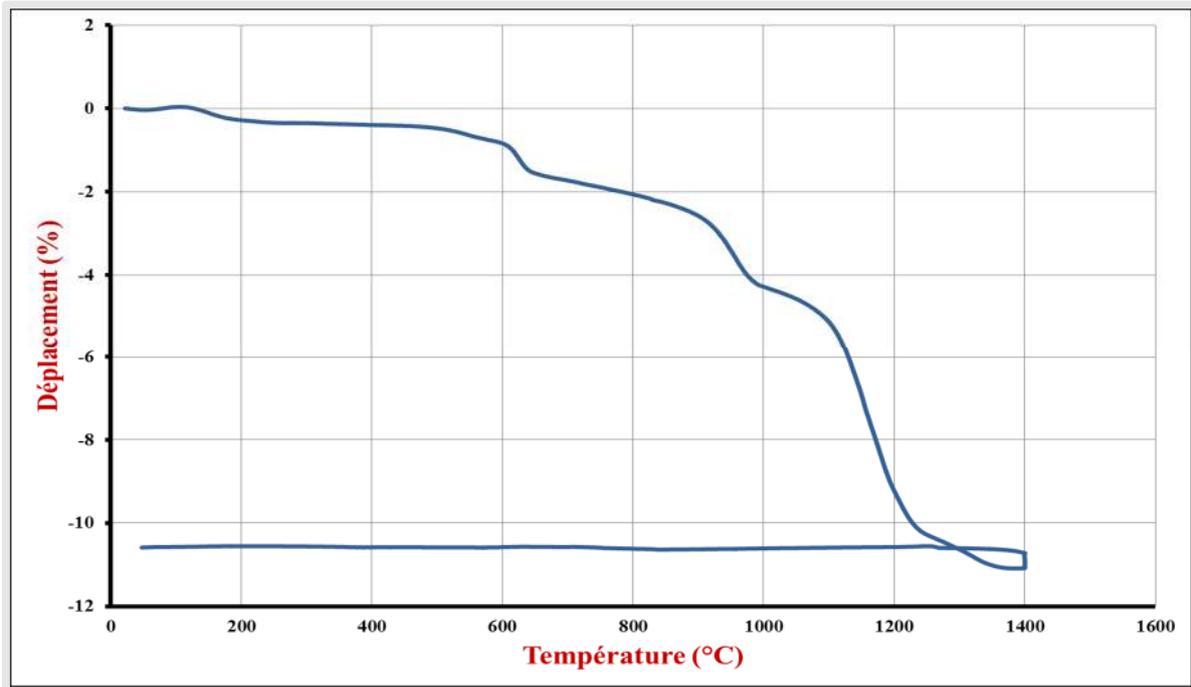


Figure III. 12 : Courbe dilatométrique de BAK

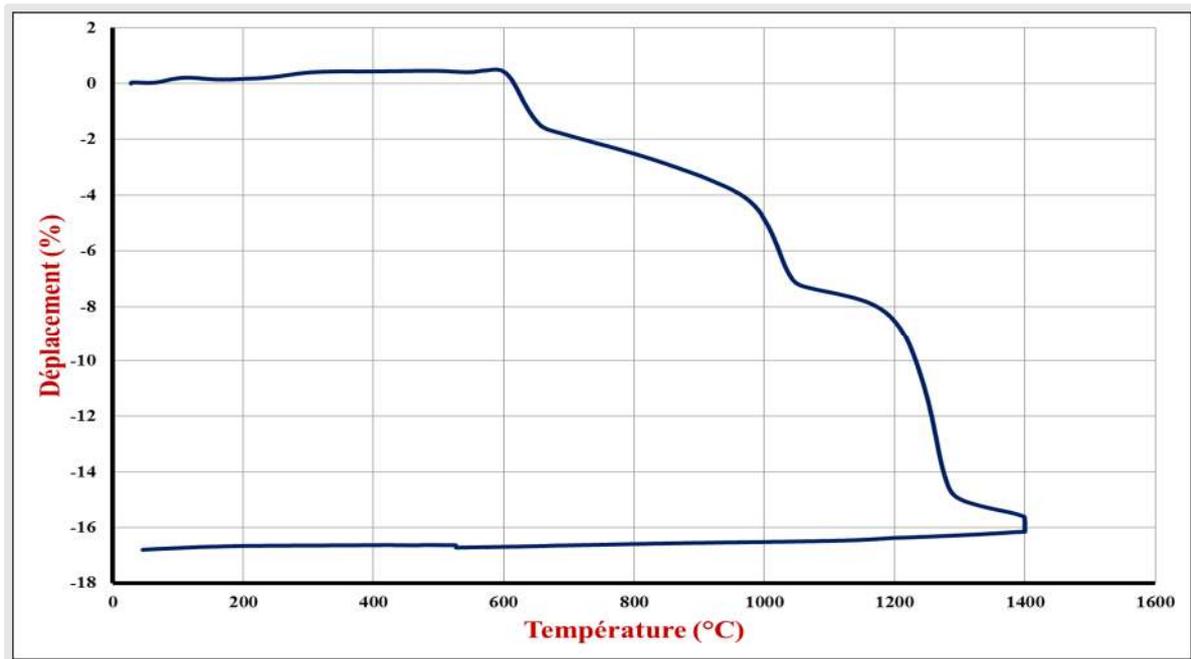


Figure III. 13 : Courbe dilatométrique de ETI

2.3. Analyse infrarouge

L'étude des matériaux argileux par la méthode de spectrométrie infrarouge permet l'identification des groupements fonctionnels des espèces minérales qu'ils renferment, en fonction des fréquences de vibration propres. On enregistre très souvent des phénomènes de coïncidence de fréquences de vibration. Cette étude complète les résultats de la DRX. Les Figure III. 14 et III. 15 présentent, respectivement, les spectres IR des échantillons ETI et BAK, dans l'intervalle $4400 - 400 \text{ cm}^{-1}$.

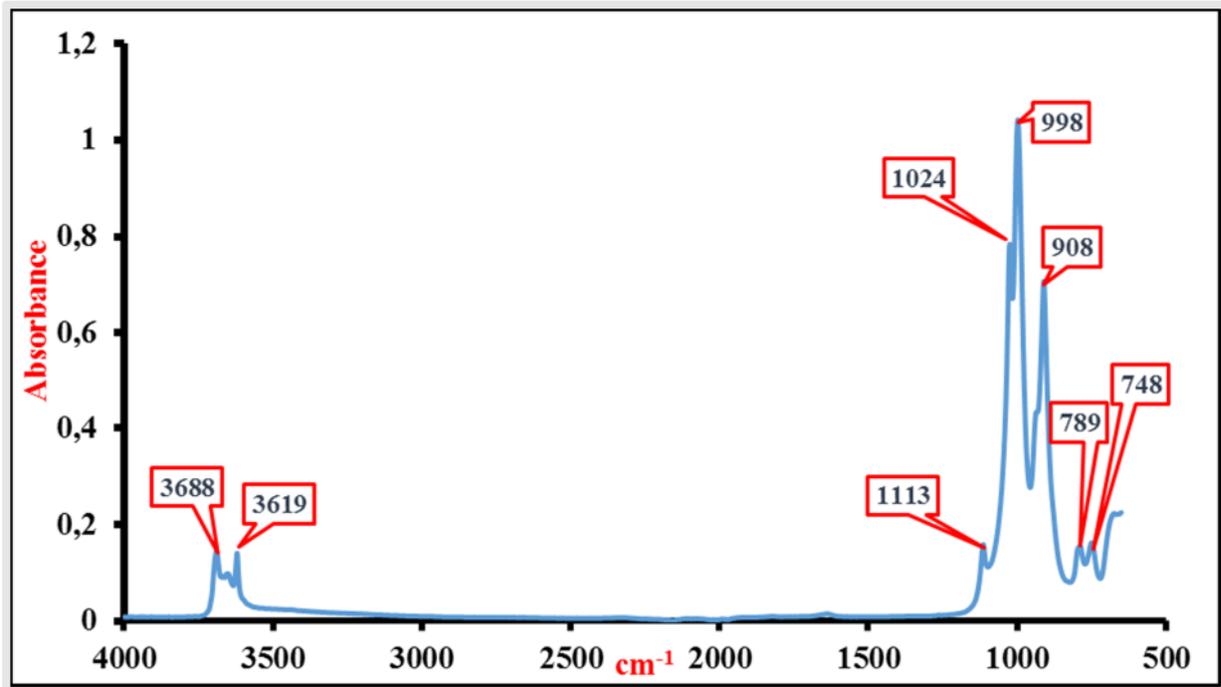


Figure III. 14 : Spectre IR de ETI

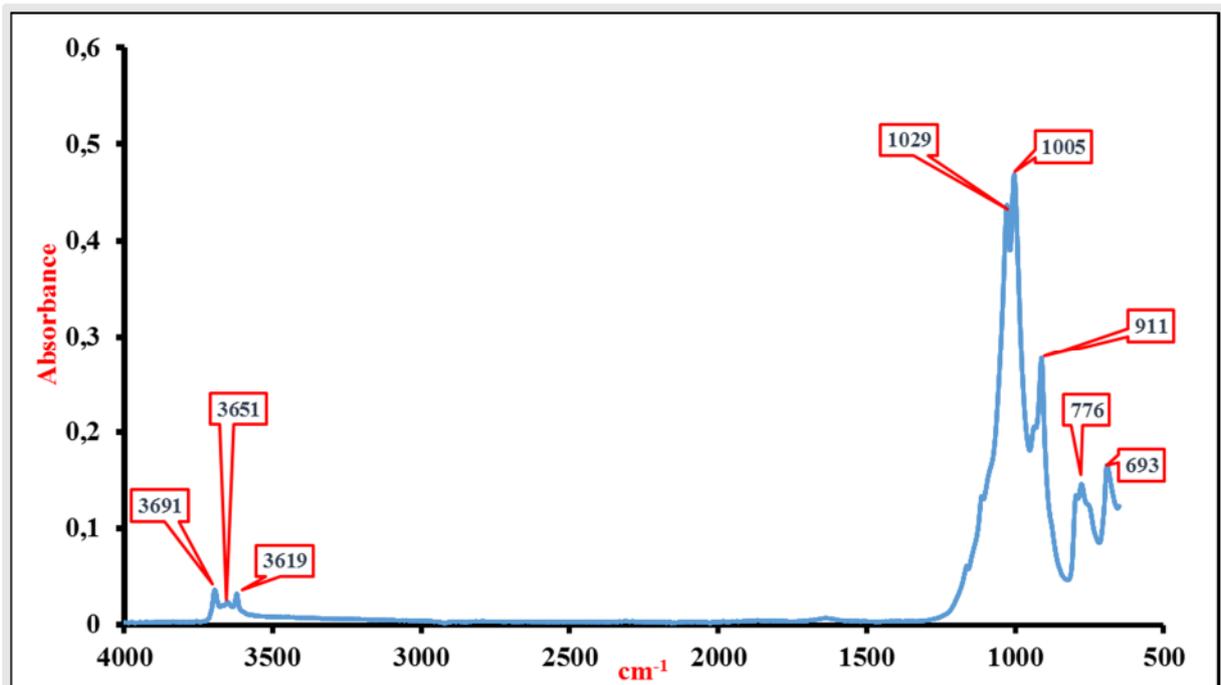


Figure III. 15 : Spectre IR de BAK

Le spectre de ETI est typique de celui de la kaolinite [18]. Ce spectre (Figure III. 14) présente trois domaines d'absorption :

Dans le premier domaine, les bandes à 3688 et 3619 cm^{-1} sont attribuables à la vibration de la liaison O-H des groupements hydroxyles de la kaolinite [19,20]. Le deuxième domaine comprend quatre bandes d'absorption. La bande à 1113 cm^{-1} correspond à la vibration de la liaison Si-O de la kaolinite. Les bandes à 998 et 1024 cm^{-1} sont respectivement attribuables aux

vibrations d'élongations symétriques et asymétriques de la liaison Si-O-Si dans la kaolinite [20]. La vibration à 908 cm⁻¹ est attribuable à la déformation de la liaison Al-OH dans la kaolinite [21]. Dans le troisième domaine, les bandes à 789 et 748 cm⁻¹ correspondent aux différents modes de vibration de la liaison Si-O-Al (où Al est tétracoordonné) dans la kaolinite. La bande à 640 cm⁻¹ est attribuable à la vibration de la liaison Si-O-Si dans la kaolinite [21,21].

Le spectre IR de BAK (Figure III. 15) présente les mêmes domaines d'absorption que celui d'un mélange de quartz, de kaolinite et d'illite [9]. Les principales bandes caractéristiques et leurs attributions sont rassemblées dans le Tableau III. 10.

Fréquence (cm ⁻¹)	Attributions
3691 et 3651	Hydroxydes externe de la kaolinite (Al -OH) [22, 23, 24]
3618	Hydroxydes interne localisés entre le feuillet tétraédrique Si ₂ O ₅ et le feuillet octaédrique Al ₂ (OH) ₆ [6, 18, 25]
H ₂ O	localisée dans les inter-feuillets [6, 15, 23, 26]
2920	CH, CH ₂ , CH ₃ présence de composé aliphatique [27]
1631	H ₂ O hygroscopique (absorbée) [23]
1028	du quartz [23, 25]
1004	OH de l'illite et de la kaolinite [28, 29]
911	Al - OH et Si - O - Al de la kaolinite [30]
796	Si - O quartz / kaolinite [27, 15]
776	Si - O quartz [31]
693	OH de la kaolinite / Si - O du quartz [16]
644	Si - O - Si [32]

Tableau III. 10 : Bandes caractéristiques du spectre IR de BAK et ETI avec leurs attributions

3. Caractérisation physico-chimique, minéralogique et mécanique des fibres de kénaf

3.1. Propriétés physiques des fibres de Kénaf

3.1.1. Observation au microscope des faisceaux de fibres de kénaf

Les mesures sous microscope électronique (Figure III. 16) donnent des diamètres de faisceaux de fibres de kénaf variant entre 100 et 300 µm. L'observation d'un faisceau révèle qu'il est constitué de plusieurs fibres élémentaires (Figure III. 17). On observe également des faisceaux de fibres, qui sont probablement entourés de résidus de parenchyme cortical (qui lie les faisceaux de fibres dans la tige) (Figure III. 18).

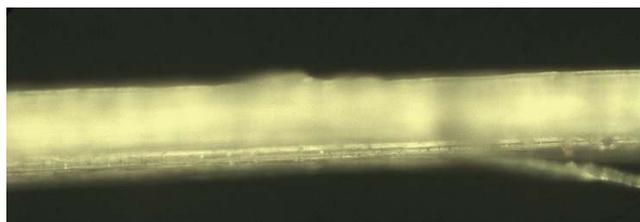


Figure III. 16 : Observation au microscope électronique d'un faisceau de fibre de kénaf :
X 20

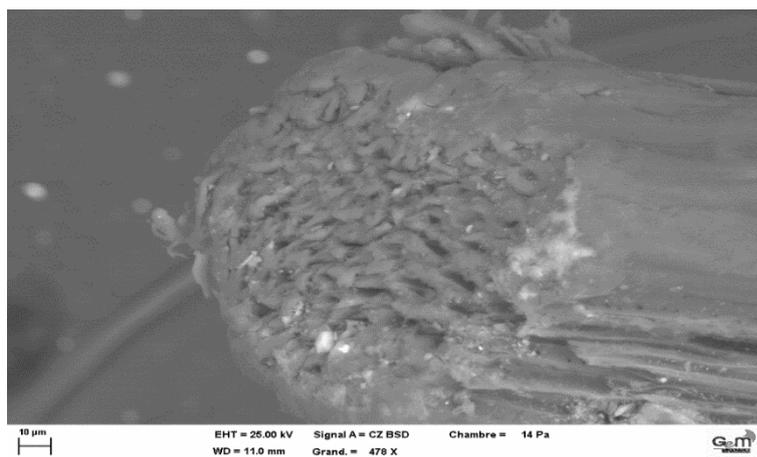


Figure III. 17 : Observation au MEB d'une section transversale d'un faisceau de fibre de kénaf

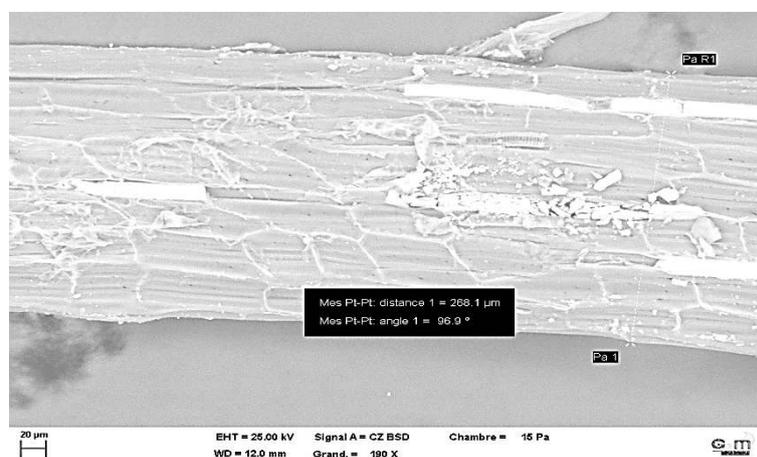


Figure III. 18 : Observation au MEB d'un faisceau de fibre de kénaf montrant les impuretés à la surface de la fibre

3.1.2. Cinétique d'absorption d'eau des fibres de kénaf

La Figure III. 19 présente la courbe d'absorption en eau massique par immersion des fibres de kénaf en fonction du temps. De l'analyse de cette courbe nous détectons deux phases d'absorption :

-une première phase d'absorption de surface qui s'étend de 0 à 3 minutes, cette phase provoque une augmentation très rapide de la masse des fibres de kénaf, ce qui révèle le caractère fortement hydrophile de ces fibres végétales.

- une deuxième phase qui correspond à une absorption plus lente d'eau. Cette phase souligne le comportement diffusif de la propagation de l'eau dans la structure végétale à long terme, ici jusqu'à 24 heures.

Nous remarquons que cette absorption d'eau des fibres de kénaf obéit plus ou moins à une loi de type logarithmique (Figure III. 20). La phase de mouillage peut être considérée comme terminée après 3 minutes. L'absorption initiale α_0 est évaluée pour cette durée d'immersion à environ 250%. A partir de 2 heures d'immersion, on observe un palier à environ 320% d'absorption.

De nombreuses caractéristiques des fibres végétales, notamment les propriétés physiques et mécaniques, sont impactées par la teneur en eau [33]. Page et al. (2016) [34] ont montré que les fibres de lin peuvent absorber jusqu'à 130% de leur masse sèche après 24 heures d'immersion. Cette caractéristique essentielle des fibres végétales induit une compétition sur la demande en eau entre ces fibres et le liant. Page explique ce comportement des fibres végétales en générale et en particulier des fibres de lin par leur forte porosité et leur structure interne [35]. THUAULT et al. (2014) [36] ajoutent que ce caractère fortement hydrophile est aussi attribué à la présence d'hémicellulose dans ses fibres.

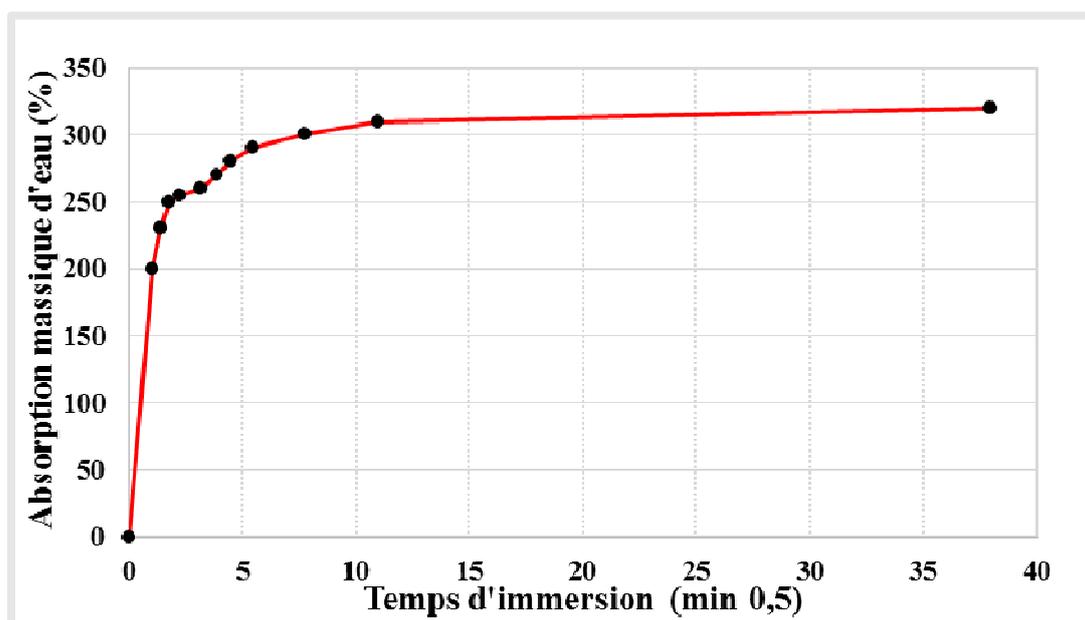


Figure III. 19 : Courbe d'absorption en eau massique par immersion des fibres de kénaf en fonction du temps sur une échelle de temps classique

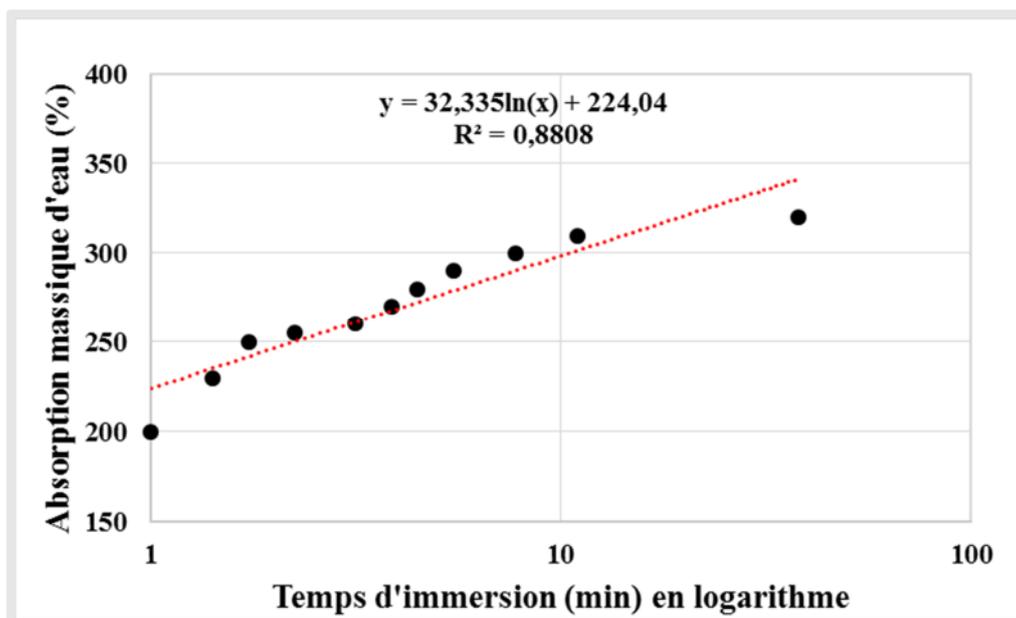


Figure III. 20 : Courbe d'absorption en eau massique par immersion des fibres de kénaf en fonction du temps sur une échelle de temps logarithmique

3.2. Caractérisation physico-chimique et minéralogique

3.2.1. Indice de cristallinités des fibres

La diffraction des rayons X permet d'observer la structure cristalline des fibres végétales. La part cristalline des fibres végétales correspond à un des états polymorphiques de la cellulose. Les diffractogrammes de la Figure III. 21 sont semblables et permettent d'identifier nettement 4 pics. Les pics à $15,02$ et $16,03^\circ$ ($2^\circ\theta$ CuK α) correspondent respectivement aux plans cristallographiques (110) et ($1\bar{1}1$) de la cellulose I. Le pic principal à $22,7^\circ$ correspond à celui du plan (002), enfin celui que l'on distingue à $34,34$ correspond au plan (023) ou (004).

Pour le kénaf, il est difficile de distinguer le pic $15,02$ à celui de $16,03^\circ$. Ceci traduit une teneur importante en matières amorphes comme la lignine, l'hémicellulose et la cellulose amorphe. Au contraire, lorsque la teneur en cellulose cristallisée est importante, ces deux pics sont bien séparés et ce qu'on observe sur le diffractogramme des fibres de lin. L'indice de cristallinité du matériau, correspond au rapport de la masse de la phase cristalline de la cellulose sur la masse totale de l'échantillon (cellulose semi-cristalline + hémicellulose + pectine + lignine). Cet indice de cristallinité a été déterminé pour les fibres de kénaf et de lin en utilisant la méthode de Segal *et al.* (1959) [37] selon la relation II.6 du chapitre II $I_c = 49,2$ et $77,8$ sont respectivement les indices de cristallinité des fibres de kénaf et de lin calculés selon cette méthode. Le lin est plus cristallin que le kénaf.

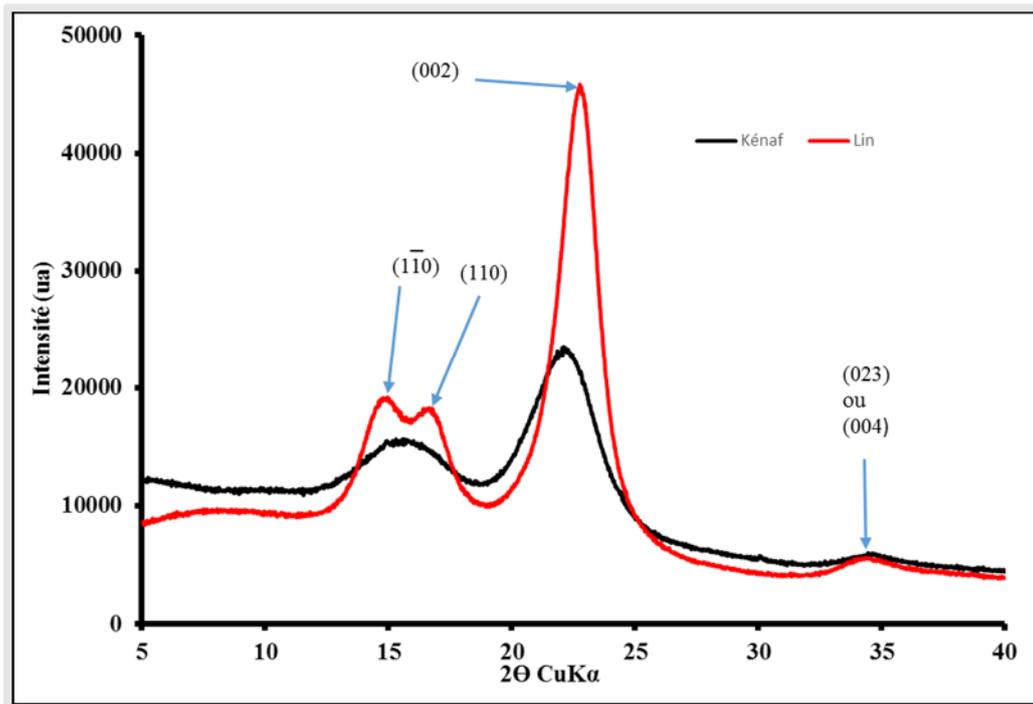


Figure III. 21 : Diffractogramme des fibres de kénaf comparées à celui du lin

3.2.2. Caractérisation physico-chimique des fibres de kénaf

Pour compléter la composition minéralogique et notamment la caractérisation de composés amorphes, les fibres broyées ont été analysées par thermogravimétrie (ATG) et infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). La Figure III. 22 montre les courbes de TG /DSC des fibres de kénaf. La caractérisation thermique des fibres a été effectuée comme décrit dans les ouvrages de El-Shekeil et al (2015). [38] et Morán et al (2013). [39]. La courbe de perte de masse des échantillons en fonction de la température révèle la présence de 3 zones caractéristiques :

- La première zone (entre 30°C et 110°C environ) marque le départ de l'eau adsorbée. Cette fraction n'est pas importante car les échantillons ont été séchés avant l'essai ;
- La deuxième zone qui s'étale entre 210°C et 400°C est caractérisée par une perte de masse importante, elle correspond à l'étape de pyrolyse active durant laquelle les principales composantes des fibres (cellulose, hémicellulose et lignine) sont dégradées. Cette dégradation est marquée par la présence d'un pic exothermique autour de 335°C au niveau du DSC qu'on attribue à la décomposition de la cellulose. Cette grande perte de masse indique que la cellulose est un composé important des fibres.
- La troisième zone située entre 410 et 500°C correspond à la pyrolyse passive de la lignine. Cette zone est également marquée par la présence d'un pic exothermique environ de 450°C. L'attribution de ce pic à la décomposition de la lignine est soutenue par le fait que la macromolécule de lignine est résistante à la chaleur. La lignine est thermiquement stable parce que, dans sa structure moléculaire, il existe la possibilité de former des liaisons hydrogène, qui sont connues pour stabiliser les molécules

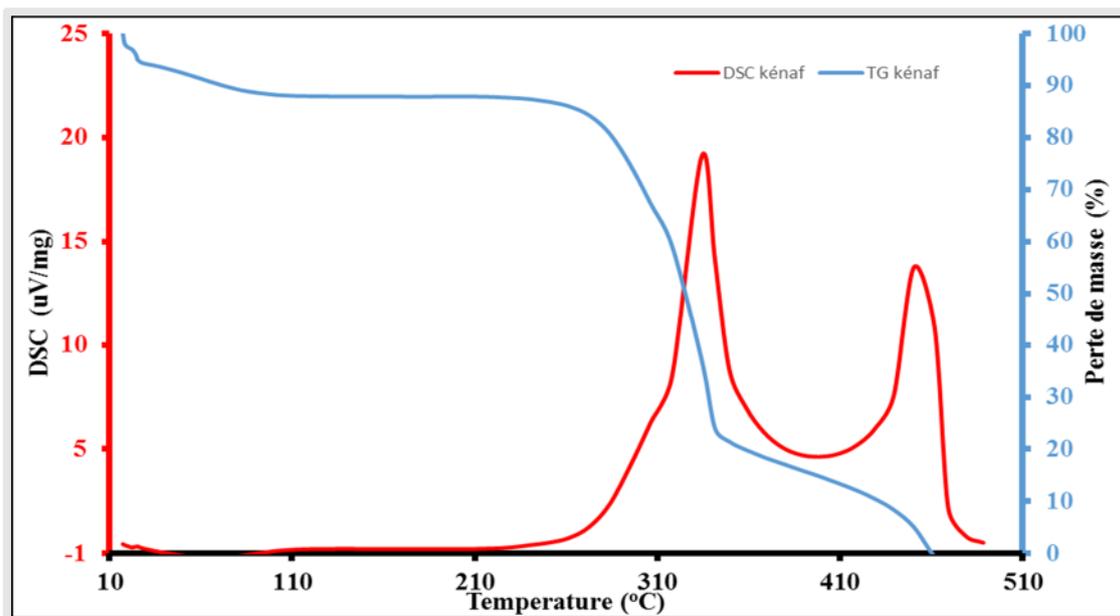


Figure III. 22 : les courbes DSC/ATG des fibres de kénaf

La Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est une technique d'analyse souvent utilisée pour l'identification des liaisons chimiques caractéristiques dans un matériau. Les spectres obtenus pour les fibres de kénaf sont présentés sur la Figure III. 23. La large bande autour de 3400 cm^{-1} correspond à l'étirement de la liaison O-H des molécules de cellulose. Cette bande caractérise également l'étirement de la liaison O-H de l'eau absorbée par les fibres. Les principaux pics ont été identifiés et présentés dans le Tableau III. 11 en s'appuyant sur les travaux de Millogo et al (2015) [40] ; Morán et al (2013) [37] et Shin et al. (2012) [41].

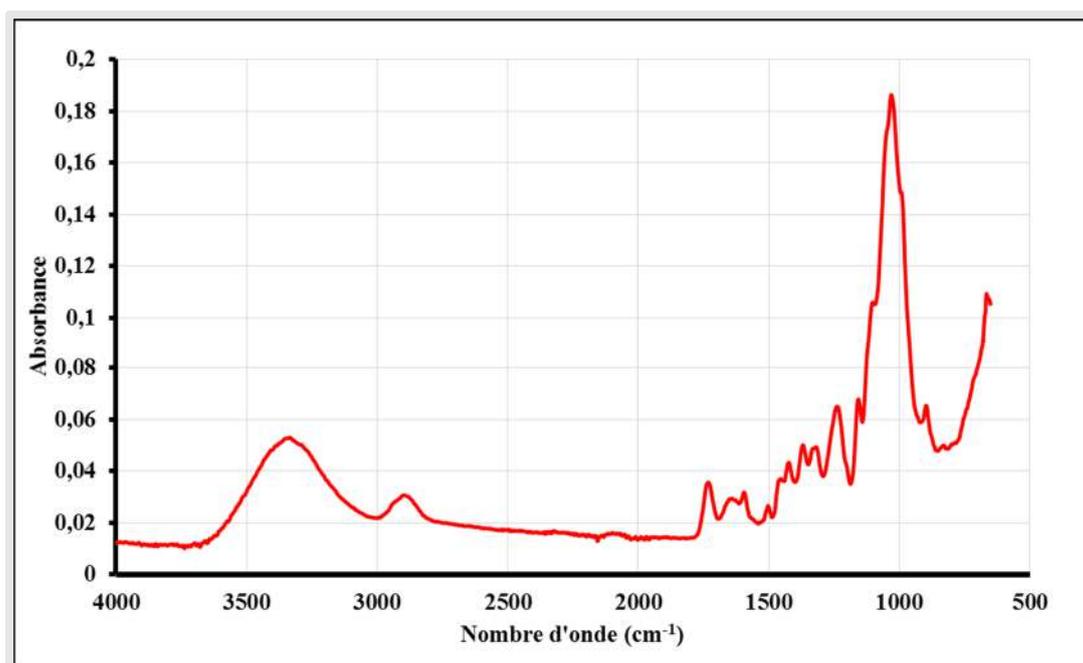


Figure III. 23 : Spectre infra-rouge des fibres de kénaf

Nombre d'onde cm^{-1}	Désignation
3400-3345	Caractéristiques des vibrations d'étirement des liaisons -OH de la cellulose de l'hémicellulose
2915	Étirement des liaisons -CH des chaînes des celluloses d'hémicelluloses
2848	Étirement des liaisons -CH ₂ de la cellulose de l'hémicellulose
1725	Étirement des liaisons C=O des acides carboxyliques présents dans les pectines et des groupements acétyles présent dans les hémicelluloses
1625	Vibration en cisaillement de la liaison -OH caractéristique de l'eau libre
1503	Cycles aromatiques de la lignine
1420	Vibration de la liaison carboxyle caractéristique des pectines
1360	Vibration en cisaillement des liaisons C-H de la cellulose et de l'hémicellulose
1310	Agitation des deux liaisons H-C-H des groupements -CH ₂ de la cellulose et de l'hémicellulose
1230	Pic caractéristique de la lignine
1162	Étirement des liaisons C-O des groupements acétyles (présents dans les hémicellulose ou les pectines)
1108	Déformation antisymétrique du groupement C-O-C
1032	Étirement de la liaison C-O
890	Vibration caractéristique de la liaison β de la cellulose

Tableau III. 11 : Principales bandes d'absorption infra-rouge du kénaf

Les bandes caractéristiques de la lignine, de la cellulose et de l'hémicellulose ont ainsi été mises en évidence.

Le Tableau III. 12 présente la composition chimique des fibres de kénaf et du lin par rapport à d'autres types de fibres. Les teneurs en cellulose, en hémicelluloses et en lignine varient notablement pour les fibres de kénaf. La teneur en cellulose des fibres de kénaf du Bénin est dans le même ordre de grandeur que celle des fibres de kénaf du Burkina étudié par Millogo et *al.* (2015) [38] et est plus élevée que celle des autres fibres de kénaf (tableau 4). Cette disparité peut être due au climat, à la nature du sol et aux variétés de la plante. La teneur en hémicelluloses est dans la même plage de valeurs, alors que la teneur en lignine est inférieure à celle souvent reportée dans la littérature. Cette forte variabilité compositionnelle est l'un des problèmes que pose l'emploi des fibres végétales dans les applications industrielles. Elle doit être prise en compte car elle affecte les propriétés des matériaux qui les incorporent.

La comparaison entre les fibres végétales est souvent menée en termes de la teneur en cellulose, car ce constituant à l'influence la plus grande sur les caractéristiques mécaniques des fibres en raison de sa résistance élevée à la traction. La teneur en cellulose des fibres de kénaf est supérieure à celles des fibres de sisal, de ramie et du jute, ce qui peut expliquer le fait que le kénaf a une résistance mécanique plus élevée que ces fibres.

Fibre	Cellulose (%)	Hémicelluloses (%)	Lignines (%)	Autres (composés hydrosolubles, cires, graisses, etc.) (%)	Reference
Kénaif dans cette étude	73	18	6	1,6	
	70	19	3	1.3	[38]
	53±4	18±1,4	8±1.2	-	[42]
	45-57	21,5	8-13	-	[43]
	58±1	22±1	17,5±1,3	2,4±0,4	[44]
Kénaif	60,8	19,2	14,7	-	[39]
	31-39	21,5	15-19	-	[45]
Lin dans cette étude	78.9	7.3	4.0	2,6	
	65-75	15	-	2-5	[46]
	71,2	18,6	2,2	6,0	[47]
	67	11	2	-	[45]
Lin	80,1	14,9	3,1	-	[48]
	82± 3	7 ±3	-	5± 2	[49]
	55	16	18	5	[50]
	74,4	17,9	3,7	0,8	[51]
Chanvre	56.1	10.9]	6	7.9	[52]
	76.12	12.28	5.65	3.29	[53]
Ramie	68.6	13.1	-	-	[49]
Jute	33.4	22.7	28	-	[54]
	64.4	12	-	-	[49]
Sisal	70	12	10	-	[55]
Coco	33.2	31.1	20.5		[52]

Tableau III. 12 : Composition chimique des fibres de kénaif en comparaison à d'autres fibres

3.3. Caractérisation mécanique des fibres de kénaif

3.3.1. Résistance à la traction

La Figure III. 24 présente la variation de la moyenne arithmétique de la résistance à la traction des fibres de kénaif en fonction de la longueur de jauge. On remarque que la résistance diminue quand la longueur de jauge augmente. Cela s'explique par le fait que la rupture survient par la propagation brutale des défauts préexistants et que la densité et la sévérité de ces défauts augmente avec la longueur testée. Ceci est en accord avec les résultats reportés pour d'autres fibres végétales telles que l'alfa, le diss, et le lin [56, 57], ou même pour des fibres synthétiques telles que le verre ou le carbone [58]. Outre cette dépendance à la longueur de jauge, on note aussi une importante dispersion de la contrainte à la rupture. Cette dispersion pourrait s'expliquer par le fait que la section de ces fibres varie sur leur longueur. Quelle que soit la longueur de jauge considérée la résistance moyenne à la traction des fibres de kénaif est supérieure à la résistance à la traction des fibres de sisal, de noix de coco et de palmier à huile

[59,60,61]. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues par Millogo *et al.* sur les fibres de kénaf récoltées dans la région de Bobo-Dioulasso (Burkina-Faso) [62].

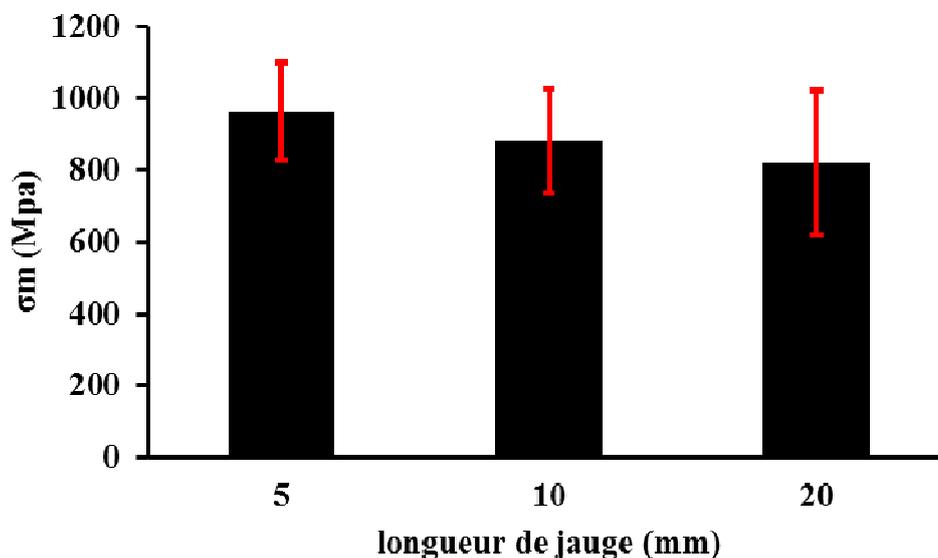


Figure III. 24 : Résistance à la traction – Influence de la longueur des fibres de kénaf

3.3.2. Approche statistique de Weibull

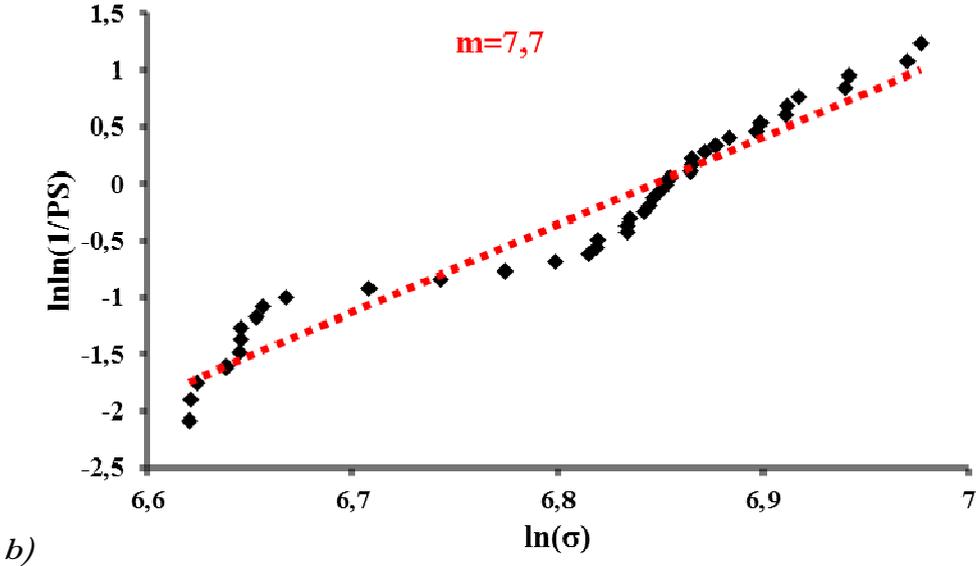
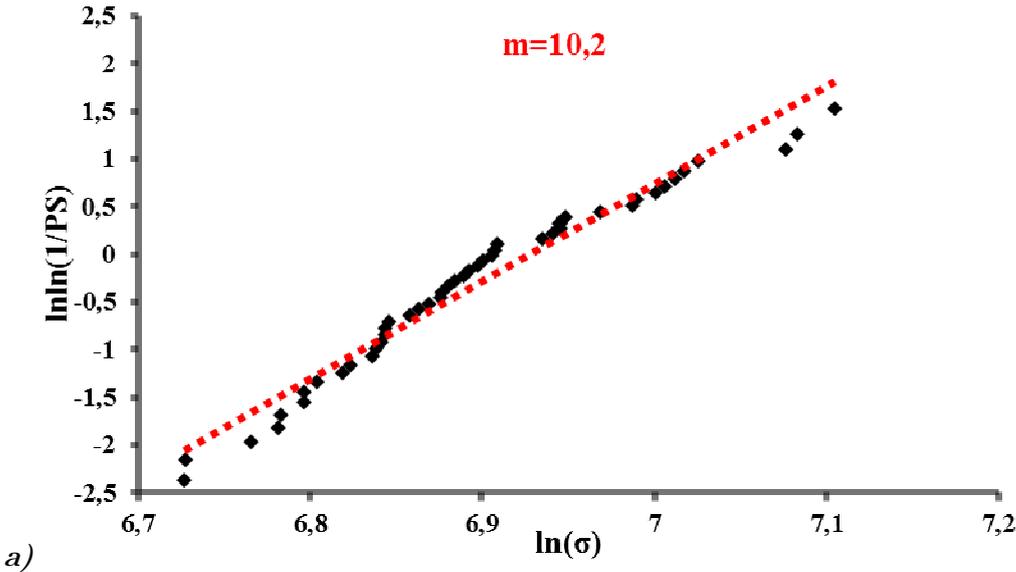
L'écart type important observé au niveau de la Figure III. 24 est dû à la présence de défauts présentant des caractéristiques différentes (localisation, taille, sévérités.). On constate que cet écart croît avec l'augmentation de la longueur de jauge.

Les causes de cette dispersion sont de deux types :

- Causes intrinsèques : elles sont liées aux conditions de croissance des fibres, à la variété, à la situation de la fibre dans la plante, à l'hétérogénéité des fibres et à la différence de cristallinité de la cellulose d'une zone à une autre.
- Causes extrinsèques : elles sont liées aux conditions des essais, on observe par exemple que le collage d'une fibre pour l'essai de traction n'assure pas une détermination précise de la longueur de jauge, la colle enrobe parfois par capillarité une partie de la fibre. L'humidité ambiante modifie les propriétés de la fibre [63].

L'approche probabiliste propose de décrire la rupture en termes d'homogénéité et de sévérité de ces défauts. Nous avons utilisé l'approche statistique de Weibull [64,65] pour décrire le comportement fragile des fibres de kénaf. Cette méthode et ces hypothèses sont présentées dans le chapitre II. Concrètement les contraintes à la rupture obtenues pour une même longueur de jauge sont classées par ordre croissant et une probabilité de rupture leur est associée.

La Figure III. 25 présente la probabilité de rupture de fibres de longueurs ($l_0=5, 10$ et 20 mm,) en considérant qu'il existe une seule famille de défauts sans interaction entre eux. L'ajustement des valeurs expérimentales est fait par la méthode des moindres carrés.



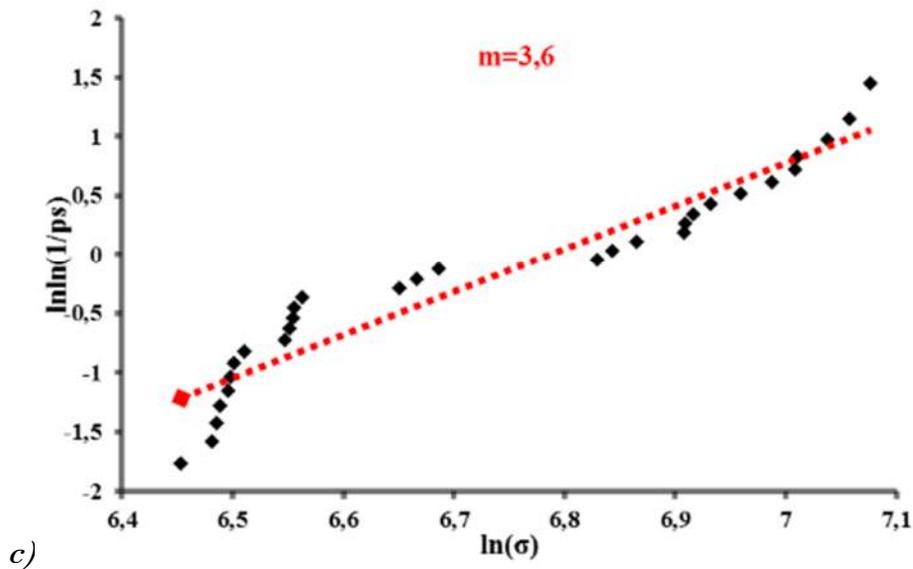


Figure III. 25 : Distributions de Weibull représentant la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture pour des fibres de kénaf de longueur : a) $l=5$ mm ; b) $l=10$ mm ; c) $l=20$ mm

Les résultats indiquent que le paramètre de Weibull (m) est d'autant grand que la longueur de jauge est faible. Ceci traduit une plus grande homogénéité, c'est-à-dire une fiabilité plus grande. On constate que quelle que soit la longueur de jauge considérée, le module de Weibull des fibres de kénaf est supérieur à celui des fibres de lin [53] et des fibres de diss [66]. On remarque également que le module de Weibull des fibres de kénaf est influencé par la longueur de jauge tout comme la contrainte moyenne à la rupture. Cela peut être expliqué par le fait que la contrainte moyenne tout comme le module de Weibull est contrôlée par la taille et le nombre de défauts.

4. Conclusions

L'utilisation d'un matériau exige la maîtrise de ses propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et géotechniques. C'est pour cela que les échantillons BAK et ETI ont été soumis à une série de caractérisations. La caractérisation géotechnique a révélé que BAK est un sol de type A2 (limono-sableux) et ETI un sol de type A3 (argilo-limoneux). L'analyse chimique indique que ces argiles contiennent sensiblement les mêmes éléments chimiques et renferment majoritairement trois oxydes à savoir la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et les oxydes de fer (Fe_2O_3). Les analyses minéralogiques et thermiques ont permis d'identifier, de confirmer et d'évaluer les minéraux contenus dans les échantillons. Ainsi, il ressort que la kaolinite est le minéral majoritaire dans ETI (78,16 %). Le quartz et la kaolinite représentent respectivement 49,43 et 33,11 % des minéraux contenus dans BAK. La similitude de composition des deux sols avec les argiles utilisées dans les domaines des BTC et de la céramique indique que BAK peut être utilisé dans la formulation des briques crues et dans la confection de céramiques fines

(faïence, porcelaine). Par contre ETI peut servir de colorant naturel pour divers usages (coloration de tuiles, briques, etc.) du fait de sa forte teneur en oxyde de fer (13,20%).

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des fibres de kénaf du Bénin ont été également étudiées dans ce travail. Il ressort de cette caractérisation ce qui suit :

- La résistance à la traction des fibres de kénaf diminue quand la longueur de jauge augmente et quelle que soit la longueur de jauge considérée la résistance moyenne à la traction des fibres de kénaf est supérieure à la résistance à la traction des fibres de sisal, de noix de coco, et de palmier à huile ;

- Les fibres de kénaf contiennent de grandes quantités massiques (73%) de cellulose de type I ($I_c = 49,2$), des hémicelluloses (18%) et de la lignine (6%).

Ces résultats prédisposent ces fibres comme renfort de matrices minérales dans la construction.

Bibliographie

- [1] **Ceratec.** *Blocs en terre stabilisée. Technologie de production.* 1987.
- [2] **Guerraoui, F., Zamama, M., & Ibnoussina, M.** *Caractérisation minéralogique et géotechnique des argiles utilisées dans la céramique de Safi (Maroc).* *African Journal of Science and Technology, Science and Engineering*, 9(1), 1-11, 2008.
- [3] **Daot, P., Hays, A., Houben, H., Matur, S., & Vitoux, F.** *Construction en terre par le CRATerre, Edition Parenthèses,* 1991.
- [4] **Wetshondo, O. D.** *Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la province de Kinshasa (RD Congo), Thèse de Doctorat Unique de l'Université de Liège (Belgique),* 2012.
- [5] **GTR.** «*Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme*», fascicule I, principes généraux, 1992.
- [6] **Jouennec, A.** *Traité de céramique et matériaux minéraux. Septima,* 1990.
- [7] **Konan, L.** *Interaction entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium.* . *Thèse de Doctorat Unique, Université de Limoges (France),* 2006.
- [8] **Sorgho, B.** *Caractérisation et valorisation de quelques argiles du Burkina Faso : application au traitement des eaux et aux géomatériaux de construction.* *Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou,* 2013.
- [9] **KEITA, I.** *Géomatériaux argileux du Mali pour la construction. Propriétés mécaniques, durabilité et rôle des tanins.* *Thèse de Doctorat, Université des Sciences Techniques et Technologiques de Bamako ; Université de Limoges,* 2014.
- [10] **Yah, O. H., & Fripiat, J. J.** *Data handbook for clay minerals and other non-metallic minerals.* .*Pergamon Press,* 1979.
- [11] **Sagbo E. Laibi A. Senou M. Josse R. Mensah J. Borschneck D. Noack Y.** *Physico-Chemical and Mineralogical Characterization of some Clays from Coastal Sedimentary Basin of Benin used in Ceramic.* *Res.J.chem.sci.*, 5(12), 1-19, 2015.
- [12] **Ledoussalh.** *Les produits réfractaires.* *Paris: Société française de céramique,* 1985.
- [13] **Amoha, B. K.** *Coloration des blocs d'argile ciment (CIMARG).* *DEA Sciences de la terre, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire,* 2006.
- [14] **Millogo, Y.** *Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route).* *These de Doctorat de l'Université de Ouagadougou,* 2008.
- [15] **Rollet, A. P., & Bouaziz, R.** *L'analyse thermique. Tome 2.*. *Paris: Gauthier-Villars,* 1972.
- [16] **Chenc, Y., Lan, G. S., & Tuanw, H.** *Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts.* *Ceramics International.*, 26, 715-720, 2000.

- [17] **Soro. S.** *Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite. Thèse de Doctorat Unique, Université de Limoges, France, 2003.*
- [18] **Leonel, T.** *Comportement thermique des Compoertement thermique géopolymères obtenus à partir d'une argile kaolinite. Université de Yaoundé 1 - Master en chimie, 2012.*
- [19] **Qtaitat A. M. and Al-Trawneh N. I.** *Characterization of kaolinite of the Baten EL-Ghoul region/south Jordan by infrared spectroscopy. Spectrochimica Acta Part A, 61, 1519-1523, 2005.*
- [20] **Saikia J.B. and Parthasarathy G.** *Fourier transform infrared spectroscopic characterization of kaolinite from Assam and Meghalaya, Northeastern India. Journal of Modern Physics, 1, 206-210, 2010.*
- [21] **Bich C.** “ *Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin: Evolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique*”, Thèse de doctorat Ph.D., Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Spécialité : Génie civil, 255 p, 2005.
- [22] **Seynou M.**, “*Caractérisation de matièrese premières argileuses des sites de Loulouka et de Korona (Burkina Faso): valorisation dans la céramique du carreau,*”Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou, 2009.
- [23] **White J.** “*Interpretation of IR spectra of soil minerals,*” *Soil Science*, vol. 112, n° 1 1, 1671.
- [24] **Frost R. L., Vassalo M.** “*The dehydroxylation of the kaolinite clay minerals using infrared emission spectroscopy,*” *Clay and clay Minerals*, vol. 44, n° 15, pp. 635-651, 1996
- [25] **Rouexhet P. E., Samudacheaton N., Jacobs H., Antoro.** “*Attribution of the stretching bands of kaolinite,*” *Clay minerals*, vol. 12, pp. 171 – 179, 1977.
- [26] **A.M'leyeh, E. Srasra, A. Cheref.** «*Adsorption of heavy metals by natural clays of Borj Chekir, SW of Tunis.,*» chez *Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Mangement, Tunis, 2002*
- [27] **Bi Irie Herve GOURE DOUBI.** «*Etude de la consolidation des matériaux "géométriques" à base d'argile latéritique : effet des acides et des phases ferriques,*» Université de Limoges, Thèse, 2013
- [28] **L. ZERBO.** «*Transformations thermiques et réorganisation structurale d'une argile du Burkina Faso,*» thèse, 2009
- [29] **H-Viallis Terrisse,** *Inter action des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles, France: Université de Bourgogne, Thèse, 2009.*
- [30] **J.T. Klopragge, R.L Forst, L. Hiskey.** «*Infrared emission spectroscopic study of the dehydroxylation of some hectorites,*» *Thermochimica* , vol. 345 , pp. 145 – 156, 2000.

- [31] J. Mardejova, P. Komdel. *Baseline studies of the Clay minerals society source Clays: Infrared methods.*”, vol. 49, *Clays and clay minerals*, 2001
- [32] R. Palanivel, G. Veraj. «*FTIR and FT-Raman spectroscopic studies of fired clay artifacts recently excavated in Tamilnadu,*» *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol. 45, pp. 501-508, 2007.
- [33] CHAFEI S. *Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin*, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie 2014.
- [34] Page, J., Khadraoui, F., Boutouil, M., & Gomina, M., *Traitements des fibres de lin: influence sur l'hydratation d'un composite ciment-lin*. *Conference Paper*, 2016.
- [35] NOZAHIC V., AMZIANE S. «*Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder* », *Compo. Part A: Applied Science and Manu.* vol. 43, n° 11, p. 1837-1849, 2012.
- [36] THUAULT A., EVE S., BLOND D., BREARD J., ET AL. «*Effects of the hygrothermal environment on the mechanical properties of flax fibres* », *Journal of Composite Materials*, vol. 48, n° 14, p. 1699-1707, 2014.
- [37] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin Jr., and C.M. Conrad. “*An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose using the X-Ray Diffractometer*”, *Textile Research Journal*, pp. 786-794, 1958.
- [38] Aubert, J.E.; Maillard, P.; Morel, J.C.; Al Rafii, M. *Towards a simple compressive strength test for earth bricks?* *Mater. Struct.*, doi:10.1617/s11527-015-0601-y, 2015.
- [39] Aubert, J.E.; Fabbri, A.; Morel, J.C.; Maillard, P. *A soil block with a compressive strength higher than 45 MPa!* *Constr. Build. Mater.* 47, 366–369, 2013.
- [40] Younoussa Millogo, Jean-Emmanuel Aubert, Erwan Hamard and Jean-Claude Morel. “*How Properties of Kenaf Fibers from Burkina Faso Contribute to the Reinforcement of Earth Blocks*”, *Materials*, 8, 2332-2345, 2015.
- [41] Shin, H.K.; Jeun, J.P.; Kim, H.B.; Kang, P.H. *Isolation of cellulose fibers from kénaf using electron beam*. *Radiat. Phys. Chem.*, 81, 936–940, 2012.
- [42] Godin, B.; Ghysel, F.; Agneessens, R.; Schmit, T.; Gofflot, S.; Lamaudière, S.; Sinnaeve, G.; Goffart, J.P.; Gerin, P.A.; Stilmant, D.; et al. *Détermination de la cellulose, des hemicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération*. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 14, 549–56,. 2010.
- [43] Akil, H.M.; Omar, M.F.; Mazuki, A.A.M.; Safiee, S.; Ishak, Z.A.M.; Abu Bakar. *AKénaf fiber reinforced composites: A review*. *Mater.* 32, 4107–4121, 2011.

- [44] Jonoobi, M.; Harun, J.; Tahir, P.M.; Shakeri, A.; SaifulAzry, S.; Makinejad, M.D. *Physicochemical characterization of pulp and nanofibers from kénaf stem. Mater. Lett.* 65, 1098–1100, 2011.
- [45] Morel, J.C.; Gourc, J.P. *Behavior of sand reinforced with mesh elements. Geosynth. Int.* 4, 481–508, 1997.
- [46] A.K. Bledzki, J.Gassan. “Composites reinforced with cellulose based fibres” *Progress in Polymer Science, Volume 24*, 221-274, 1999.
- [47] C. Baley. “Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase”. *Composites: Part A, Volume 33*, 939-948, 2002.
- [48] A. Khalil, H.D. Rozman, N.N. Ahmad, H. Ismail “Acetylated plant-fiber-reinforced polyester composite: a study of mechanical, hydrothermal, and aging characteristics” *Polymer-plastics technology and engineering, Volume 39-4*, 757-81, 2003.
- [49] P. Davies, C. Morvan, O. Sire, C. Baley. “Structure and properties of fibres from sea-grass (*Zostera marina*)” *Journal of Materials Science, Volume 42-13*, 4850-4857, 2007.
- [50] C. Garcia-Jaldon, D. Dupeyre, M.R. Vignon. “Fibres from semi-retted bundles by stream explosion treatment” *Biomass & Bioenergy, Volume 14*, 251-260, 1998.
- [51] S.K. Batra. “Other long vegetable fibers *Handbook of fibre chemistry*” Lewin (M.), Pearce (E.M.), editors. *Handbook of fibre Science and Technology New York. Marcel Dekker, Volume IV, Fibre Chemistry* 505-575, 1998.
- [52] D. Sedan. “Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite” *Thèse de doctorat de l'Université de Limoges*, 2007.
- [53] S. Korte, M.P. Staiger. “Effect of processing route on the composition and properties of hemp fibre” *Dibers and Polymers, Volume 9-5*. 2008
- [54] G. Ramakrishna, T. Sundararajan “Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar” *Cement and Concrete Composites, Volume 27* 575-582, 2005.
- [55] R.D. Toledo Filho, F. de Andrada Silva, E.M.R. Fairbain, J. De Almeida Melo Filho “Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates” *Construction and Building Materials, Volume 23*, 2409-2420, 2009.
- [56] Mouhoubie S. “Caractérisation de l'interface d'un composite fibre végétale / polypropylène” *Thèse Magister, Université Farhat Abbas, Algérie, mécanique appliqué*, 2008.
- [57] T. Anthony. *Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin, thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, France, Chimie des Matériaux*, 2011.

- [58] Kouakou H, Morel JC. *Mechanical performance of nonindustrial building material manufactured with clay as natural binder. Appl Clay Sci ;44:27–34, 2009.*
- [59] Ghavami K, Toledo Filho RD, Barbosa NP. *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. Cem Concr Compos; 21:39–48, 1999.*
- [60] Juárez C, Guevara B, Durán-Herrera A. *Mechanical properties of natural fibers reinforced sustainable masonry. Construc Build Mater; 24:1536–41, 2010.*
- [61] Ismail S, Yaacob Z. *Properties of laterite bricks reinforced with oil palm empty fruit bunch fibres. Pertanika J Sci Technol ; 19 (1):33–43, 2011.*
- [62] Younoussa M, Jean-Claude M., Jean-Emmanuel A., Khosrow G. “*Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers*”, *Construction and Building Materials* 52, 71–78, 2014.
- [63] A.Bendahou, Y.Habibi, H. Kaddafi et A. Dufresne. *Composite Material based on lingo cellulosic fiber and thermoplastic matrices (IPP and LDPE) "Revue Roumaine de Chimie, 54(7), 557–563, 2009.*
- [64] W. A. Weibull. « *A statistical distribution function of wide acceptability* », *appl. Mech, vol. 18, p. 293–297, 1951.*
- [65] M. Calvo. « *Application of the Weibull statistics to the characterization of metallic glass ribbons* », *Journal of Materials Science, vol. 24, no. 5, p. 1801–1808, 1989.*
- [66] Y. Lamia. “*Caractérisation d’un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)*”, thèse Magister, Université Ferhat Abbas-setifufas, Algérie, mécanique appliqué, 2011.

Chapitre :

IV. ETUDE DE COMPORTEMENT HYGRO- THERMOMECHANIQUE DES BLOCS PRISMATIQUES $4*4*16\text{ cm}^3$

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des éprouvettes $4x4x16\text{ cm}^3$ de mélanges conçus pour la confection de blocs de maçonnerie. Il est subdivisé en trois phases :

- *Phase 1 : recherche d'une formulation de BTC sans additifs optimisée en termes de paramètre de mise en œuvre (contrainte de compactage, teneur en eau), et d'additif végétal (taux et longueur de fibres de kéraf). La détermination de cet optimum est basée sur une caractéristique structurale (la porosité totale), les propriétés mécaniques (résistance à la compression simple et résistance à la flexion trois points), et une caractéristique fonctionnelle (la conductivité thermique).*

- *Phase 2 : étude du comportement mécanique et hygrométrique des formulations issues de la première phase et maintenant stabilisées aux liants (ciment et laitier de haut fourneau). Dans cette phase, trois teneurs en ciment (3, 5 et 7%) et deux teneurs en laitier de haut fourneau (5 et 10% activés par 3 ou 5% de ciment) sont utilisées.*

- *Phase 3 : influence des conditions de cure sur les résistances mécaniques des blocs renforcés par les fibres de kéraf et stabilisés par des liants.*

1. Optimisation des paramètres physiques

1.1. Optimisation de la teneur en eau et choix de la contrainte de compactage

Plusieurs paramètres physiques tels que la granulométrie du sol, la teneur en eau, la méthode et la contrainte de compactage influencent les propriétés des blocs de terre comprimée, mais ces derniers sont plus sensibles à la teneur en eau qu'aux autres paramètres. D'après la littérature, le compactage statique semble mieux adapté aux sols argileux. Par ailleurs, la détermination de la teneur en eau optimale pour les BTC à partir de l'essai Proctor classique n'est pas appropriée car l'énergie de compactage n'est pas la même que celle d'un compactage statique utilisé pour la fabrication des BTC. Ceci nous a poussés à appliquer un compactage statique par le biais d'une presse hydraulique. Le but est de reproduire un équivalent de l'essai Proctor, mais avec une compression statique, en faisant varier la teneur en eau du matériau et en déterminant le poids volumique sec obtenu après compactage. Cet essai est reproduit pour plusieurs contraintes de compression afin d'étudier son influence sur la compacité du matériau produit. Le compactage est réalisé sans drainage du matériau afin de s'affranchir de la variation d'humidité durant l'essai. Le tracé de l'évolution du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour les différentes contraintes de compression permet de remonter à la teneur en eau optimale correspondant au poids volumique sec maximal.

La Figure IV. 1 présente la variation du poids volumique sec des BTC non stabilisées en fonction de la teneur en eau pour différentes contraintes de compactage. L'analyse de cette figure révèle que le poids volumique sec augmente avec l'accroissement de la contrainte de compactage. Pour chaque contrainte de compactage on retrouve une teneur en eau optimale correspondant à un poids volumique sec maximal. L'optimum varie en fonction de la contrainte de compactage. La teneur en eau optimale se déplace vers les faibles teneurs en eau au fur et à mesure que la contrainte de compaction augmente.

On remarque que l'augmentation du poids volumique sec avec la contrainte de compaction n'est effective que pour les faibles teneurs en eau (inférieures à 12%), et que pour des teneurs en eau supérieures à 12% l'augmentation de la contrainte de compaction conduit à une diminution du poids volumique pour une même teneur en eau.

Le poids volumique sec maximal enregistré pour toutes les contraintes expérimentées est égal à 22,1 kN/m³ ; il est obtenu pour une contrainte de compactage de 7 MPa. Cette valeur est suivie de 21,8 kN/m³ et de 21, 4 kN/m³ respectivement pour des contraintes de compactage de 6 et 5 MPa. La différence entre ces trois valeurs n'étant pas grande (l'écart relatif maximum est de 3%) et compte tenu du différentiel de coût pour la population locale entre une presse de capacité 7 MPa et une autre de capacité 5 MPa, nous limiterons la contrainte de compactage à 5 MPa. A cette contrainte est associée une teneur en eau optimale de 10% pour les BTC non stabilisées.

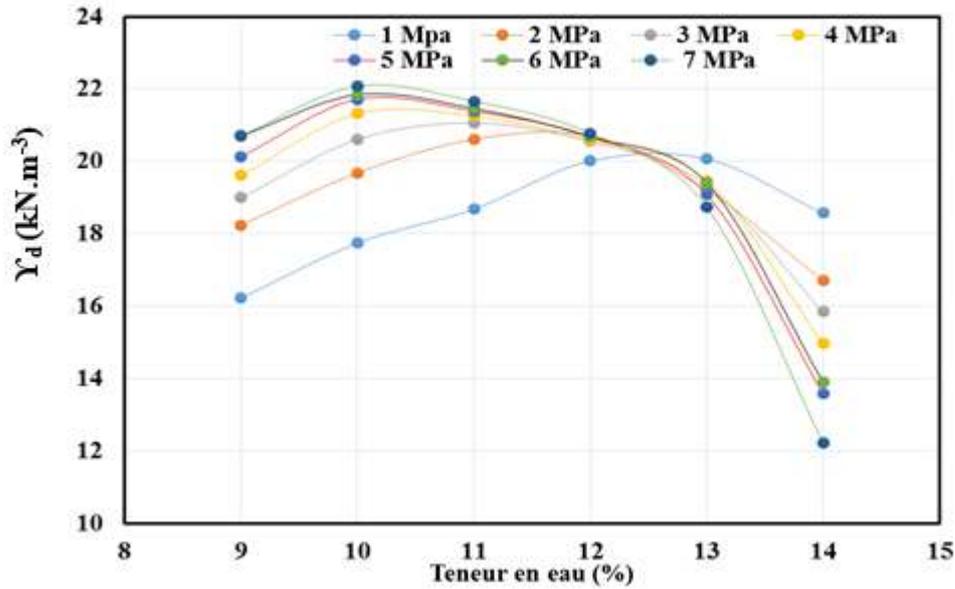


Figure IV. 1 : Poids volumique sec des BTC non stabilisés en fonction de la teneur en eau pour différentes contraintes de compactage

L'ajout de ciment au sol entraînant la modification de la granularité de ce dernier, nous amène à reprendre l'essai sur les mélanges réalisés avec 3%, 5% et 12% de ciment (par rapport au poids du sol). Dans ce cas, la contrainte de 5 MPa retenue au niveau de l'essai précédent a été utilisée. Les résultats de cet essai sont présentés sur la Figure IV. 2.

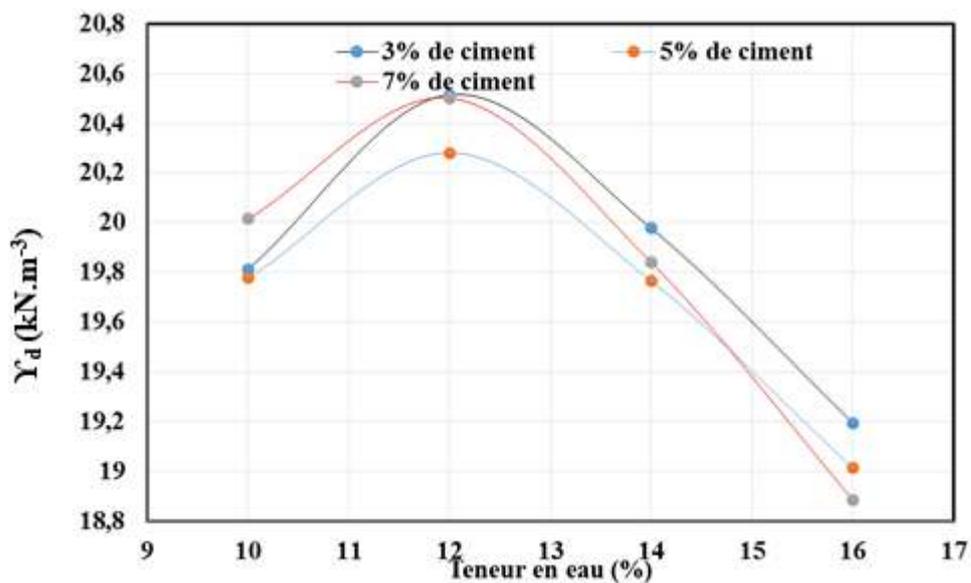


Figure IV. 2 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau pour différentes teneurs en ciment

L'analyse de cette figure révèle que le poids volumique sec évolue avec l'augmentation de la teneur en ciment. On retrouve une même valeur de teneur en eau optimale pour les trois taux de ciment, associée à différentes valeurs du poids volumique sec. Dans le but de vérifier la

corrélation entre le poids volumique sec, la teneur en eau et les propriétés mécaniques, nous avons réalisé les essais de compression et de flexion trois points sur les blocs stabilisés au ciment après une période de cure de 28 jours à 20°C et 50% d'humidité relative. Les Figure IV. 3 et IV. 4 présentent respectivement les variations de la résistance à la compression sèche et à la flexion 3 points en fonction de la teneur en eau et différents taux de ciment. Les résistances en compression et en flexion 3 augmentent avec le taux en ciment. Pour chaque taux de ciment la teneur en eau optimale qui correspond à la valeur de la résistance maximale en compression ou en en flexion 3 points est identique à celle déterminée par rapport au poids volumique sec maximal, c'est à 12%.

Ainsi donc, pour les BTC non stabilisés, les résistances mécaniques augmentent quand le poids volumique sec est accru. Ces résultats nous ont amenés à choisir une contrainte de 5 MPa pour le compactage de tous nos mélanges, 10% de teneur en eau pour les mélanges de sols sans ajout de liants et 12% pour les mélanges avec le ciment. Le choix de la contrainte de compactage est justifié par les performances obtenues et le coût supportable par les communautés locales de l'investissement dans une presse.

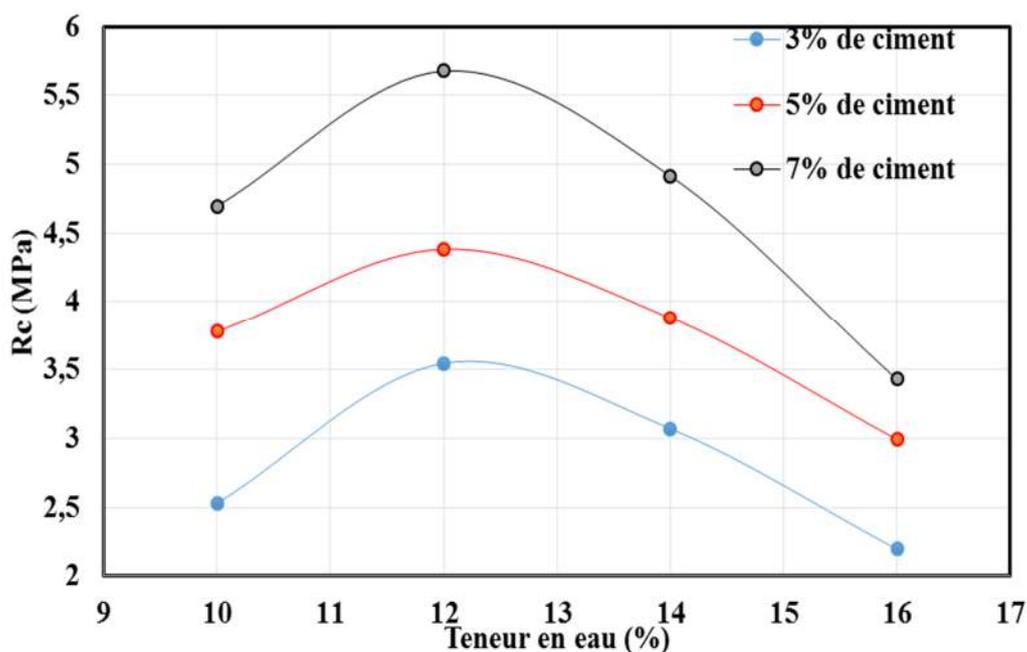


Figure IV. 3 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau pour différentes teneurs en ciment

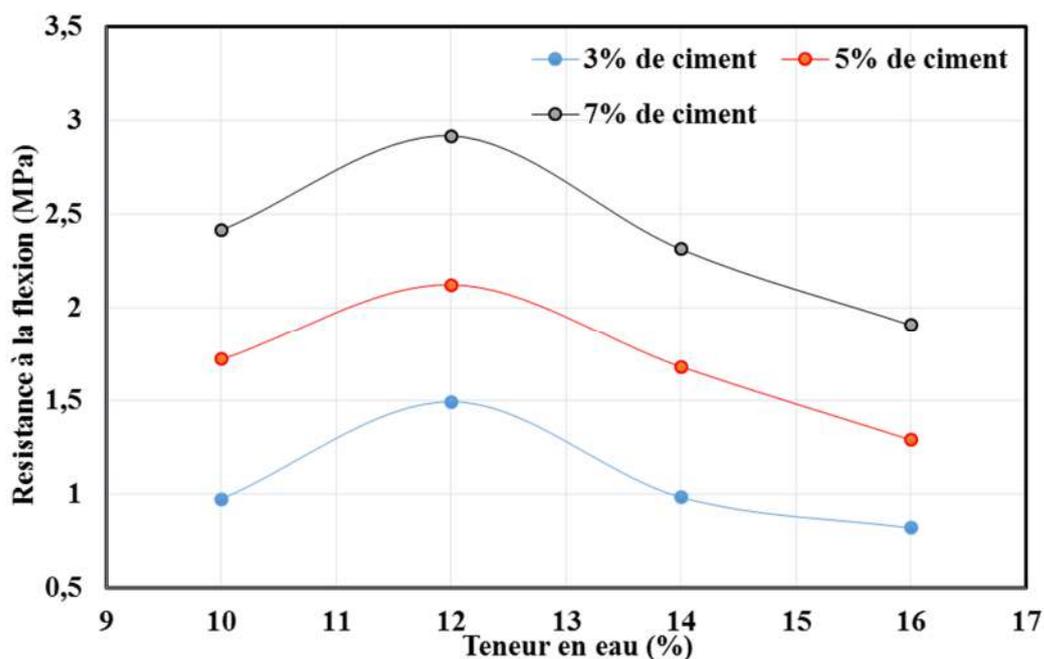


Figure IV. 4 : Variation de la résistance à la flexion fonction de la teneur en eau à différentes teneurs en ciment

1.2. Optimisation du taux et de la longueur des fibres de kénaf

Dans le but de trouver un optimum du taux et de la longueur de fibres à incorporer au sol, nous procédons à l'étude de la microstructure et du comportement thermomécanique de BTC fibrés. Trois taux massiques de fibres (0,5; 1 et 1,5%) de longueur 5, 10, 20 ou 30 mm ont été incorporés au sol BAK. L'optimum de formulation a été recherché en se basant essentiellement sur les essais mécaniques (résistance à la compression sèche, résistance à la flexion 3 points) et la conductivité thermique des BTC fibrés.

1.2.1. Effet des fibres sur la résistance à la compression simple

La Figure IV. 5 présente les variations des résistances à la compression simple des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

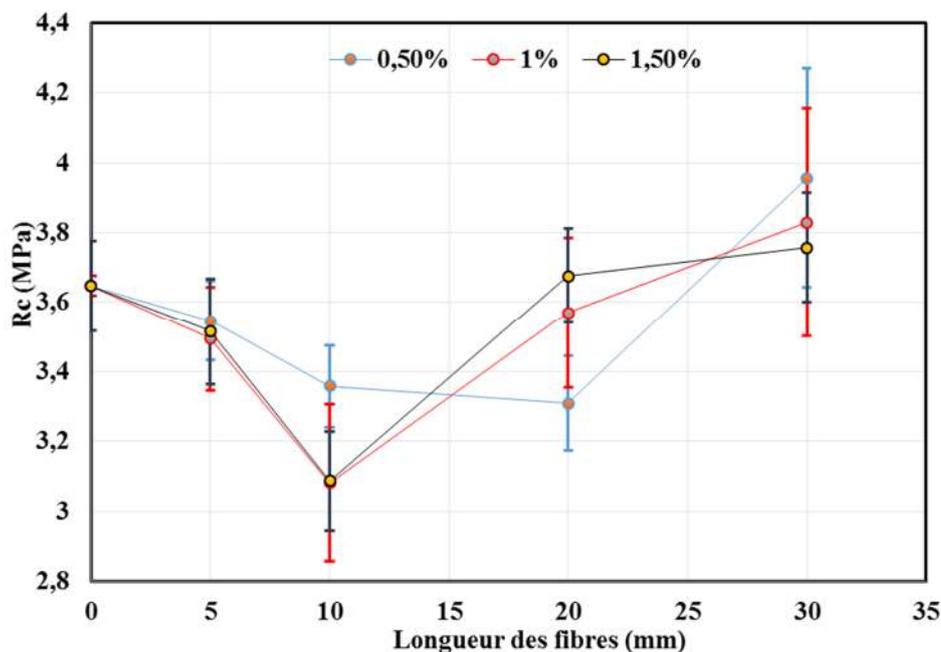


Figure IV. 5 : Résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs

Pour les trois teneurs en fibres de kénaf considérées dans cette étude, la résistance à la compression du BTC (3, 65 MPa) n'est pas améliorée pour les longueurs de 5, 10 ou 20 mm, elle est même nettement diminuée pour les tailles de 5 et 10 mm. Par contre, les fibres de 30 mm de long rehaussent quelque peu la résistance à la compression, quelle que soit leur longueur. Ces observations peuvent être rapprochées des variations de la porosité (Figure IV. 6). L'évolution de la porosité en fonction des longueurs de fibres incorporées au BTC présente la même allure pour toutes les teneurs considérées ; les valeurs de porosité étant d'autant élevées que la teneur est forte. La forte augmentation de la porosité du BTC avec l'ajout de 0,5% de fibres de longueur 5 mm (de 15,5% à 17,75%) s'explique par le rôle d'entraînement d'air qu'elles jouent dans l'étape de malaxage [1, 2, 3, 4]. Pour cette même teneur, la porosité diminue quand la longueur de fibre est accrue (17,5%, 17,20% et 16% pour les longueurs de 10 mm, 20 mm et 30 mm, respectivement).

La résistance à la compression des BTC diminue avec l'ajout des fibres de 5, 10 et 20 mm quel que soit le taux d'incorporation considéré. On note une légère augmentation de la résistance à la compression simple pour des fibres de longueur 30 mm : les accroissements relatifs sont de 8,5 ; 4,94 et 3,02 % respectivement pour les teneurs de 0,5 ; 1 et 1,5 %. Ce comportement à la compression simple des BTC fibrés est corrélé à la porosité totale de ces composites comme en témoigne la Figure IV. 6. En effet on note une augmentation des pores avec l'augmentation des teneurs en fibres. Ces pores créés par l'incorporation des fibres diminuent avec l'augmentation de la longueur de ces dernières. Cette diminution est beaucoup plus significative avec les fibres de 30 mm, ce qui explique l'augmentation de la résistance à la compression observée pour les fibres de 30 mm. En effet la longueur de ces fibres était

suffisante pour empêcher la propagation des fissures, ce qui contribue à l'amélioration de la résistance à la compression. Pour les fibres plus petites (5, 10 et 20 mm), la résistance à la compression est plus petite par rapport à celle des BTC non renforcées en raison de leur longueur qui est insuffisante pour s'opposer à la propagation des fissures. L'augmentation de la résistance à la compression qu'engendre l'ajout des fibres de 30 mm par rapport aux blocs non renforcés, est dans le même ordre de grandeur que celle observée par Millogo et *al.* (2014) [5] qui ont étudié l'effet de l'ajout des fibres de kénaf sur les blocs d'adobes compressés, et supérieure aux autres valeurs rapportées dans la littérature sur les blocs de sol stabilisés avec d'autres fibres [6, 7, 8, 9], ce qui pourrait être dû à la forte résistance à la traction des fibres de kénaf par rapport à celles utilisées dans d'autres études. En comparant les valeurs de la résistance à la compression obtenues dans le cas de notre étude on note une augmentation de 38% par rapport à celle obtenues par Millogo et *al.* (2014) ce qui traduit l'amélioration de la résistance mécanique qu'induit les BTC par rapport aux blocs d'adobes.

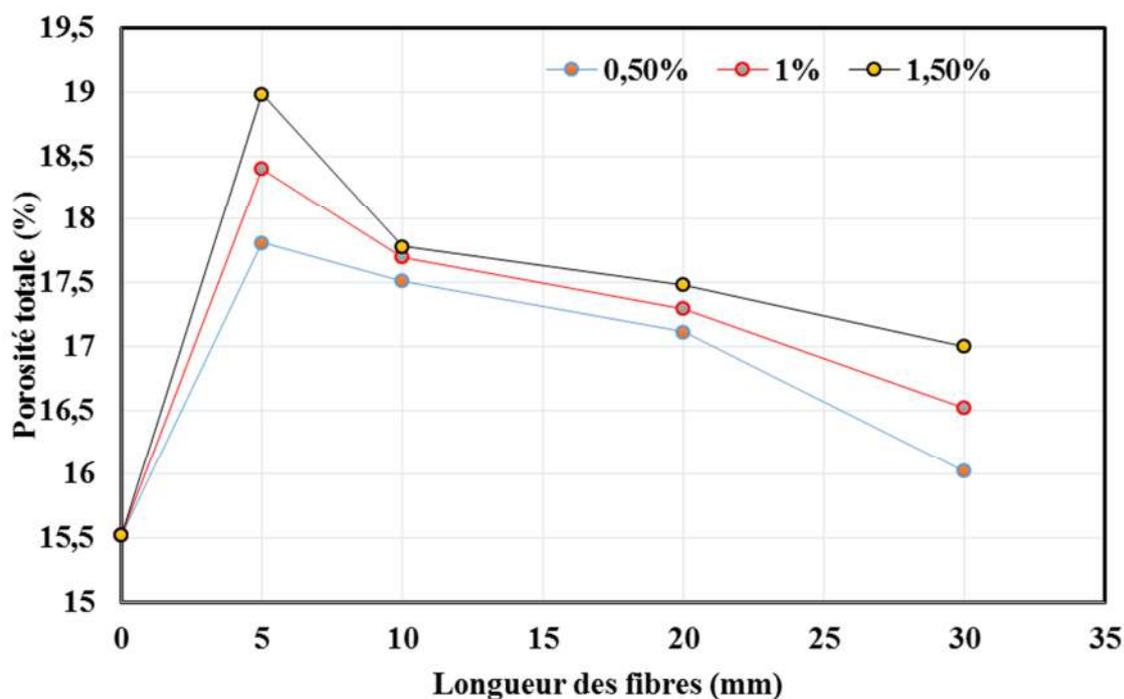


Figure IV. 6 : Variation de la porosité totale en fonction de la longueur des fibres à différentes teneur en fibres

1.2.2. Effet des fibres sur la résistance à la flexion trois points

Quoique les éléments élancés dans les constructions soient souvent soumis à des contraintes de compression, de nombreux autres éléments sont sollicités en flexion et en cisaillement dans le cas de vents importants, de séisme, de chargement ponctuel et de

tassement différentiel dans les fondations. L'étude du comportement à la flexion est donc d'importance.

1.2.2.1. Courbes de comportement

Les courbes contrainte-déplacement en flexion 3 points du BTC non fibré (B_0) et du BTC incorporant 0,5% de fibres de kénaf de longueur 30 mm $BF_{0,5}^3$ sont présentées dans la Figure IV. 7. B_0 présente un comportement élastique linéaire jusqu'à la rupture qui survient par une propagation catastrophique de fissures issues d'un défaut (pore) dans le matériau (domaine I). Dans le cas du matériau fibré $BF_{0,5}^3$, l'accroissement de fissure à partir d'un défaut interne (matérialisé par la baisse rapide de contrainte) est bloqué dans un premier temps par l'action des fibres localisées au voisinage du front de fissure (augmentation de la contrainte). Les mécanismes mis en œuvre sont : le contournement progressif des fibres (déchaussement, extraction de la matrice minérale, microfissuration de la matrice, mise en tension des fibres). L'activation de ces mécanismes est matérialisée par la remontée de la contrainte et l'accroissement du déplacement jusqu'à la contrainte maximale (domaine II). Après ce stade, la rupture des fibres, leur extraction progressive de la matrice par frottement et les microfissurations se conjuguent pour créer une macrofissure dont la taille augmente avec le déplacement (domaine III). Les domaines II et III d'endommagement croissant quand la déformation augmente constituent le stade de comportement ductile du matériau [10].

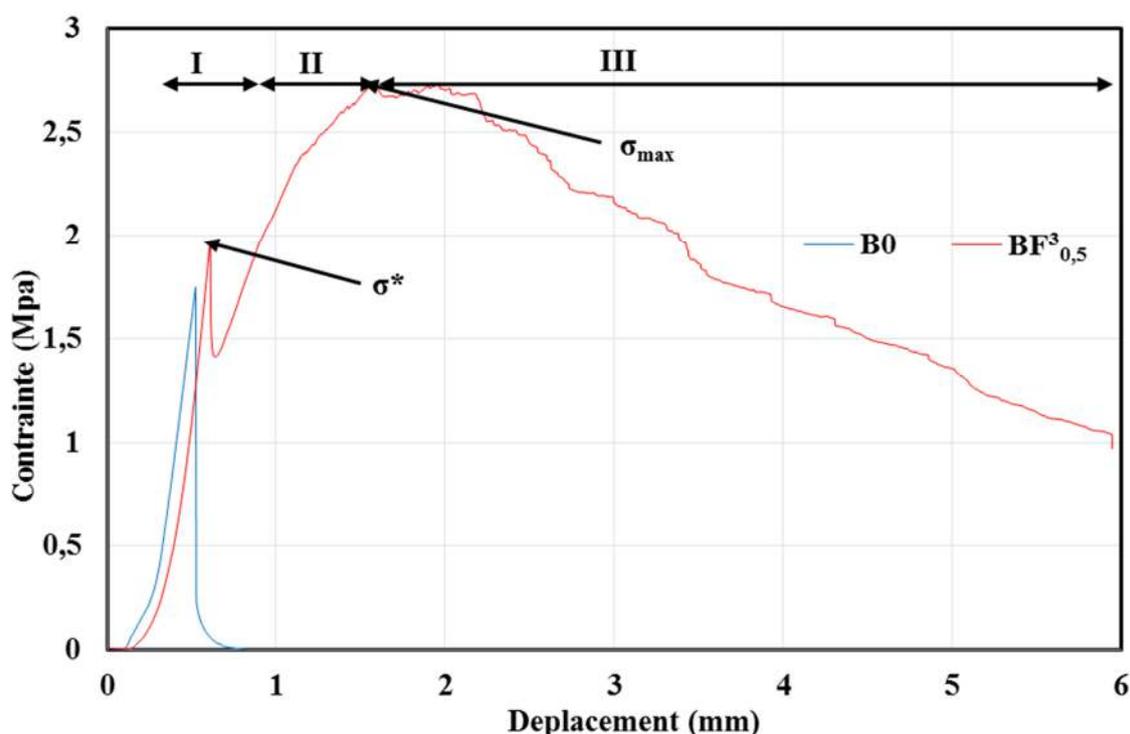


Figure IV. 7 : Courbe contrainte-déplacement des blocs.

Des détails des faciès de rupture de B_0 et $BF_{0,5}^3$, sont présentés dans les micrographies MEB dans la Figure IV. 8. Le relief quasiment plat dans la Figure IV. 8a illustre la rupture

fragile de B₀. Le déchaussement prononcé des fibres et les microfissures matricielles dans la Figure IV. 8b sont associés au comportement post-pic du composite fibré.



Figure IV. 8 : Image MEB de la face de rupture d'une BTC après un essai de flexion 3 points
– a) sans fibre ; b) avec fibres

1.2.2.2. Résistance à la rupture

A partir des courbes de comportement, la résistance à la rupture est calculée en utilisant la charge maximale enregistrée au cours de l'essai (relation II.22 du chapitre II). Quand le domaine II ne présente pas un niveau de contrainte plus élevé que σ^* , la résistance à la flexion est donc σ^* . L'ajout de fibres n'améliore donc pas systématiquement la résistance à la flexion du BTC [10], par contre il accroît notablement sa ténacité (capacité à résister à la propagation brutale de fissure).

La résistance à la flexion 3 points est présentée dans la Figure IV. 9 en fonction de la longueur de fissure pour les trois teneurs explorées dans cette étude. Globalement, pour toutes les teneurs en fibres la résistance décroît quand leur longueur est accrue jusqu'à 20 mm. Seules les fibres de 30 mm de long permettent de surpasser la résistance du BTC non fibré. Ce résultat est attribué à la réduction importante de la porosité quand les fibres les plus longues sont utilisées. Cette augmentation de la résistance à la flexion trois points résultant de l'ajout des fibres de longueurs 30 mm pourrait être due d'une part à la longueur suffisante des fibres à s'opposer à la propagation des fissures après apparition de ces dernières et d'autre part à la bonne adhérence des fibres à la matrice argileuse et principalement à leur haute résistance à la traction liée à leur teneur élevée en cellulose (70% en poids). En effet la cellulose est connue pour sa haute résistance à la traction (moyenne 500 MPa). L'importance de l'incorporation des fibres est qu'elles renforcent les blocs après l'échec de la matrice du sol, augmentant ainsi la ductilité de ces blocs.

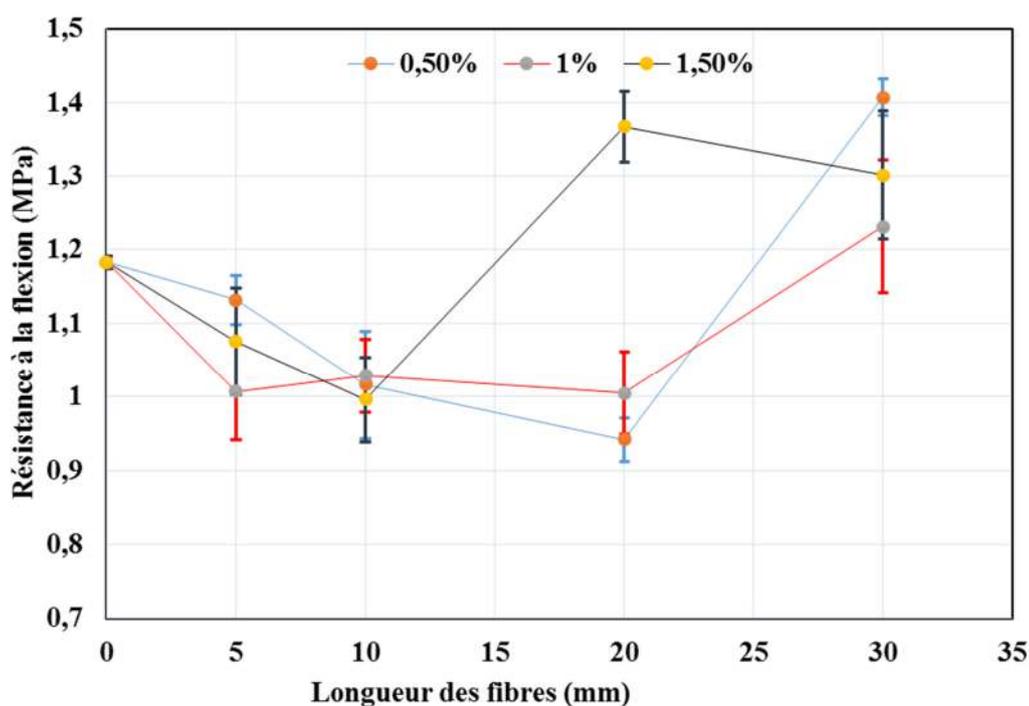


Figure IV. 9 : Résistance à la flexion 3 points des BTC en fonction de la longueur des fibres : Influence de la teneur en fibres

1.2.3. Effet de l'ajout des fibres sur la conductivité thermique des BTC

L'évolution de la conductivité thermique (λ) en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs en fibres est présentée à la Figure IV. 10. A partir d'une valeur de 1,7 W/mK pour le BTC non renforcé (B_0), la conductivité thermique décroît de 16% avec l'ajout de 0,5% de fibres de kénaf de longueur 5 mm, de 22% pour une longueur de 20 mm et 32% pour 30 mm. Avec des teneurs en fibres plus importantes, les valeurs sont un peu plus faibles mais l'allure décroissance est la même : $\lambda = 1,15$ W/mK pour le matériau incorporant

1,50% de fibres de longueur 30 mm. Cette tendance à la baisse est la résultante de deux phénomènes antagonistes. D'une part, l'augmentation de la densité du BTC (diminution de la porosité totale) non fibré sous l'effet du compactage contribue à accroître la conductivité thermique. D'autre part, la présence des fibres très peu conductrices de la chaleur, contribue à diminuer la conductivité, ce d'autant qu'elles sont longues et que leur teneur est élevée. Le comportement thermique est donc globalement en phase avec l'évolution de la porosité (Figure IV. 6), comme l'ont relevé certains auteurs [11]. L'incorporation de fibres végétales au BTC est une stratégie utilisée depuis des lustres pour la fabrication de matériaux de construction dans les régions chaudes, le choix de la nature des fibres, leur teneur et longueur ainsi que la nature de la matrice minérale sont les paramètres à optimiser. Toutefois, ces BTC fibrés ne peuvent pas être classés dans la catégorie des isolants thermiques ou des matériaux de correction thermique. Signalons que les valeurs de conductivité thermique reportées ici avec des fibres de kénaf sont plus basses que celles obtenues pour un sol renforcé par de la paille ou du sisal [12,13].

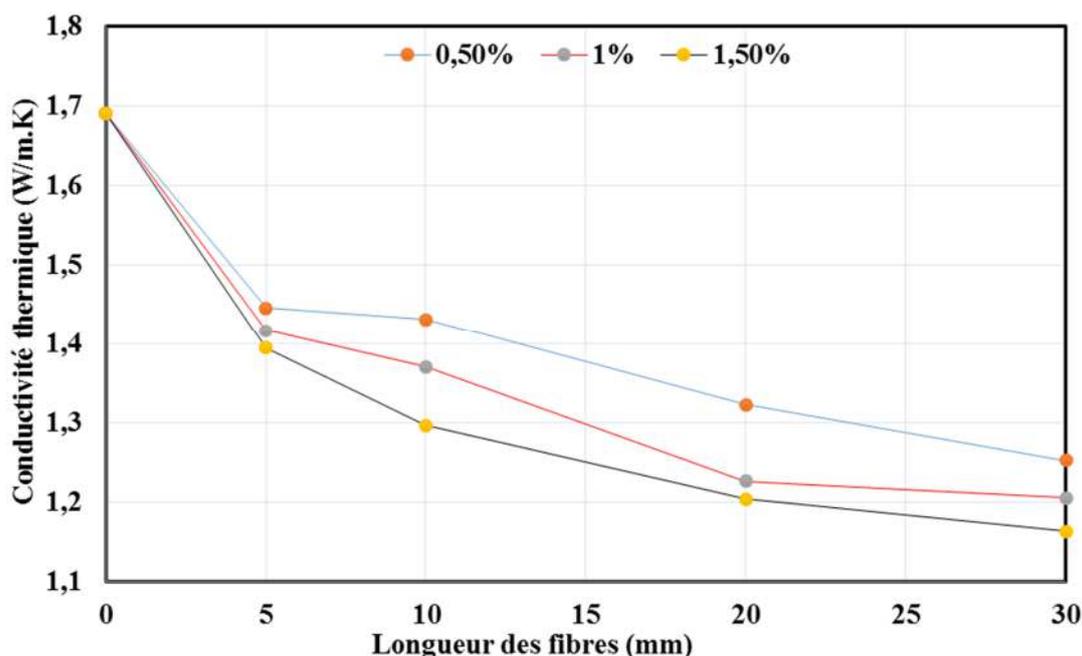


Figure IV. 10 : Variation de la conductivité thermique des blocs en fonction de la longueur des fibres pour différente teneur en fibres

Du point de vue du comportement thermique, la meilleure formulation est $BF_{1,5}^3$ qui correspond à la diminution de la conductivité thermique de 45,5%. Cependant, cette teneur en fibres et sa longueur affaiblissent les résistances mécaniques ce qui peut ne pas être acceptable dans le cas des BTC.

1.2.4. Effet de l'ajout des fibres sur le module d'Young dynamique des BTC

La Figure IV. 11 présente la variation du module d'Young dynamique des BTC en fonction de la teneur en fibres et de leur longueur. Cet essai est réalisé après stabilisation de la masse des éprouvettes.

De l'analyse de cette figure il ressort que :

Une diminution notable du module d'Young dynamique est relevée avec l'ajout de fibres courtes (5 mm) au BTC, indépendamment de leur teneur. Ceci est corrélé à une augmentation de la porosité totale (Figure IV. 6). Des valeurs du module d'Young dynamique similaires à celui du BTC non renforcé sont obtenues pour des longueurs des fibres de 20 et 30 mm, c'est-à-dire pour les plus faibles porosités.

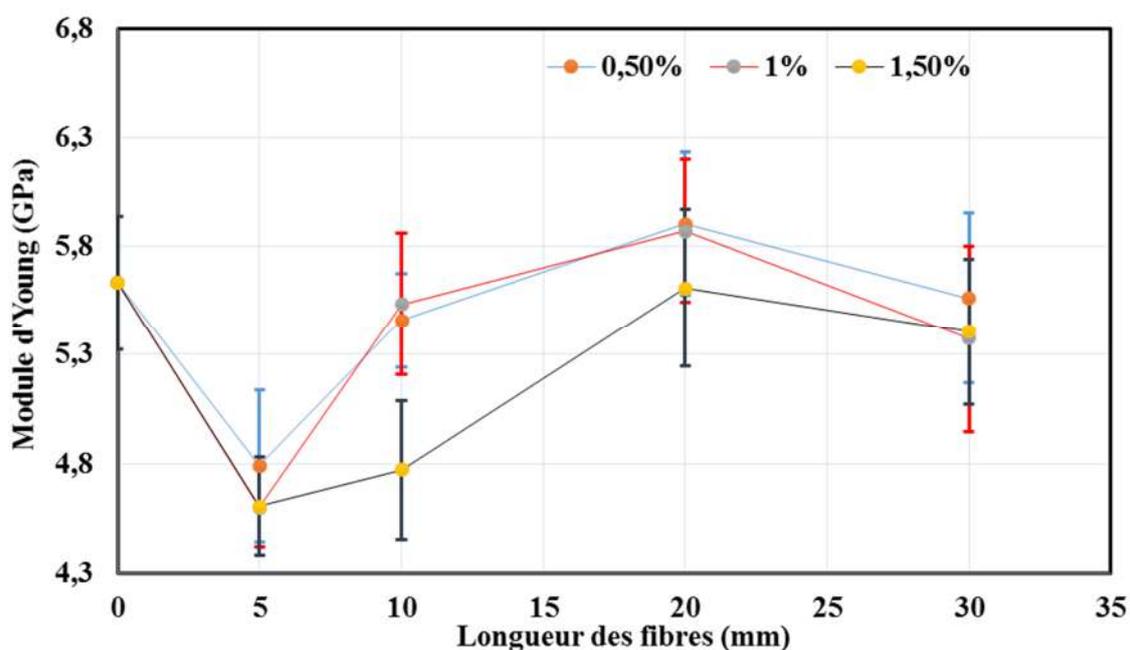


Figure IV. 11 : Variation du module d'Young dynamique en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

1.2.5. Effet des fibres sur la remontée capillaire d'eau des blocs

Les résultats des essais de remontée capillaire d'eau sont présentés sur la Figure IV. 12

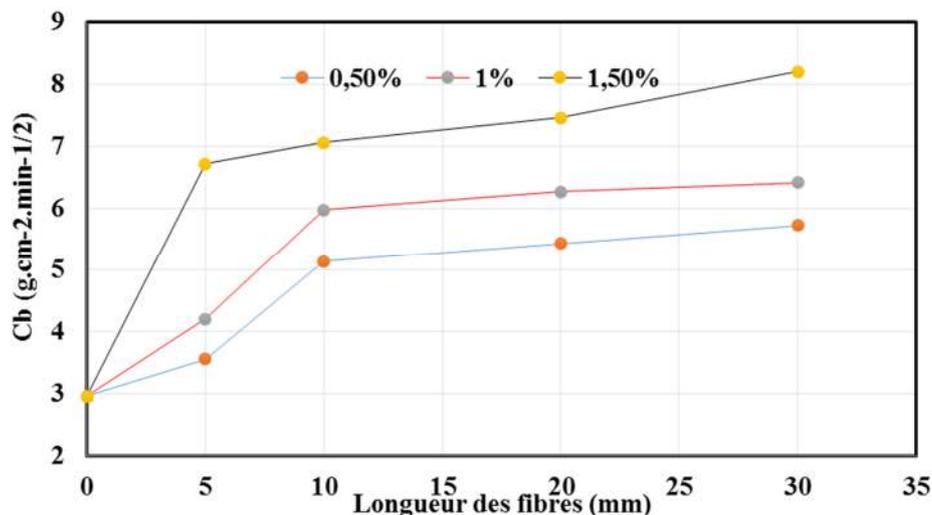


Figure IV. 12 : Variation du coefficient d'absorption des fibres en fonction de la longueur des fibres : influence de la teneur en fibres

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité augmente avec la teneur et la longueur des fibres. Ces comportements illustrent le caractère hydrophile des fibres de kénaf. Cependant, en comparaison avec les blocs d'adobe, ces BTC fibrés se caractérisent par une capillarité faible qui s'explique par la forte réduction de la porosité (et de l'interconnexion entre des pores) due à l'application de la contrainte de compactage. Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité de ces blocs étant inférieur 20 g.cm⁻².min^{-1/2}, ils sont qualifiés de blocs peu capillaires quels que soient le taux et la longueur de fibres considérés

Dans Tableau IV. 1 sont regroupées les meilleures formulations du point de vue de la résistance mécanique et de la conductivité thermique. L'analyse de ces données indique que les formulations $BF_{0,5}^3$ et $BF_{1,5}^2$ sont celles qui satisfont le mieux aux critères de bonne tenue à la compression, à la flexion 3 points et à la conduction thermique.

Ces deux formulations fibrées seront utilisées pour définir les formulations de BTC fibrées et stabilisées au ciment ou au laitier de haut fourneau. Ces formulations à trois constituants (sol, renfort de fibres de kénaf et liant ciment/laitier) seront étudiées dans le but d'optimiser leur comportement mécanique, thermique et hydrique (sensibilité à l'eau).

Paramètres	Deux meilleures formulations
Résistance à la compression	$BF_{0,5}^3$; BF_1^3
Résistance à la Flexion	$BF_{0,5}^3$; $BF_{1,5}^2$
Conductivité thermique	$BF_{1,5}^3$; $BF_{1,5}^2$

Tableau IV. 1 : Récapitulatif des deux meilleures formulations fibrées vis-à-vis des trois comportements sélectifs choisis

2. Effet de la stabilisation au ciment sur les blocs renforcés par les fibres

Dans cette partie l'étude de l'étude, nous nous focalisons sur les BTC fibrés $BF_{0,5}^3$ et $BF_{1,5}^2$ et stabilisés par le ciment introduit au taux massique de 3, 5 et 7%. La contrainte de compactage appliquée et la teneur en eau sont les niveaux définis précédemment, c'est à dire 5 MPa et 12%, respectivement.

2.1. Résistance à la compression simple

2.1.1. Résistance à la compression sèche (RCS)

L'effet de la stabilisation au ciment sur la résistance à la compression sèche des BTC fibrés est présenté sur la Figure IV. 13

Pour le BTC non fibré, la résistance décroît légèrement de 3,6 MPa pour B_0 à 3,30 MPa pour B_0C_3 . Cette réduction est expliquée par la formation de petits domaines riches en silicates de calcium (C_2S et C_3S). Ces domaines peu nombreux et non connectés entre eux (du fait de la faible quantité de ciment utilisée) sont comparativement plus rigides que le sol environnant. Quand ce matériau est soumis à la compression, des endommagements intempestifs peuvent se développer autour de ces noyaux durs. Avec 5% de ciment, la densité de ces domaines augmente et des ponts peuvent s'établir entre eux : la résistance à la compression sèche du BTC non fibré augmente (4,9 MPa pour B_0C_5). Pour un taux de ciment de 7%, les domaines riches en produits d'hydratation du ciment (silicates et aluminates de calcium hydratés, aluminosilicates) peuvent percoler pour constituer un squelette « continu » dans la phase argileuse [14, 15] : la résistance à la compression augmente de façon importante (5,9 MPa pour B_0C_7).

Sans le ciment, le BTC biofibré $BF_{1,5}^2$ présente quasiment la même résistance (3,7 MPa) que le sol B_0 (3,6 MPa). Ces deux matériaux ont encore des résistances similaires suite au traitement avec 3% de ciment (3,4 MPa pour $BF_{1,5}^2C_3$ contre 3,3 pour B_0C_3). Ces observations indiquent d'une part que l'augmentation de la porosité associée à la présence des fibres, qui jouent un rôle d'entraînement d'air, est peu pénalisante. D'autre part, le renforcement par les fibres de 20 mm de longueur n'est pas très probant sur le comportement à la compression. Globalement, le traitement avec 3% de ciment n'apporte aucun avantage particulier à $BF_{1,5}^2$ par rapport à B_0). En portant le taux de ciment à 5%, la résistance de $BF_{1,5}^2C_5$ atteint 4,6 MPa, mais elle reste en deçà de B_0C_5 . Ceci est constaté également quand le taux de ciment est porté à 7% : la résistance est de 5,6 MPa pour $BF_{1,5}^2C_7$ contre 5,9 pour B_0C_7 . Ces contreperformances de $BF_{1,5}^2C_5$ et $BF_{1,5}^2C_7$ peuvent être dues à la conjugaison de deux mécanismes : l'augmentation de la porosité avec l'ajout des fibres et la moins bonne hydratation du ciment du fait de l'effet chélateur des pectines vis-à-vis des ions Ca^{2+} [4, 16]. La résistance à la compression du composite biofibré $BF_{0,5}^3$ (3,9 MPa) décroît avec l'ajout de 3% de ciment (3,7 MPa pour $BF_{0,5}^3C_3$) dans les mêmes proportions que B_0 ou $BF_{1,5}^2$. Quand le taux de ciment est porté à 5% la résistance augmente pour atteindre 5,0 MPa, et cette augmentation est expliquée à

l'identique du passage de $BF_{1,5}^2C_3$ à $BF_{1,5}^2C_5$. La très forte valeur de résistance relevée pour le composite $BF_{0,5}^3C_7$ est attribuée à l'abondance des C-H-S formés et probablement à la bonne dispersion des fibres courtes de kénaf.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Bachir (2014) [17] qui avait étudié l'effet de la stabilisation au ciment sur les BTC à renfort de fibres de palmier dattier. Dans une étude sur les BTC incorporant du ciment et renforcés par les fibres de sisal, Namango (2006) [18] conclut qu'en présence du ciment le sisal introduit à la teneur de 1,25% n'a pas d'effet sur la résistance des BTC. Ces résultats sont en concordance avec les résultats de Khedari et al. (2005) [19] qui reportent que l'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco induit une diminution de la résistance à la compression sèche du fait de modifications dans la nature et/ou l'intensité des liaisons entre les différentes phases (fibre, sol, ciment).

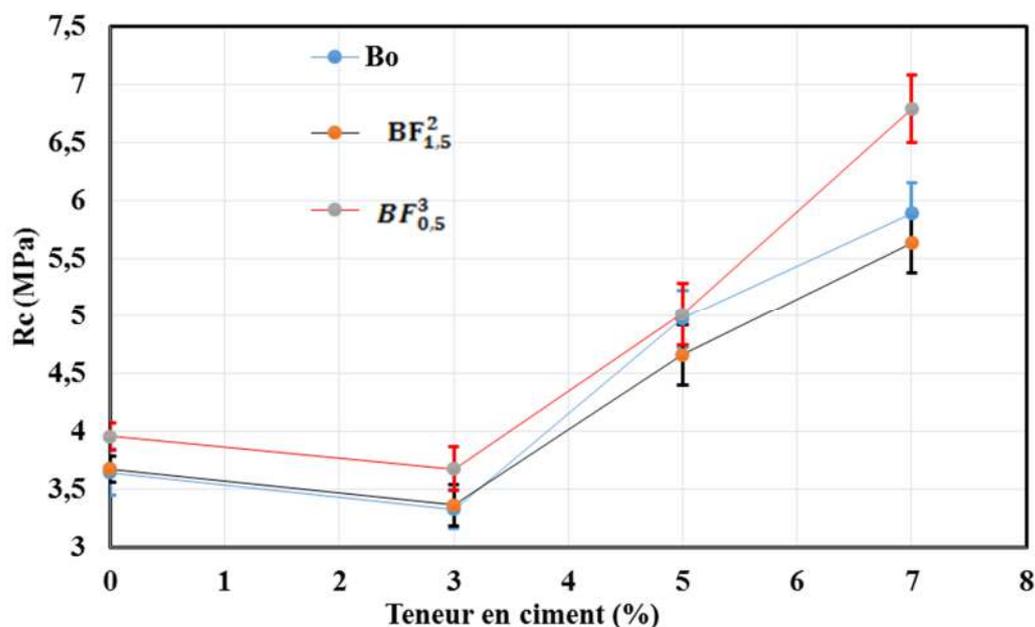


Figure IV. 13 : Variation de la résistance à la compression sèche des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment

2.1.2. Résistance à la compression humide (RCH)

La variation de la résistance à la compression humide des blocs en fonction de la teneur en ciment est représentée sur la Figure IV. 14

Dans le cas de B_0 (le BTC de référence), la résistance à la compression humide croît avec la teneur en ciment. C'est le cas également pour les BTC fibrés, mais pour un taux de ciment donné les résistances sont d'autant faibles que la teneur en fibres est élevée (2,2 MPa pour $BF_{1,5}^2C_5$ contre 2,0 pour $BF_{0,5}^3C_5$). Ceci illustre surtout le caractère hygrophile des fibres de kénaf, même si les propriétés mécaniques de la phase minérale de ces matériaux sont également affectées par la présence de l'eau. Les fibres gonflent en se gorgeant d'eau et la

matrice perd de sa rigidité. L'observation de ces résultats renseigne sur l'efficacité de la stabilisation des BTC par le ciment.

Sans entrer dans le détail des mécanismes impliqués dans le comportement de ces composites biofibrés à l'état humide, l'effet de l'eau peut être évalué par les variations relatives (Figure IV. 15). La différence relative entre ces deux séries de résistance mécanique diminue quand la teneur en ciment croît (66,4%, 57,1% et 41,4% pour les teneurs de 3%, 5% et 7% de ciment, respectivement pour $BF_{1,5}^2$). Des résultats semblables ont été reportés par d'autres chercheurs qui concluent que l'augmentation de la teneur en stabilisant est la manière la plus économique de rehausser la résistance à la compression humide du BTC [17]. Il faut noter que hormis la formulation $BF_{1,5}^2C_3$, tous ces matériaux biofibrés et stabilisés au ciment ont une résistance à la compression humide supérieure à 1,2 MPa qui est une valeur minimale recommandée [20]. Par ailleurs, la stabilisation au liant est réputée viable si le rapport de la résistance à la compression sèche à celle humide est supérieur à 2 [21], ce qui est le cas ici avec les formulations incorporant 7% de ciment.

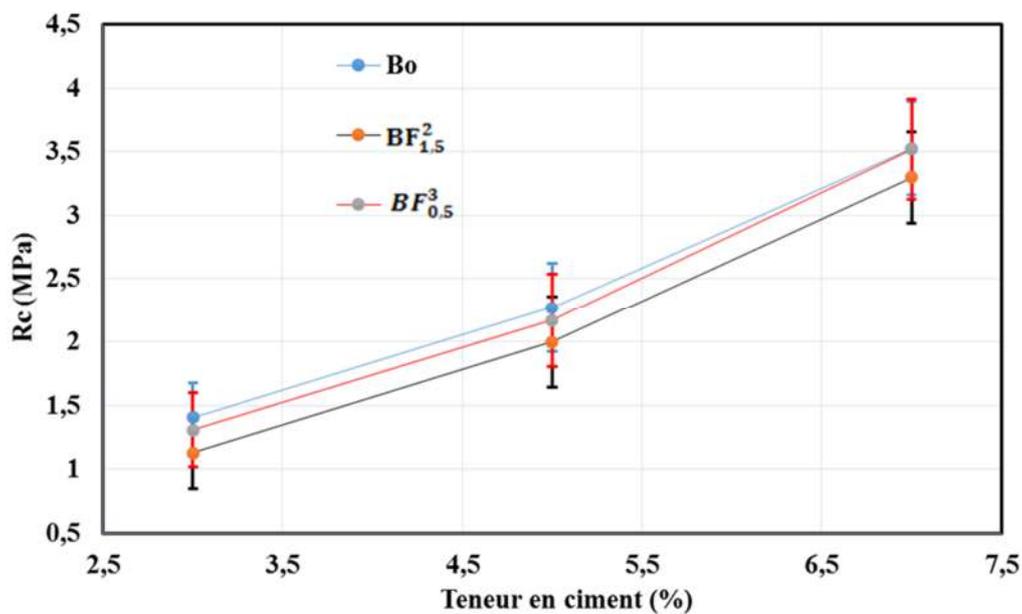


Figure IV. 14 : Résistance à la compression humide des BTC en fonction de la teneur en ciment

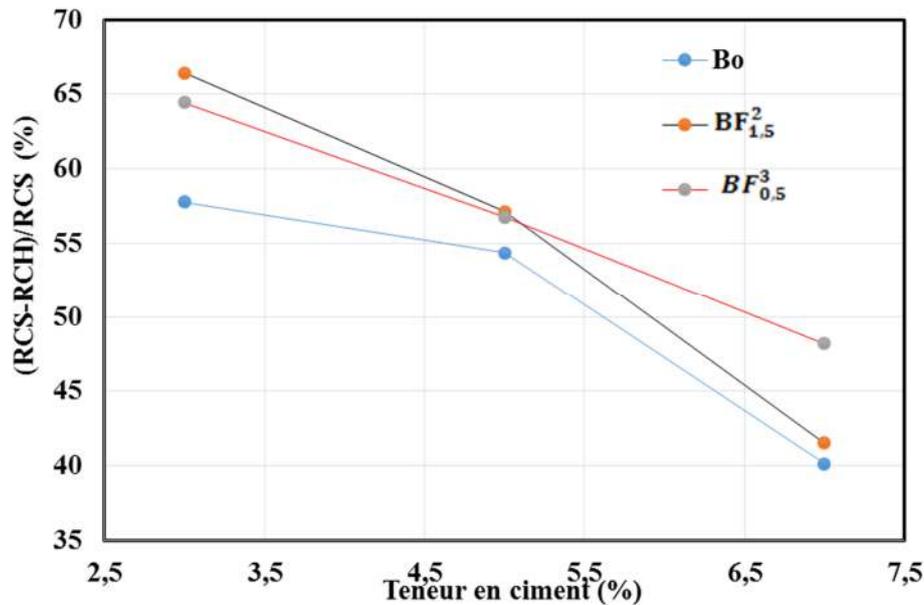


Figure IV. 15 : Variation de la résistance à la compression relative des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment

2.2. Résistance à la flexion 3 points

2.2.1. Résistance à la flexion sèche

Plusieurs chercheurs ont exploré l'utilisation des fibres naturelles comme renfort des adobes et autres produits de terre crue dans le but de réduire les fissures de retrait et d'améliorer la résistance à la flexion [1, 22, 23], Mais peu de travaux de ce type ont porté sur les blocs de terre comprimée. Dans la Figure IV. 16 sont représentées les résistances à la flexion sèche (RFs) des formulations de base en fonction du taux de ciment incorporé. Les formulations fibrées se comportent pareillement que le matériau de référence, mais avec des valeurs RFs plus élevées pour un taux de ciment donné. Ceci correspond à l'apport des fibres. Le meilleur comportement des composites BF_{0,5} par rapport aux BF_{1,5} s'explique à la fois par la longueur de fibre plus grande et une teneur plus faible qui permettent une meilleure répartition spatiale. Ces résultats sont en accord avec ceux de Ziegler et *al.* (1998) [24] et Millogo et *al.* (2014) [1] qui invoquent la bonne résistance à la traction des fibres, l'homogénéité de leur distribution dans le matériau et le bon état de l'interface fibre/matrice. Mais d'autres auteurs [13, 25, 26] ont relevé un effet inverse des fibres sur la résistance à la flexion. Pour Bachir (2014) [13], la perte d'adhésion entre les fibres et la matrice minérale à l'issue de la fabrication serait à l'origine de l'inefficacité des fibres de palmier dattier à renforcer le BTC.

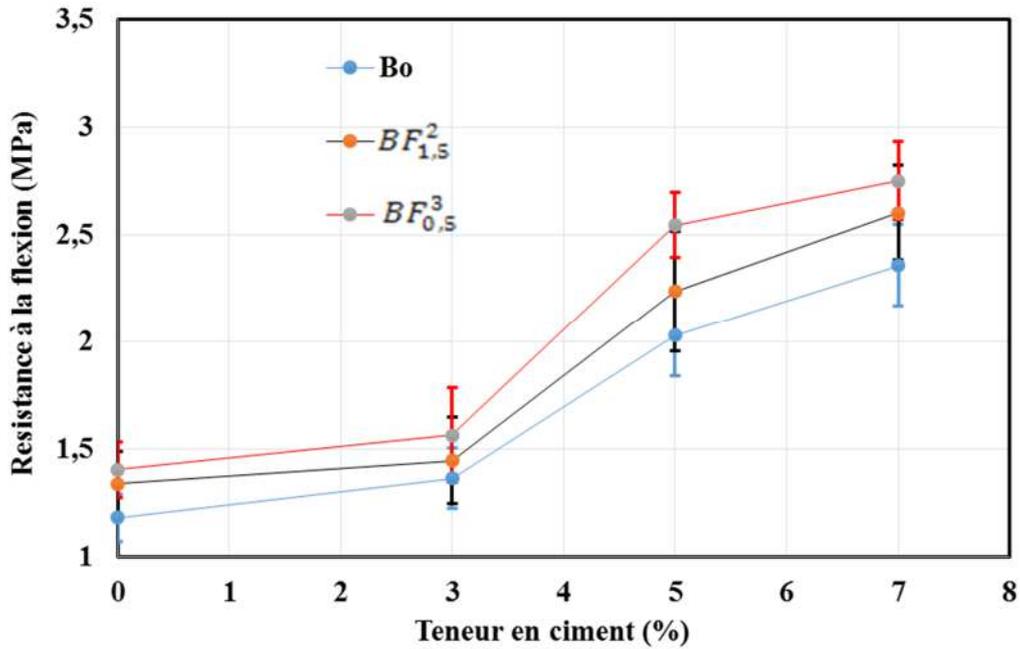


Figure IV. 16 : Variation de la résistance à la flexion sèche RFs des blocs en fonction de la teneur en ciment

2.2.2. Résistance à la flexion humide (RFH)

La Figure IV. 17 présente la variation de la résistance à la flexion humide des blocs en fonction de la teneur en ciment.

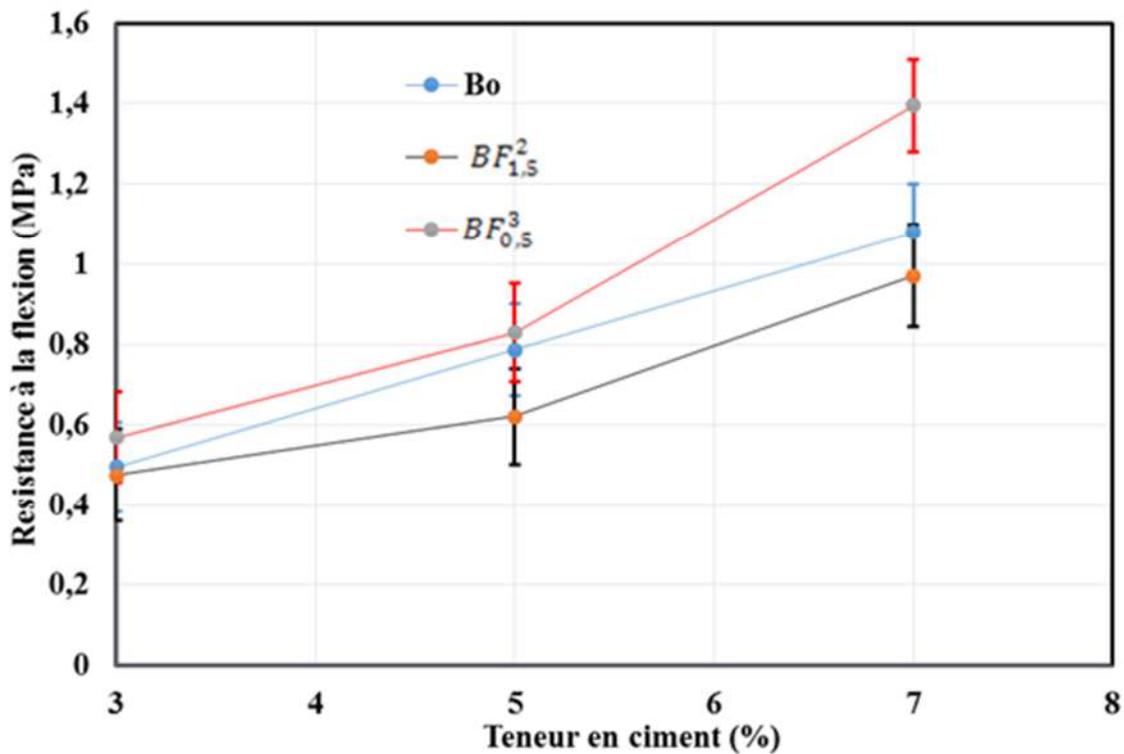


Figure IV. 17 : Variation de la résistance à la flexion humide RFH des blocs en fonction de la teneur en ciment

Tout comme la résistance à la compression humide, l'ajout de 1,5% de fibres de longueur 20 mm a aussi un effet négatif sur la résistance à la flexion humide. Ceci pourrait être attribué d'une part au taux élevé des fibres qui affectent l'homogénéité de leur répartition, et d'autre part au caractère fortement hydrophile des fibres. Par contre, on note une légère augmentation de la RFH avec la formulation $BF_{0,5}^3$ par rapport à la formulation B_0 quelle que soit la teneur en ciment considérée. La plus grande valeur de la RFH est obtenue avec la formation $BF_{0,5}^3C_7$ et est de 1,39 MPa.

La variation de la résistance à la flexion relative est représentée dans la Figure IV. 18 en fonction de la teneur en ciment pour les trois formulations de base

L'ajout des fibres a également un effet négatif sur la résistance à la flexion relative excepté la formulation $BF_{0,5}^3C_7$. La RFH révèle mieux l'effet positif des fibres que la RCH. Du point de vue de la résistance mécanique (résistance à la compression et résistance à la flexion 3 points) la meilleure formulation est $BF_{0,5}^3C_7$.

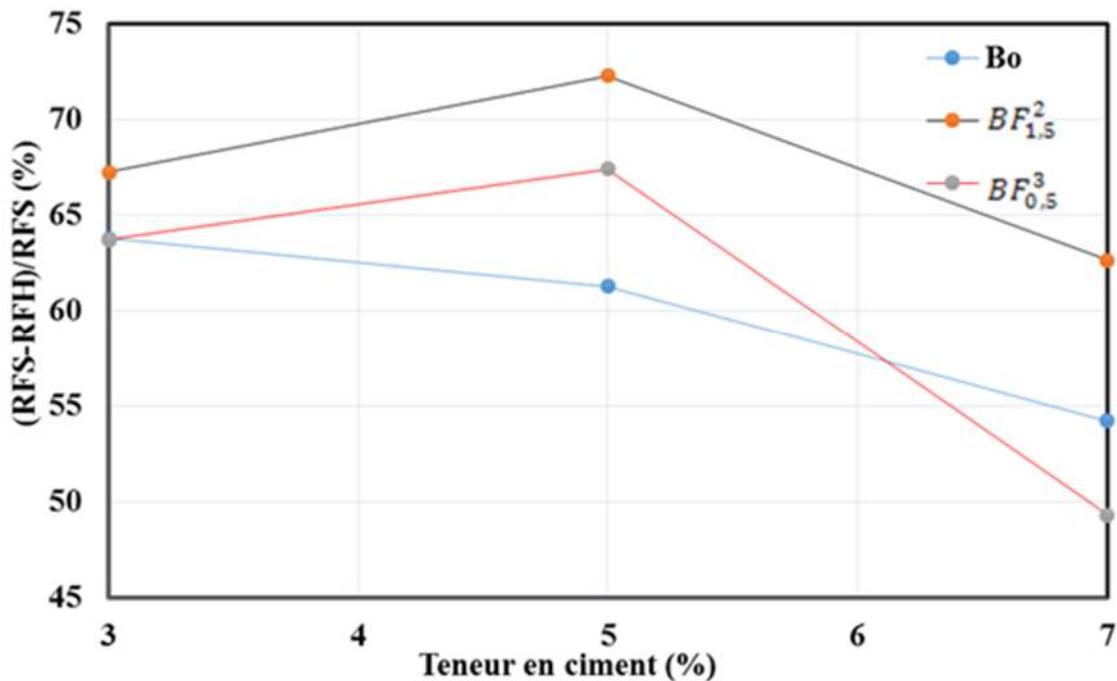


Figure IV. 18 : Variation de la résistance à la flexion relative des trois formulations de base en fonction de la teneur en ciment

L'ajout des fibres a également un effet négatif sur la flexion relative excepté la formulation $BF_{0,5}^3C_7$. La RFH révèle mieux l'effet positif des fibres que la RCH. Du point de vue de la résistance mécanique (résistance à la compression et résistance à la flexion 3 points) la meilleure formulation est $BF_{0,5}^3C_7$.

2.3. Absorption totale d'eau (ATE)

L'absorption totale d'eau (ATE) d'un bloc renseigne sur la porosité ouverte, ce qui confère à ce paramètre un caractère très important pour les BTC. En effet, moins est l'absorption d'eau d'un bloc, mieux il conservera ses performances mécaniques en milieu humide [27].

La Figure IV. 19 illustre la variation de l'absorption totale d'eau des blocs en fonction de la teneur en ciment après un jour d'immersion.

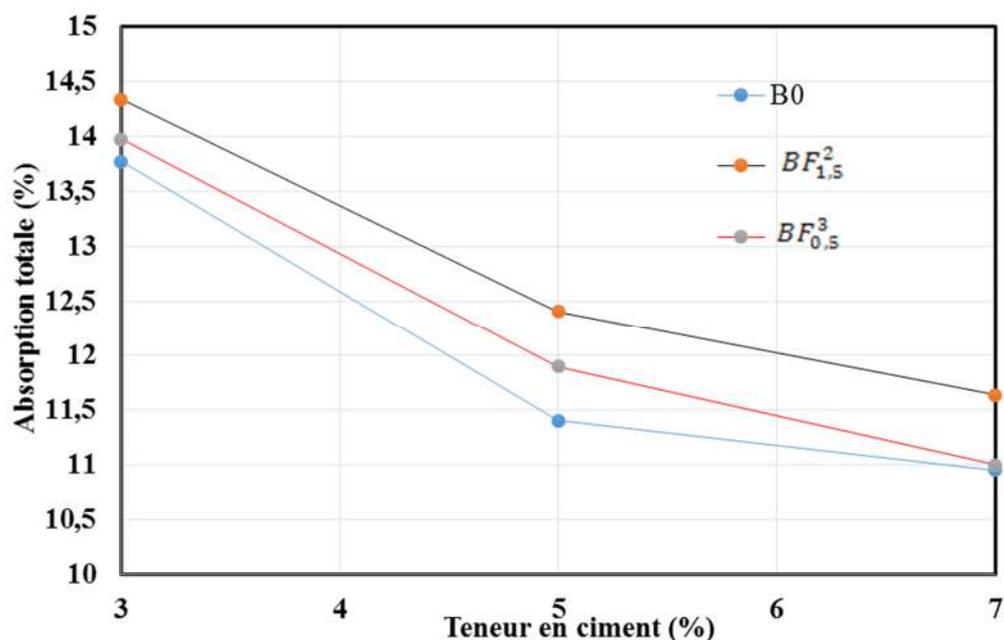
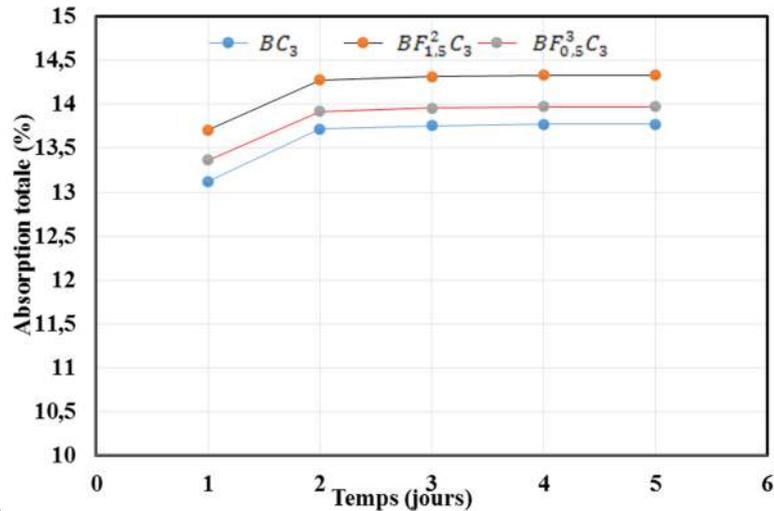


Figure IV. 19 : Variation de l'absorption totale des blocs en fonction de la teneur en ciment après un jour d'immersion dans l'eau

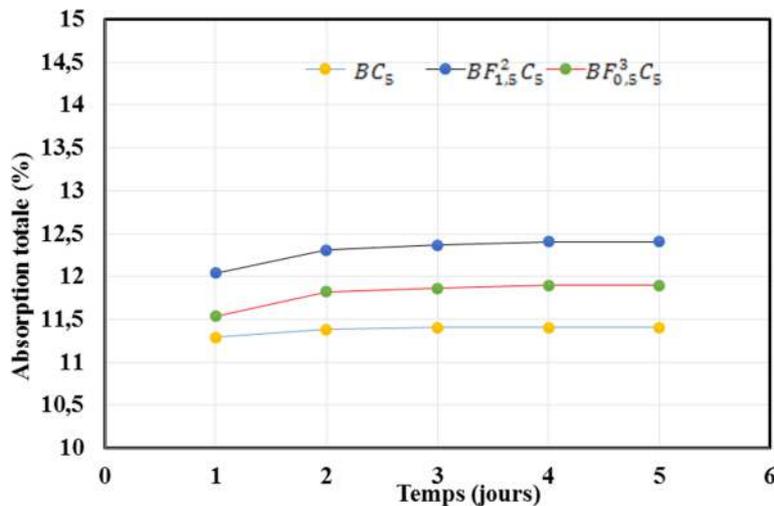
L'absorption totale d'eau après un jour d'immersion diminue quand la teneur en ciment croît ou quand la teneur en fibres augmente, pour toutes les formulations explorées. La diminution est d'environ 26 % quand la teneur en ciment est variée de 3 % à 7 %. Ces valeurs d'absorption totale de l'eau se comparent aux matériaux suivants : briques d'argile (0-30%) ; blocs de béton (4-25%) ; briques de silicate de calcium (6-16%) [28]. Les valeurs de l'ATE de nos différentes formulations sont en accord avec celles reportées par Bachir (entre 9,2% et 11,2%) [17] pour des blocs compactés à 10 MPa, stabilisés par 5 à 8% de ciment et renforcés par les fibres de palmier dattier.

L'absorption totale d'eau au cours du temps est représentée dans les Figure IV. 20 a, IV. 20b et IV. 20c pour les taux de ciment de 3%, 5% et 7%, respectivement. Pour chacune des formulations, la cinétique d'absorption présente une portion caractérisée par une forte vitesse (première journée) puis un palier s'établit lentement au cours des jours suivants. La valeur la plus élevée de l'ATE est de 14,33% obtenue par la formulation BF_{1,5}²C₃ et la valeur la plus faible est de 10,94 % et ceci pour la formulation BC₇. Comme on pouvait s'y attendre, le taux de ciment influence beaucoup sur l'absorption totale d'eau des BTC, mais les niveaux atteints

restent modestes par rapport aux adobes. En effet, le compactage du sol modifie sa densité, sa résistance mécanique, sa porosité et sa perméabilité [29]. Les résultats reportés ici sont comparables à ceux de Salehan et al. (2011) [30], qui ont constaté aussi une légère augmentation de l'absorption d'eau quand la teneur en fibres issues des fruits de palmier à huile est accrue. Mais malgré cette augmentation les valeurs de l'absorption totale d'eau restent modérées selon la norme britannique BS 5628 Partie 1 [31]. D'après cette norme, les valeurs de l'ATE en dessous de 7% sont considérées comme étant faibles, tandis que celles supérieures à 12% sont considérées comme élevées.



a)



b)

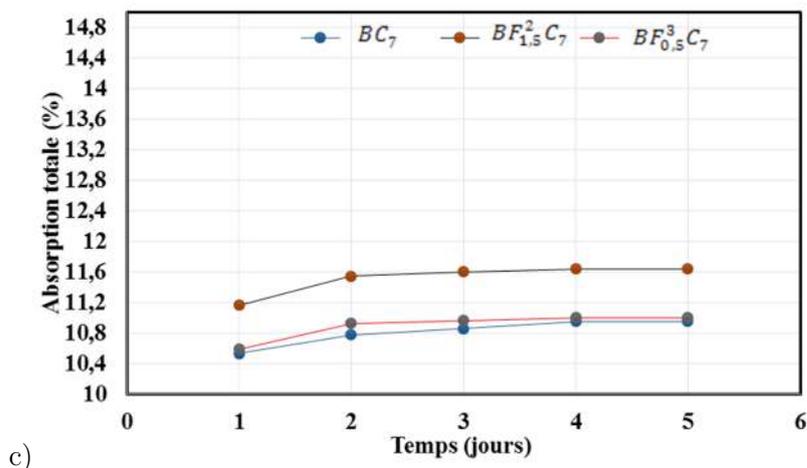
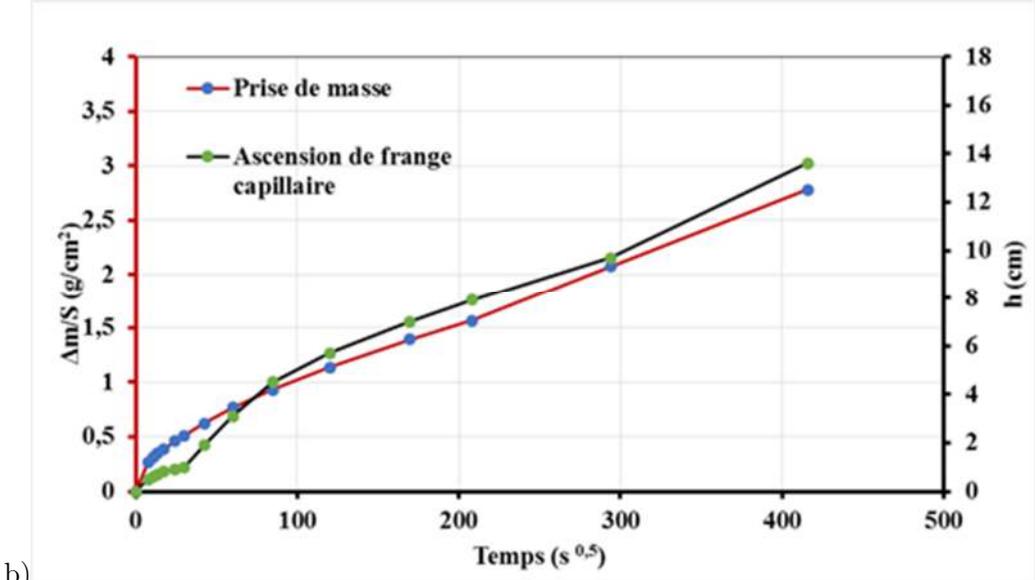
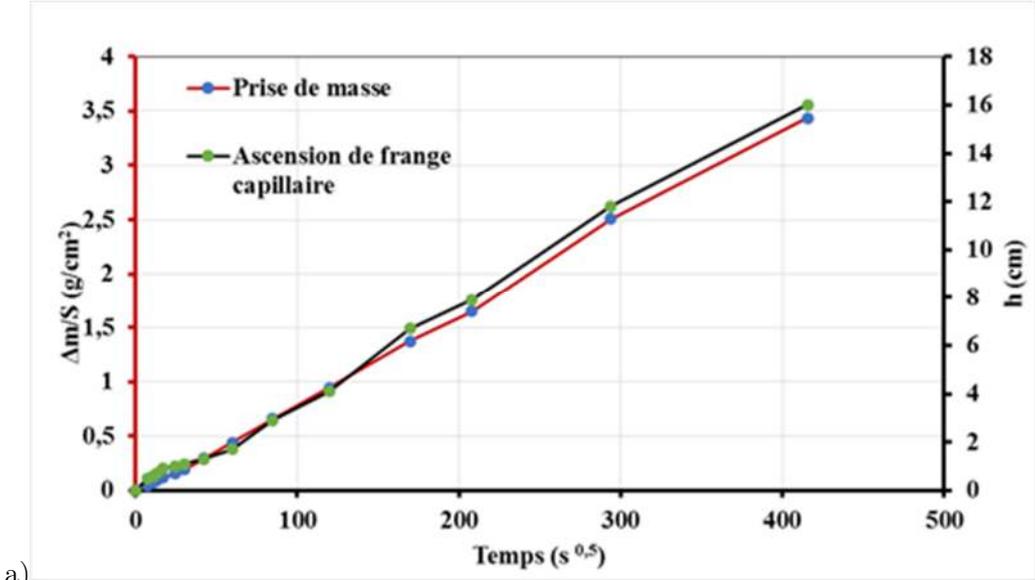
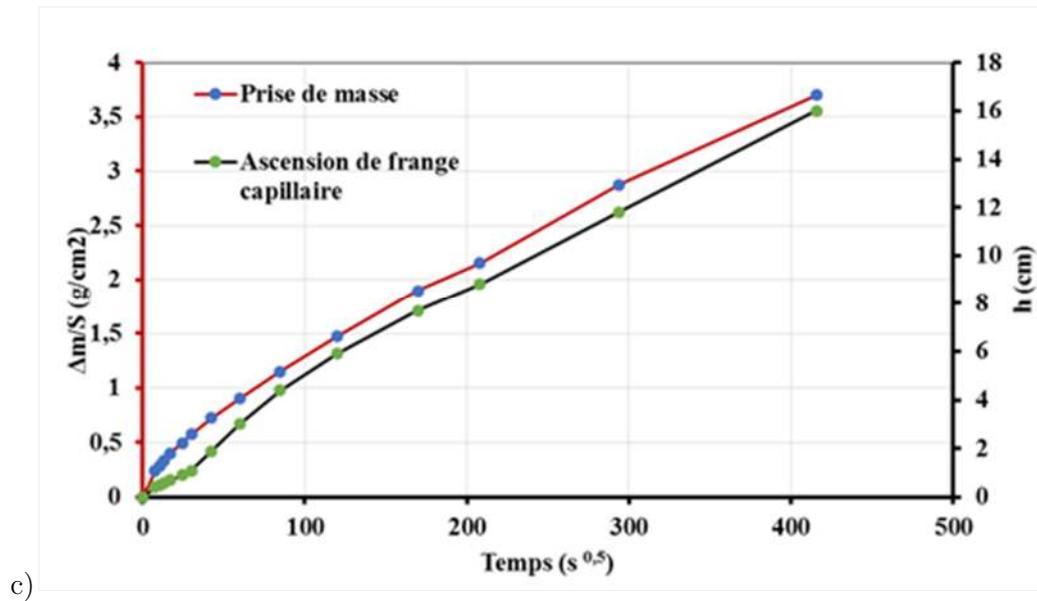


Figure IV. 20 : Variation de l'absorption totale d'eau des blocs en fonction du temps : a) 3% en ciment ; b) 5 % en ciment ; c) 7% en ciment

2.4. Détermination des coefficients de transfert hydrique

La Figure IV. 21 présente la prise de masse moyenne ($\Delta m/S$) et l'ascension de la frange capillaire pour les formulations BC_7 , $BF_{1,5}^2C_7$ et $BF_{0,5}^3C_7$ au cours du temps. La forme des courbes de capillarité renseigne sur l'homogénéité des réseaux [32]. Nous remarquons que pour toutes les formulations testées, les courbes sont caractéristiques d'un réseau homogène. Par ailleurs, l'allure de la prise de masse est très régulière pour l'ensemble des formulations testées. En effet les propriétés d'imbibition par capillarité d'un matériau poreux sont directement liées à la taille et à la forme des pores, ainsi qu'à la connectivité du réseau poreux. La courbe de prise de masse pour les matériaux non renforcés par les fibres présente une seule pente (Figure IV. 21a) caractéristique d'un réseau unimode tandis que celles des composites à renfort de fibres (Figure IV. 21 b et c) présentent deux phases que nous schématisons par deux domaines de comportement linéaire, avec des pentes A et A'. La première phase est caractérisée par une absorption rapide et importante (pente A) plus élevée que A'. Cette phase rend compte de la cinétique d'absorption très rapide des fibres végétales et qui se stabilise au bout de 3heures environ. Nous avons également observé que la frange capillaire atteint le sommet de l'éprouvette au bout de 48 heures pour les formulations fibrées, ce qui témoigne d'une cinétique d'imbibition rapide des fibres de kénaf.





c) Figure IV. 21 : Courbes de prise de masse et d'ascension de frange capillaire : a) formulation BC₇ ; b) formulation BF_{1,5}²C₇ et c) formulation BF_{0,5}³C₇

Les moyennes des coefficients de Washburn (A, A' et B) calculés suivant les relations II. 26 et II.27 sont présentés dans le Tableau IV. 2, respectivement. Ces coefficients diminuent avec l'augmentation de la teneur en ciment et croissent avec l'ajout des fibres. Les coefficients A pour les formulations fibrées sont plus élevés comparativement aux composites sans fibres et les coefficients A' sont environ moitié plus faibles que les coefficients A. En effet l'ajout des fibres à la matrice minérale favorise la création des macropores qui gouvernent la première phase d'absorption. La cinétique de la deuxième phase est favorisée par une faible microporosité comme en témoigne les coefficients A'.

Formulation	A (g/cm ² ·s ^{0,5})	A' (g/cm ² ·s ^{0,5})	B (cm/s ^{0,5})
BC₃	0,0131±0,002	-	0,04±0,017
BC₅	0,0078±0,0014	-	0,034±0,0128
BC₇	0,007±0,0023	-	0,032±0,013
BF_{0,5}³C₃	0,0139±0,007	0,008±0,001	0,04±0,021
BF_{0,5}³C₅	0,010±0,0013	0,0079±0,0046	0,038±0,028
BF_{0,5}³C₇	0,010±0,0030	0,068±0,0007	0,037±0,018
BF_{1,5}²C₃	0,0137±0,0034	0,0088±0,001	0,047±0,012
BF_{1,5}²C₅	0,0132±0,0015	0,0067±0,0018	0,047±0,017
BF_{1,5}²C₇	0,011±0,0012	0,0057±0,0006	0,034±0,016

Tableau IV. 2 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité

2.5. Porosité accessible à l'eau

Il existe un lien étroit entre la structure porale, l'état hydrique du matériau et les transferts hygrothermiques. Il est donc indispensable de caractériser les matériaux étudiés, sur le plan structural, notamment de déterminer la porosité. La porosité accessible à l'eau (n) a été

mesurée sur 3 échantillons par formulation par la méthode de la pesée hydrostatique décrite au chapitre II. Les valeurs moyennes de la porosité (n) pour chaque formulation sont présentées dans le Tableau IV. 3. La porosité accessible à l'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment et augmente avec l'introduction des fibres. L'ajout de ciment par la formation des hydrates, induit la formation d'une porosité fermée, non accessible à l'eau tandis que l'incorporation des fibres crée des pores ouverts accessibles à l'eau.

Formulation	n (%)
BC₃	24,82
BC₅	23,93
BC₇	23,05
BF_{0,5}³C₃	26,44
BF_{0,5}³C₅	26,09
BF_{0,5}³C₇	24,44
BF_{1,5}²C₃	28,12
BF_{1,5}²C₅	26,79
BF_{1,5}²C₇	26,63

Tableau IV. 3 : Porosité accessible à l'eau des différentes formulations

3. Effet de l'ajout du laitier granulé

D'après ce qui précède, la meilleure formulation d'un point de vue mécanique et hydrique est la formulation obtenue par stabilisation avec 7% de ciment et renforcée par 0,5% de fibres de longueur 30 mm. Dans le but d'améliorer les performances hygromécaniques de cette formulation tout en diminuant le taux de ciment utilisé, nous étudions ici l'effet du laitier de haut fourneau sur le sol. Dans ce but, nous avons utilisé deux teneurs en laitier de haut fourneau (5 et 10%) activées chacune par 3 et 5% de ciment. Les meilleures formulations de cette série seront ensuite renforcées par 0,5% de fibres de kénaf de longueur 30 mm. En effet plusieurs chercheurs ont utilisé le laitier granulé finement broyé pour la correction des sols qui contiennent du sulfate [33, 34, 35, 36]. Ils ont montré l'effet très bénéfique du laitier sur la durabilité de ces sols.

3.1. Résistance à la compression simple

3.1.1. Résistance à la compression sèche

L'influence du dosage du laitier sur la résistance à la compression sèche des formulations de base B₀, BC₃ et BC₅ est représentée par la Figure IV. 22.

L'analyse de cette figure montre un accroissement significatif de la résistance à la compression sèche pour les blocs stabilisés par la combinaison du ciment et du laitier. Pour la formulation de référence B₀, on relève une pente moyenne d'accroissement de la RFS de 0,28 MPa par pourcent de ciment ajouté. L'apport du laitier est une augmentation importante de la RFS : les pentes sont de 1,37 MPa et 1,80 MPa par pourcent de ciment pour les formulations

avec 5% et 10% de laitier respectivement. Cette amélioration significative de la RCS du fait de la stabilisation mixte au ciment et au laitier de haut fourneau serait le résultat d'une réaction chimique entre le calcium, la silice et l'alumine dans les minéraux argileux pour former des aluminates et des silicates complexes. En effet ces aluminates et silicates confèrent aux blocs une résistance mécanique élevée. Les blocs qui ont donné les meilleurs résultats sont BC_3L_{10} , BC_5L_5 et BC_5L_{10} , que nous allons présélectionner pour la suite de l'étude. La valeur maximale de la RCS est obtenue avec le bloc stabilisé à l'aide de 10% de laitier de haut fourneau activé par 5% de ciment.

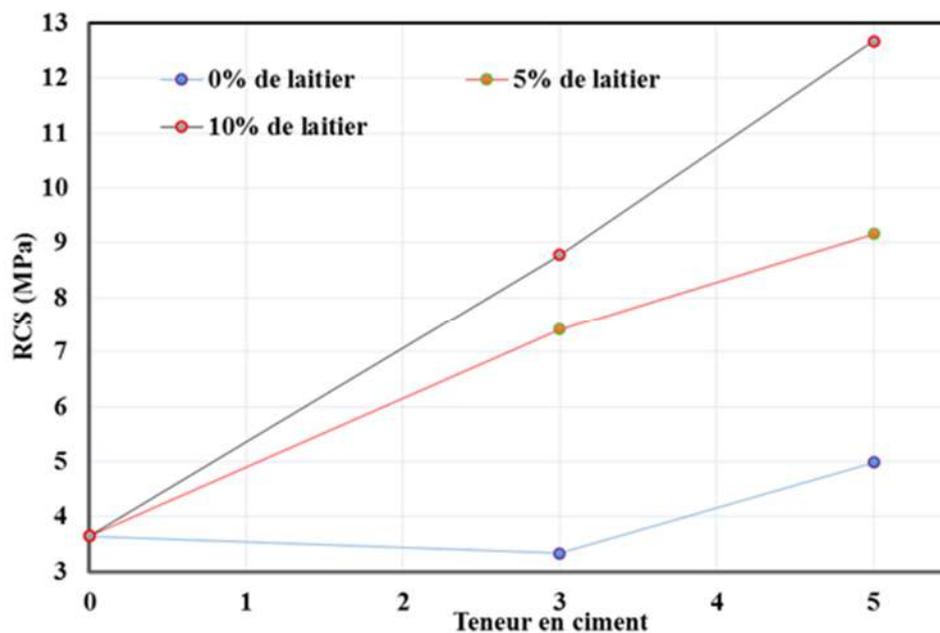


Figure IV. 22 : Variation de la résistance à la compression sèche des blocs en fonction de la teneur en ciment pour différentes teneurs en laitier de haut fourneau

Dans le but d'étudier l'effet des fibres de kénaf sur ces trois formulations présélectionnées, nous avons procédé à leur renforcement par 0,5% de fibres de kénaf de longueur 30 mm. Parmi ces nouvelles formulations, BC_3L_{10} , et BC_5L_{10} ont donné les meilleurs résultats quant à la résistance à la compression sèche (Figure IV. 23).

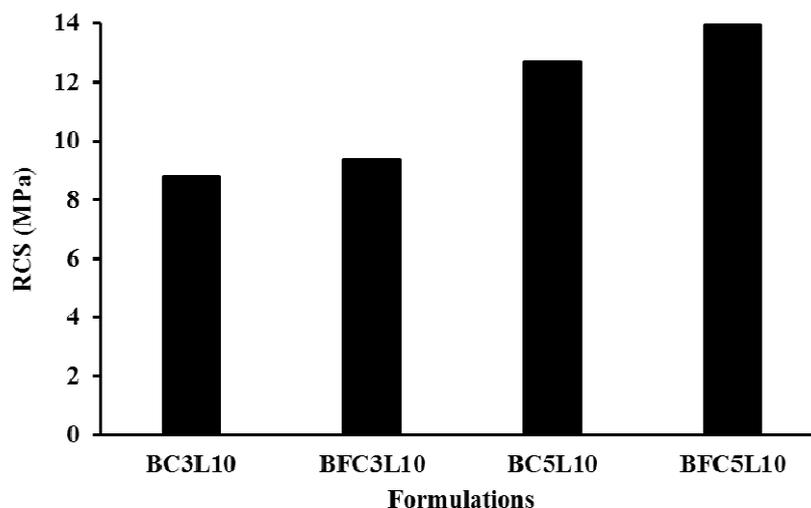


Figure IV. 23 : Effet de l'ajout des fibres (30 mm ; 0,5%) sur la résistance à la compression sèche des formulations stabilisées par le laitier de haut fourneau activé par le ciment

D'après cette figure l'ajout des fibres résulte en une légère augmentation de la résistance à la compression sèche : gain de 6,40 % pour BFC₃L₁₀ et de 9,10% pour BFC₅L₁₀. Ce résultat pourrait s'expliquer par une bonne adhérence entre les fibres et la matrice. Du fait de la présence de composés néo-formés tels les silicates et les aluminates complexes.

3.1.2. Résistance à la compression humide

La Figure IV. 24 illustre la variation de la résistance à la compression humide des formulations BC₃ et BC₅ en fonction du dosage de laitier. La résistance à la compression humide évolue dans le même ordre que la résistance à la compression sèche. Elle atteint 6 MPa pour l'échantillon BC₅L₁₀, valeur plus élevée que la de RC₅ de BC₇. Ainsi donc la stabilisation au laitier et au ciment s'avère très performante pour réduire la sensibilité à l'eau des BTC.

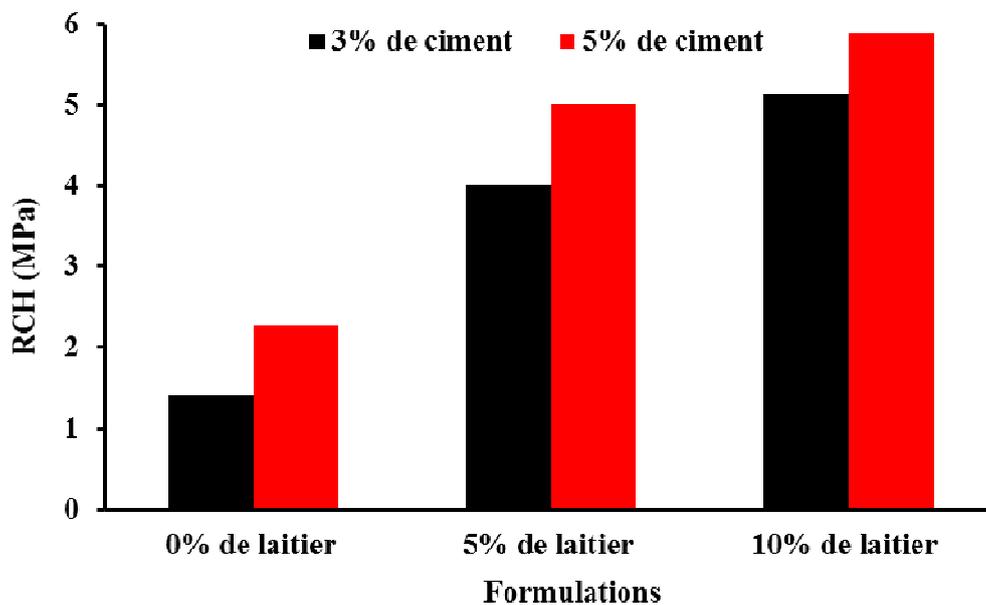


Figure IV. 24 : Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la résistance à la compression humide de BC₃ et BC₅

Les résultats présentés dans la Figure IV. 25 indiquent que l'ajout des fibres aux formulations BC₃L₁₀ et BC₅L₁₀ diminue drastiquement la résistance à la compression humide, mais les valeurs (3,2 MPa et 3,5 MPa respectivement) restent supérieures à celles obtenues par la stabilisation au ciment seul (1,35 MPa pour BC₃ et 2,75 MPa pour BC₅).

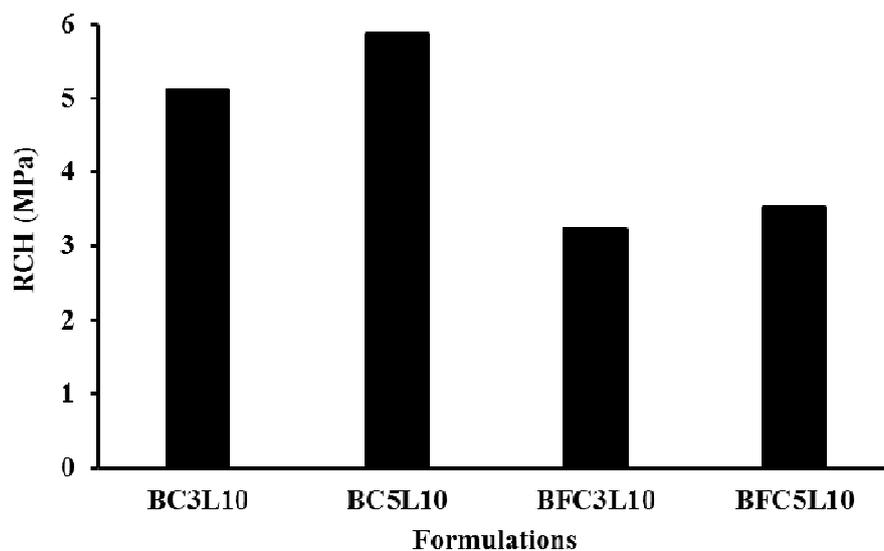


Figure IV. 25 : Effet de l'ajout des fibres sur la résistance à la compression humide des blocs stabilisés au laitier activé par le ciment

3.2. Résistance à la flexion 3 points

3.2.1. Résistance à la flexion sèche

La Figure IV. 26 illustre l'influence du taux de laitier de haut fourneau activé au ciment sur la résistance à la flexion sèche des blocs.

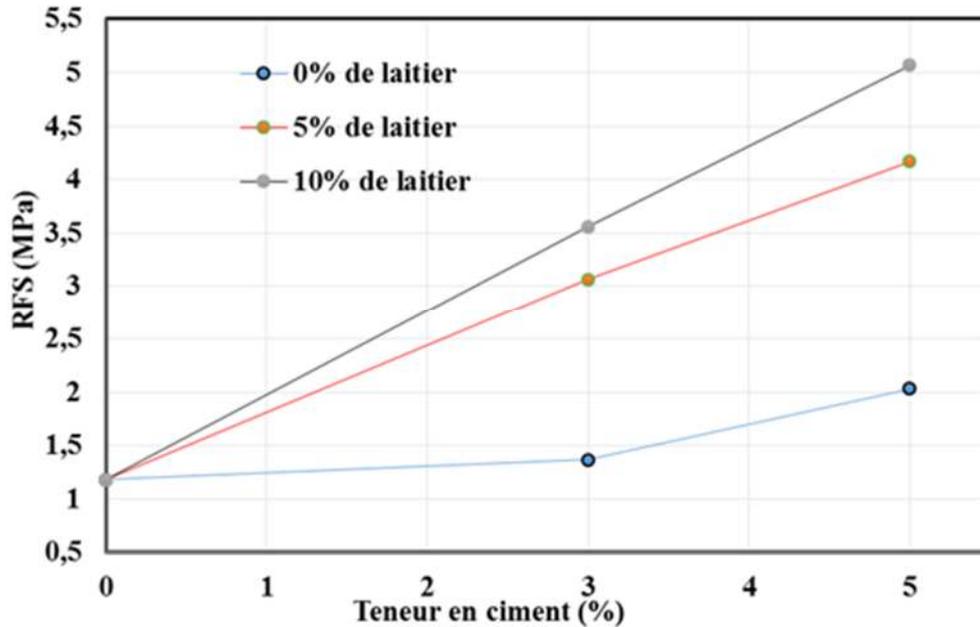


Figure IV. 26 : Variation de la résistance à la flexion sèche en fonction de la teneur en ciment pour différents dosages de laitier de haut fourneau

L'analyse des données de la Figure IV. 26 indique, pour la formulation de référence B_0 , une pente moyenne d'accroissement de la RFS de 0,16 MPa par pourcent de ciment ajouté. L'apport du laitier entraîne une augmentation importante de la RFS : les pentes sont de 0,63 MPa et 0,80 MPa par pourcent de ciment pour les formulations avec 5% et 10% de laitier respectivement. La valeur maximale de la RFS de 5,06 MPa obtenue pour la formulation BC_5L_{10} est plus élevée que celle résultant de la stabilisation au ciment seul (2,0 MPa et 2,30 MPa pour BC_5 et BC_7 , respectivement).

La Figure IV. 27 illustre l'effet de l'ajout de 0,5% de fibres de longueur 30 mm sur la résistance à la flexion 3 points des blocs. L'augmentation relative de la RFS est de 30% à partir des formulations BC_3L_{10} et BC_5L_{10} . Ces améliorations sont certainement dues à l'instauration d'une interface fibre/matrice plus liée du fait des nouvelles phases créées par interaction du ciment et du laitier.

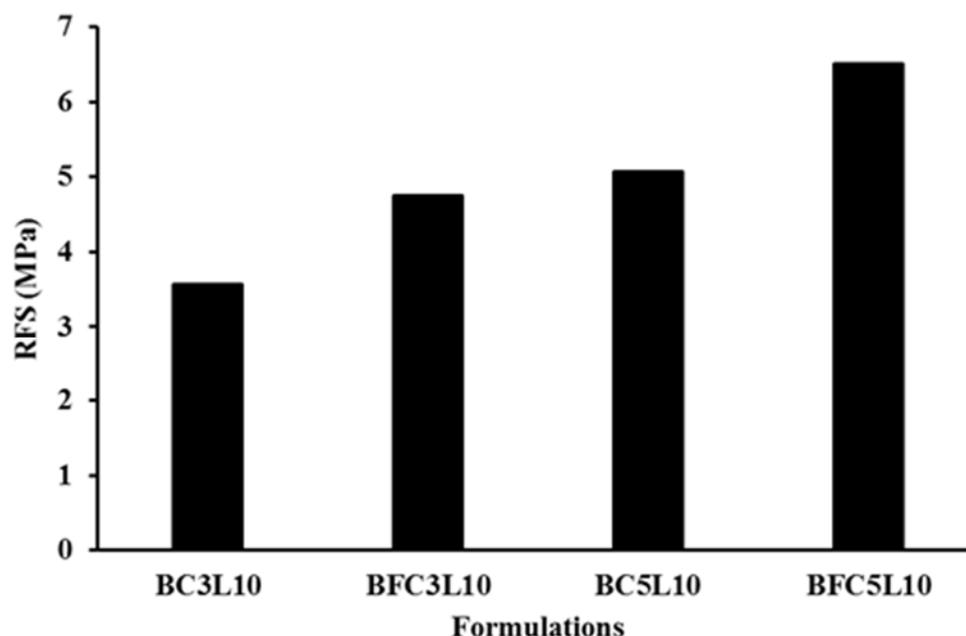


Figure IV. 27 : Effet de l'ajout de fibre sur la résistance à la flexion 3 points des blocs stabilisés au laitier de haut fourneau activé par le ciment

3.2.2. Résistance à la flexion 3 points des blocs à l'état humide

L'effet des fibres sur la résistance à la flexion humide est représenté dans la Figure IV. 28. On note une augmentation importante de RF_H avec l'ajout du laitier, aussi bien pour la formulation à 3% de ciment que celui à 5%. Là aussi, les résultats obtenus par l'effet combiné du ciment et du laitier sont bien supérieurs à ceux du ciment seul (2,3 MPa et 3,5 MPa pour BC_5 et BC_7 , respectivement). Les résultats de la variation de la résistance à la flexion humide des blocs en fonction de la teneur en ciment à différents dosages de laitier de haut fourneau. On constate aussi, comme pour le cas de la résistance à la compression humide, qu'il y a une augmentation de la résistance à la flexion humide avec l'ajout de laitier de haut fourneau par rapport aux blocs stabilisés au ciment seul. Cette augmentation est beaucoup plus significative avec les blocs stabilisés avec 10% de laitier granulé activé avec 5% de ciment. En effet, le laitier granulé réduit la sensibilité à l'eau des blocs et diminue ainsi l'écart entre la RF_S et la RF_H . La valeur maximale de la RF_H est de 3,21 MPa pour la formulation BC_5L_{10} , ce qui est supérieur à la résistance à la flexion sèche obtenue par stabilisation à 7% de ciment seul.

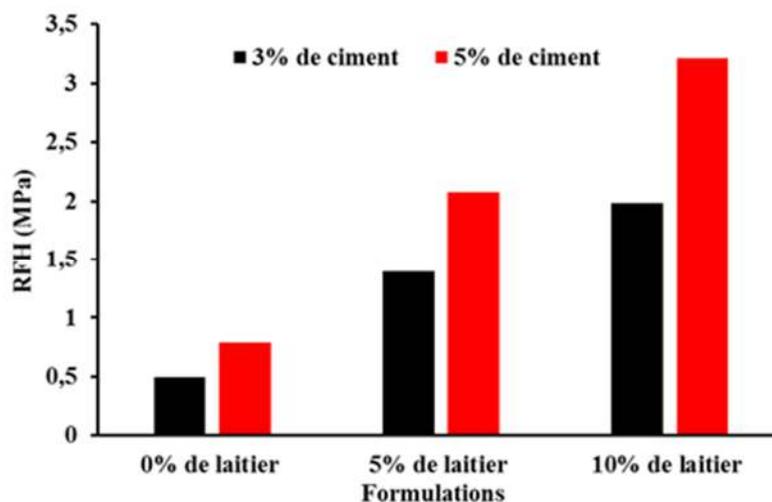


Figure IV. 28 : Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la résistance à la flexion humide des blocs amendés au ciment

L'ajout des fibres de kénaf aux formulations incorporant le mélange ciment-10% (Figure IV. 29) de laitier granulé réduit considérablement la résistance à la flexion humide (Cependant, cette réduction de la RF_H est moins importante que celle relevée lors de la stabilisation au ciment seul). Ce résultat confirme les observations faites par Page et *al.* [37] selon lesquelles le mélange laitier granulé ciment réduit davantage l'absorption d'eau des fibres que le ciment seul.

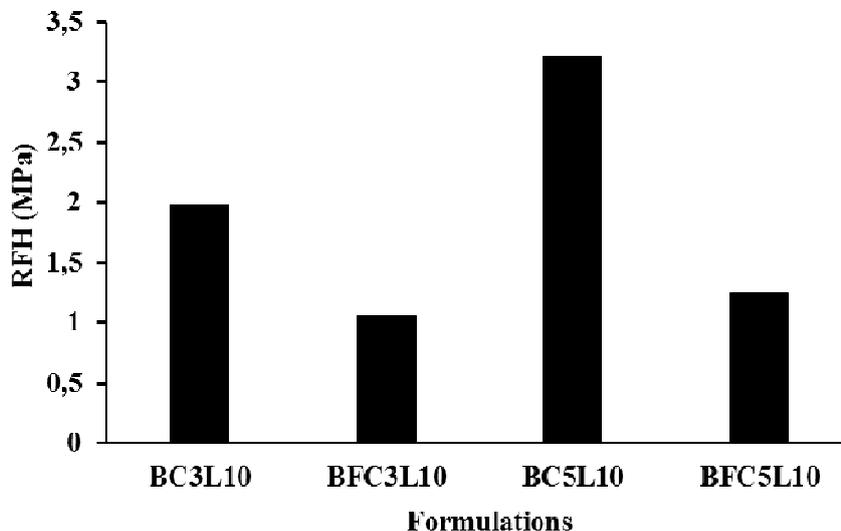


Figure IV. 29 : Influence de l'ajout des fibres sur les blocs stabilisés au mélange ciment-laitier granulé

3.3. Absorption totale d'eau (ATE)

Les Figure IV. 30 et Figure IV. 31 présentent respectivement l'influence de la stabilisation mixte ciment-laitier de haut fourneau et l'effet de l'ajout des fibres sur l'absorption totale d'eau des blocs. L'absorption totale en 24h diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier granulé et en ciment (Figure IV. 30). En valeurs relatives, pour un amendement à 3% de

ciment les réductions sont de 18,5% (pour 5% de laitier) et 29,6% (pour 10% de laitier). Elles sont de 18,2% (pour 5% de laitier) et 31,5% (pour 10% de laitier) avec un taux de ciment de 5%. Ces réductions importantes de l'absorption totale d'eau sont dues à la formation de nouveaux hydrates qui viennent diminuer la porosité. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les formulations BC₅L₅, BC₅L₁₀ et BC₃L₁₀. La Figure IV. 31 révèle un effet négatif des fibres sur l'absorption totale d'eau des blocs. L'absorption totale augmente avec l'ajout des fibres quelle que soit la formulation considérée, mais la stabilisation mixte ciment-laitier granulé donne de meilleurs résultats que celle au ciment seul. L'absorption la plus faible est obtenue avec la formulation BFC₅L₁₀ (10,5%), et la plus élevée avec BC₃L₁₀ (14,2%). Toutefois, les valeurs d'absorption totale d'eau obtenues pour ces matériaux sont inférieures à la valeur maximale permise 15% [38] par l'International Labour Organisation.

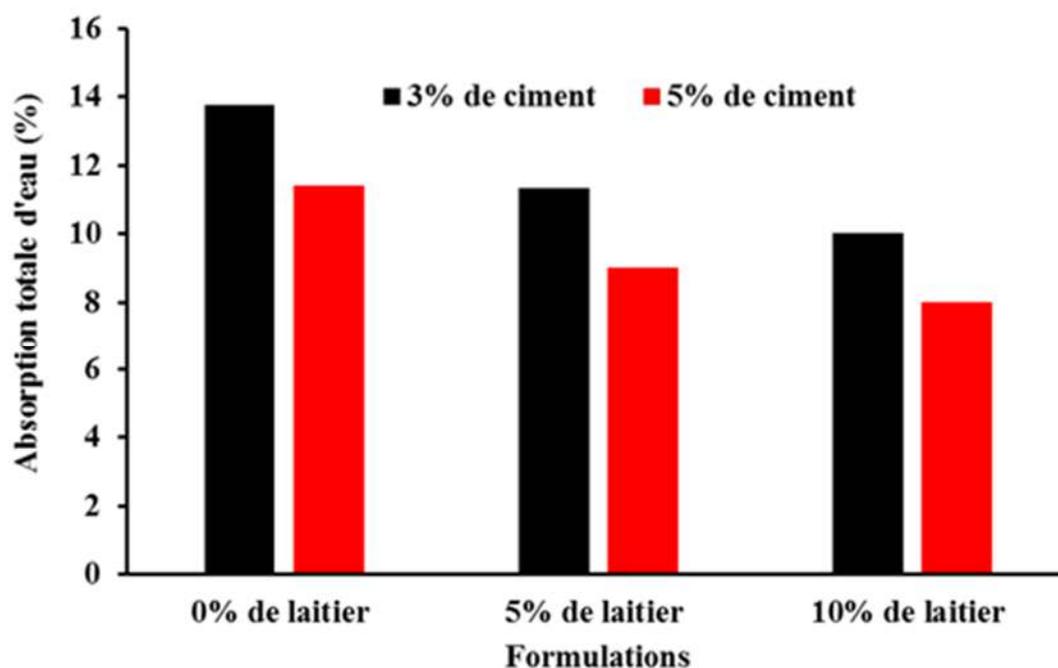


Figure IV. 30 : Influence de la stabilisation mixte ciment-laitier de haut fourneau sur l'absorption totale d'eau des blocs

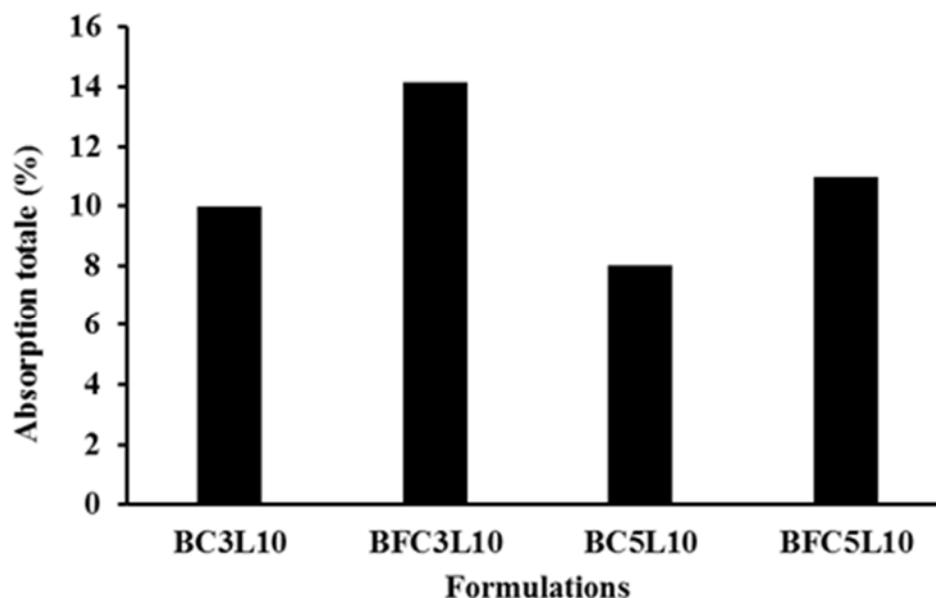
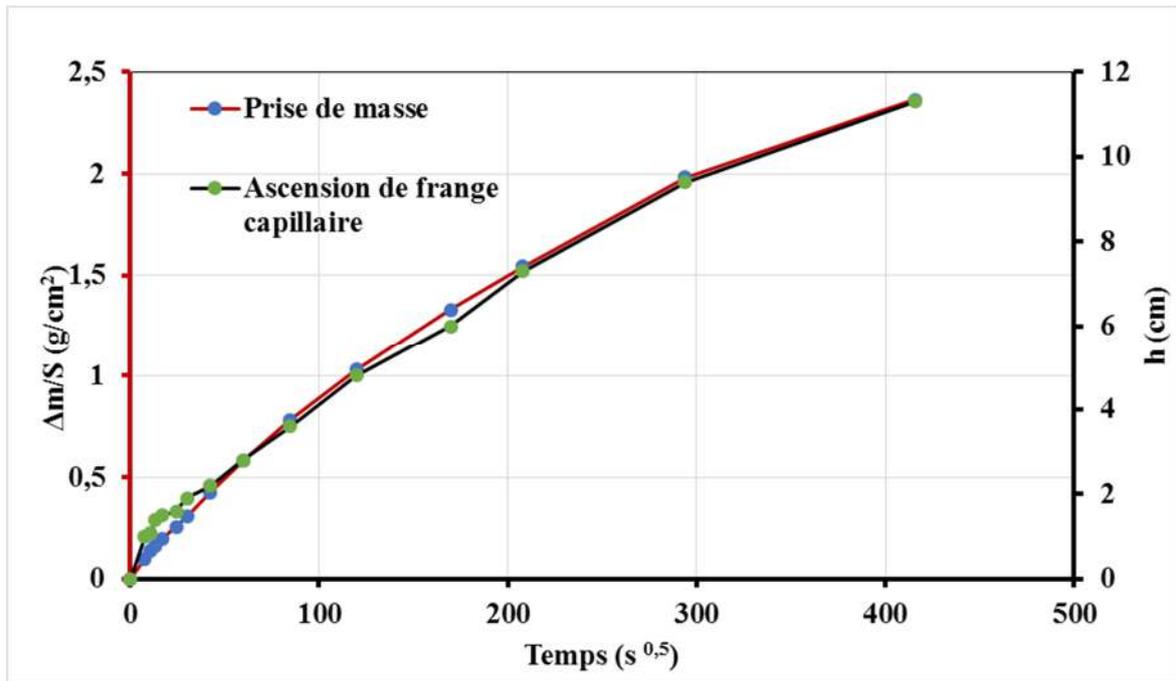


Figure IV. 31 : Effet des fibres sur l'absorption totale des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier granulé

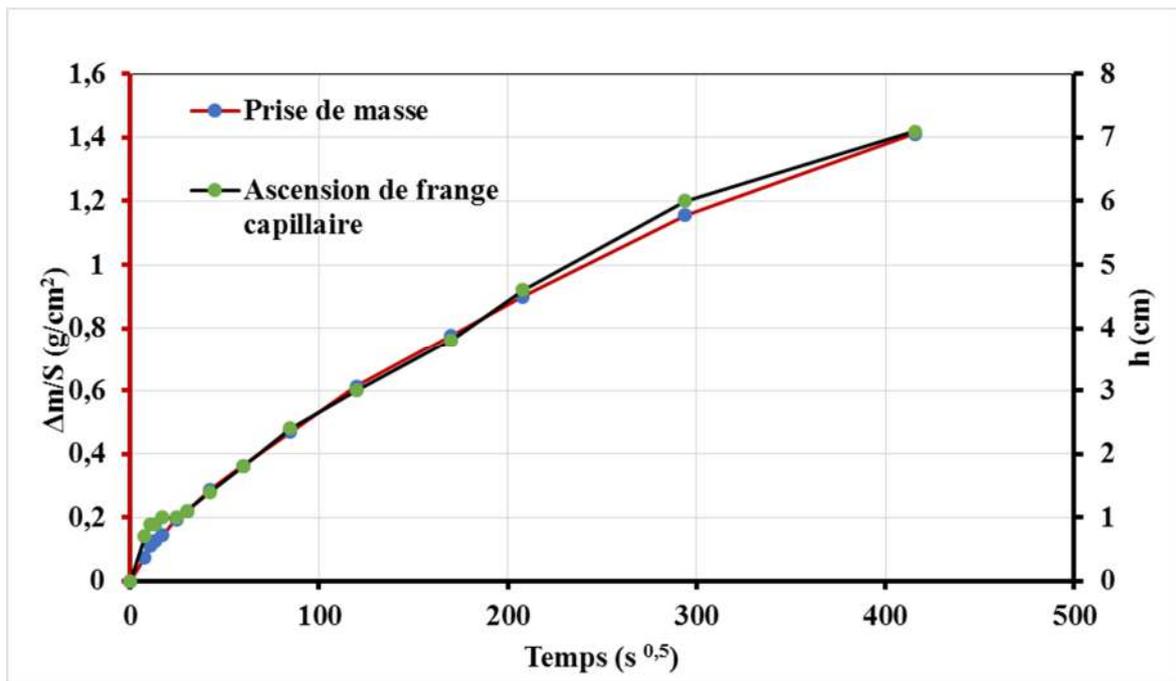
3.4. Détermination des coefficients de transfert hydrique

Les Figure IV. 32a, b, c et d présentent les courbes de prise de masse et de l'ascension de la frange capillaire des formulations BC₃L₁₀, BC₅L₁₀, BFC₃L₁₀, BFC₅L₁₀, respectivement. Comme dans le cas de la stabilisation au ciment, ces courbes sont caractéristiques d'un réseau homogène. Ici aussi la prise de masse est régulière. Les courbes de prise de masse et de l'ascension de la frange capillaire sont presque confondues ce qui laisse penser que l'eau remonte par capillarité sans à-coups pendant qu'elle est absorbée par les blocs.

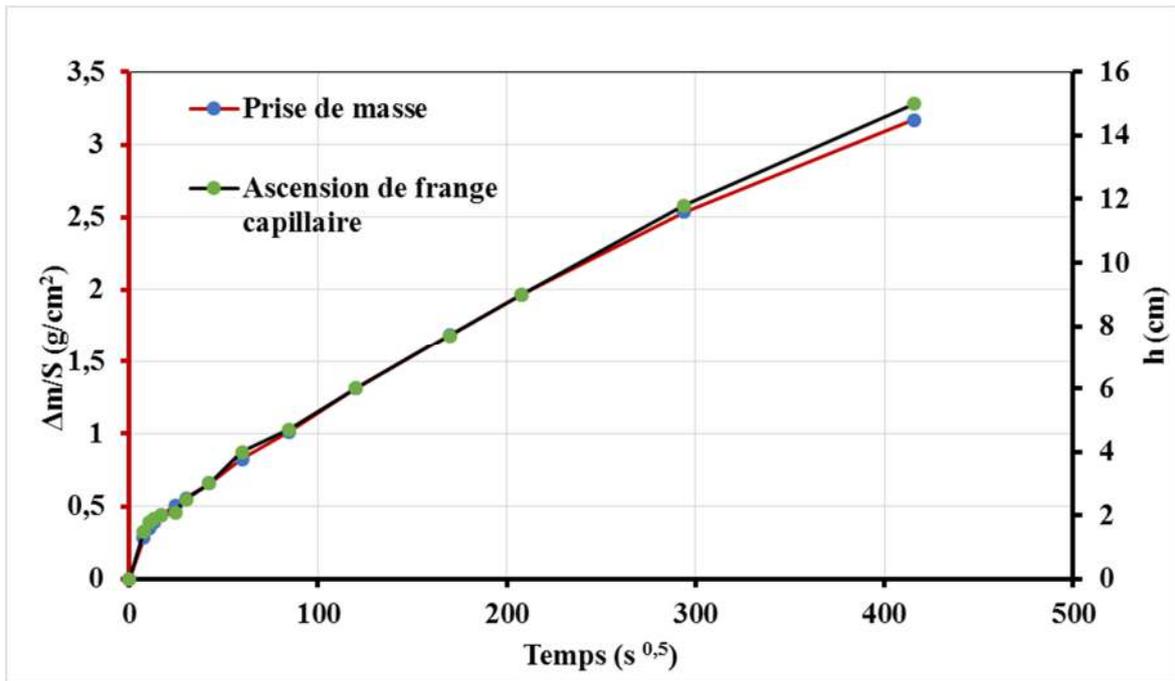
Sur une durée maximale de 24h, les courbes de prise de masse pour les échantillons stabilisés peuvent être schématisées par deux domaines de comportement associés à deux phases d'absorption. La première phase caractérisée par un coefficient A est plus rapide que la deuxième phase caractérisée par le coefficients A'. Il est à noter que les coefficients de Washburn sont plus faibles dans le cas de la stabilisation mixte ciment-laitier que dans le cas de la stabilisation au ciment, cela confirme la diminution de la sensibilité à l'eau remarquée au niveau de l'ATE des blocs et montre également que la porosité totale des blocs est réduite du fait de cette stabilisation mixte. L'ajout des fibres entraîne une légère augmentation des coefficients de Washburn (Tableau IV. 4), mais ils restent toujours inférieurs à ceux trouvés par la stabilisation au ciment seul.



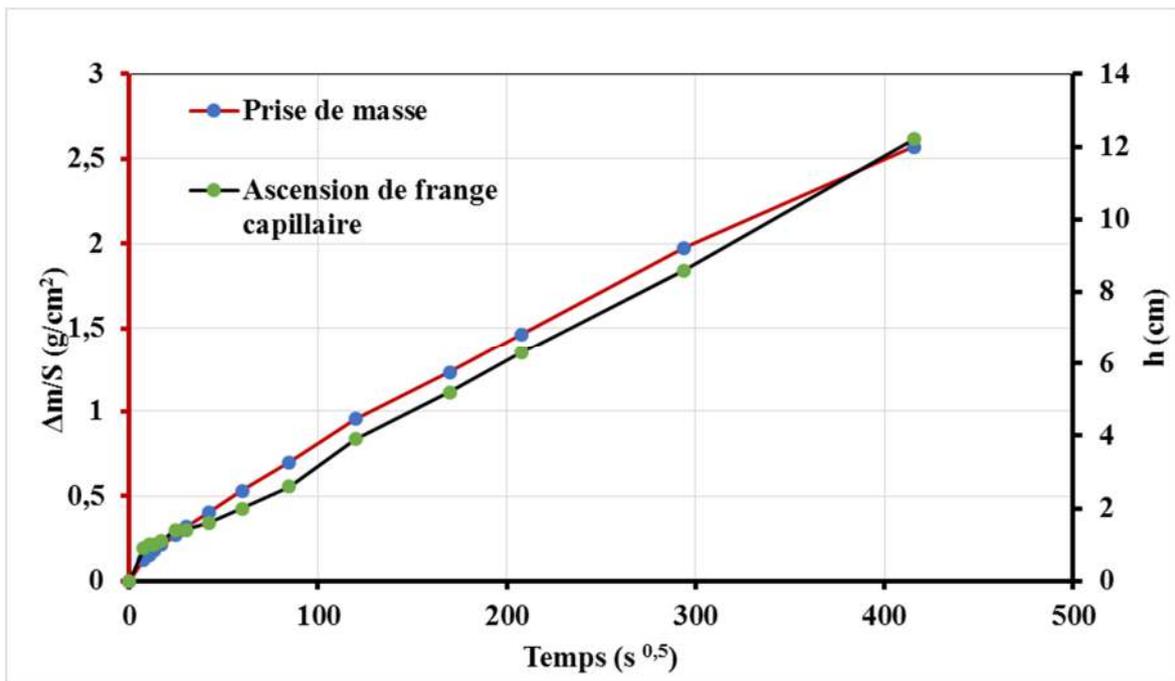
a)



b)



c)



d)

Figure IV. 32 Courbes de prise de masse et de l'ascension de la frange capillaire des blocs en fonction du temps : a) Formulation BC₃L₁₀ ; b) Formulation BC₅L₁₀ ; c) Formulation BFC₃L₁₀ et d) Formulation BFC₅L₁₀

Formulation	A (g/cm ² s ^{0,5})	A' (g/cm ² s ^{0,5})	B (cm/s ^{0,5})
BC₃L₅	0.0121	0.007	0.042
BC₃L₁₀	0.0093	0.005	0.035
BC₅L₅	0.0055	0.0041	0.028
BC₅L₁₀	0.0061	0.0033	0.019
BF_{0,5}³C₃L₁₀	0.0116	0,0071	0.040
BF_{0,5}³C₅L₁₀	0.0075	0.0055	0.024

Tableau IV. 4 : Données moyennes des coefficients caractéristiques de l'absorption par capillarité des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier.

Dans le cas de la formulation BFC₃L₁₀ la première phase est caractérisée par une absorption rapide et importante qui se traduit par un coefficient élevé A. Les nouveaux hydrates formés par l'interaction ciment-laitier de haut fourneau ne sont pas assez abondants pour réduire notablement les vides créés par la présence des fibres. Cette phase rend compte de la cinétique d'absorption très rapide des fibres végétales et qui se stabilise au bout de 3heures comme dans le cas de la stabilisation au ciment. Par contre dans le cas de la formulation BC₅L₁₀F la diminution des coefficients A et A' reflète la porosité plus faible.

3.5. Porosité accessible à l'eau

Les effets de la stabilisation mixte ciment-laitier de haut fourneau et celui des fibres sur la porosité accessible à l'eau sont présentés dans le Tableau IV. 5. Ce tableau montre une diminution de la porosité avec l'augmentation de la teneur en ciment et du laitier granulé. Cette diminution devient plus significative avec l'ajout de 10% de laitier stabilisé à 5 % de ciment. Ces résultats sont bien en accord avec les résultats des résistances mécaniques et confirment la réduction de la sensibilité à l'eau des blocs. La porosité accessible à l'eau qui augmente avec l'introduction des fibres dans les formulations est notablement réduite suite à l'ajout de 10% de laitier et 5% de ciment. La stabilisation mixte opère par la formation de nouveaux hydrates qui diminuent la porosité et rehaussent les propriétés mécaniques.

Formulation	n (%)
BC₃	24,82
BC₃L₅	21,34
BC₃L₁₀	19,38
BC₅	23,93
BC₅L₅	20 ,00
BC₅L₁₀	17,34
BF_{0,5}³C₃L₁₀	24,48
BF_{0,5}³C₅L₁₀	20,32

Tableau IV. 5 : Porosité accessible à l'eau des blocs stabilisés au mélange laitier de haut fourneau-ciment

4. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs

La cure est définie comme l'ensemble des processus utilisés pour favoriser l'hydratation du ciment [39]. Elle consiste en un contrôle de la température et de l'humidité autour et à l'intérieur des blocs. Les travaux menés sur les bétons et les mortiers ont justifié l'importance de la cure pour atteindre de bonnes résistances mécaniques.

Dans cette étude, les blocs de terre comprimée ont été stabilisés chimiquement soit par le ciment soit par le mélange ciment-laitier granulé. Ces blocs sont composés donc d'une matrice cimentaire qui exige une cure adéquate afin de favoriser les réactions chimiques qui permettront d'atteindre de bonnes propriétés mécaniques, notamment. Pour les BTC amendés au ciment, la cure par couverture d'un film en plastique pendant une durée de 28 jours dans un climat modéré est suffisante pour que la résistance du bloc atteigne une valeur acceptable, puisque la réaction pouzzolanique du ciment est plus ou moins rapide comparée à celle de la chaux. Le premier mode de cure usuel consiste à conserver les blocs stabilisés aux liants dans une chambre climatique à une température de 20°C ±1°C et une humidité relative de 50% ±5% jusqu'à stabilisation de leur masse. Les blocs qui ont subi cette cure sont nommés $BT_{20}H_{50}$.

Les blocs du deuxième mode de cure sont normés $BT_{20}H_{90}$. Nous rappelons que ce mode consiste en un premier temps à placer les blocs dans une enceinte climatique à 20°C pendant 24 heures, puis à 90% d'humidité relative pendant 28 jours, et dans un second temps dans la chambre climatique à 20°C et à 50% d'humidité relative jusqu'à stabilisation de leur masse. Le troisième mode de cure utilisé consiste à couvrir d'un film de plastique les blocs et à les placer dans la chambre climatique à une température de 20°C ±1°C et une humidité relative de 50% ±5% pendant 28 jours. Après cette période de 28 jours le film plastique est enlevé et certains blocs sont laissés dans la chambre climatique alors que d'autres sont placés dans l'étuve à 40°C jusqu'à stabilisation de la masse. Les blocs qui sont restés dans la chambre climatique après l'enlèvement du film plastique sont nommés $BPT_{20}H_{50}$ et ceux qui sont maintenus dans l'étuve à 40°C sont normés BPE_{40} .

4.1. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs stabilisés au ciment

L'étude de l'effet du mode de cure a été faite sur les BTC stabilisés avec 7% de ciment d'une part (BC_7), et d'autre part des blocs stabilisés avec 7 % de ciment et renforcés par 0,5% de fibres de longueur 30 mm ($BF^{3}_{0,5}C_7$). La Figure IV. 33 présente la variation des résistances à la compression sèche en fonction des modes de cure.

Les résultats montrent que les blocs curés à l'étuve (BPE_{40}) présentent la meilleure résistance à la compression comparativement aux trois autres modes de cure. La RCS de BPE_{40} dépasse celles de $BT_{20}H_{50}$, $BPT_{20}H_{50}$ et $BT_{20}H_{90}$ de 14 %, 38 % et 10,5 % respectivement. Dans le même contexte, la résistance à la flexion trois point des blocs BPE_{40} à l'état sec, dont les résultats sont présentés sur Figure IV. 34, dépasse celles de $BT_{20}H_{50}$, $BPT_{20}H_{50}$ et $BT_{20}H_{90}$ de 16

%, 43.5 % et 24 % respectivement. Ceci illustre l'avantage de la cure à l'étuve sur le plan de la réduction du temps de conservation des BTC, mais au détriment de l'économie de consommation d'énergie.

Du point de vue résistance mécanique, le meilleur mode de cure est le mode à l'étuve, puis suit celui dans une chambre climatique de température 20°C et d'humidité relative de 50%. Ces résultats montrent que pour les blocs stabilisés au ciment, la résistance mécanique est mieux révélée par le séchage que par l'hydratation du ciment. Pour des raisons d'économie d'énergie nous choisissons de procéder par la suite par la cure à la température de 20°C et 50% d'humidité relative puisque l'augmentation de la RCS du BPE40 par rapport à BT20H50 n'est que de 14%. Les mêmes observations ont été faites sur ces blocs renforcés par 0,5% de fibres de kénaf de longueur 30mm (Figure IV. 35 et Figure IV. 36). La résistance mécanique évolue dans le même sens même avec l'ajout des fibres.

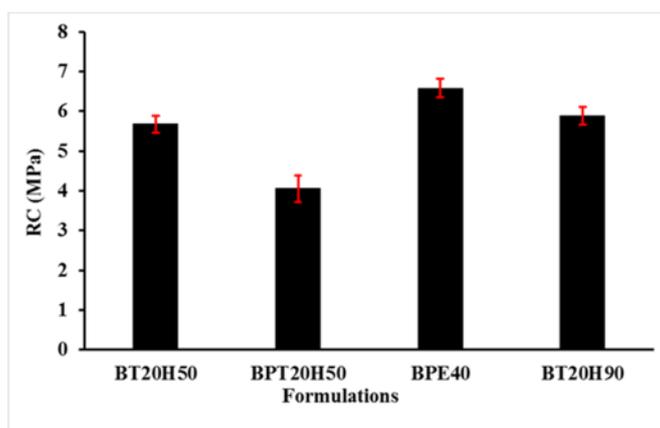


Figure IV. 33 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au ciment

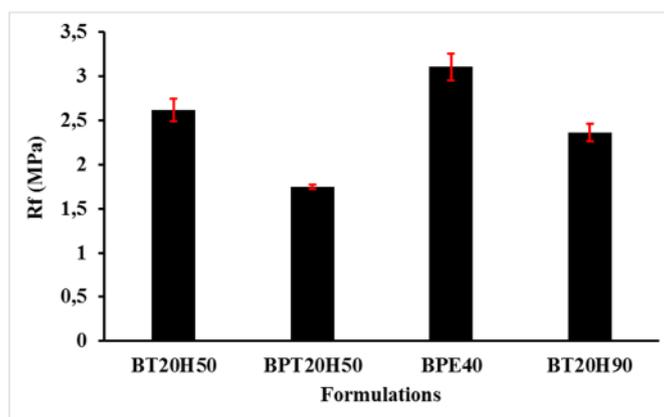


Figure IV. 34 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au ciment

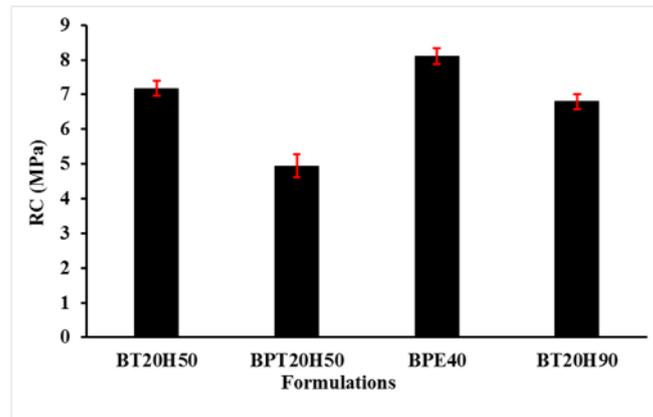


Figure IV. 35 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au ciment et renforcés par les fibres de kénaf

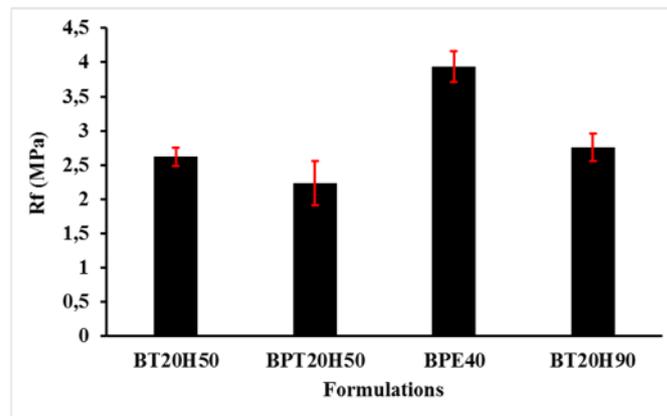


Figure IV. 36 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au ciment et renforcés par les fibres de kénaf

4.2. Influence du mode de cure sur la résistance mécanique des blocs stabilisés au mélange ciment-laitier de haut fourneau

Dans ce cas trois modes ont été explorés :

- La conservation dans une chambre climatique à 20°C et 50% d'humidité relative. Les blocs sont nommés AT_{20H50} ;
- La conservation dans la chambre climatique à une température de 20°C ± 1 et une humidité relative de 50% ± 5 des blocs préalablement recouverts par un film en plastique pendant 28 jours. Ces blocs ont été ensuite placés dans l'étuve à 40°C après avoir ôté le film en plastique. Les blocs sont nommés APE_{40}
- La conservation des blocs jusqu'à stabilisation de la masse dans la chambre climatique de 20°C ± 1 et d'humidité relative de 50% ± 5 après avoir ôté le film plastique. Ces blocs sont nommés APT_{20H50}

Les résultats de l'effet de ces modes de cure sur les résistances à la compression et à la flexion sont présentés respectivement par les Figure IV. 37 Figure IV. 38. Ces essais ont été menés sur la formulation BC_5L_{10} . Tout comme dans le cas des blocs stabilisés au ciment, le

mode de cure à l'étuve donne les meilleurs résultats en compression et en flexion trois points. Les résistances mécaniques de APT_{20H50} dépassent légèrement celles de AT_{20H50} . Dans le cas de la stabilisation mixte ciment-laitier de haut fourneau, l'augmentation des résistances mécaniques est due plutôt à l'hydratation des liants qu'au séchage, cela pourrait être expliqué par le taux élevé de liant dans le mélange. Le meilleur résultat obtenu avec APE_{40} pourrait être expliqué par l'accélération de l'hydratation et la réaction pouzzolanique entre le laitier granulé et le sol

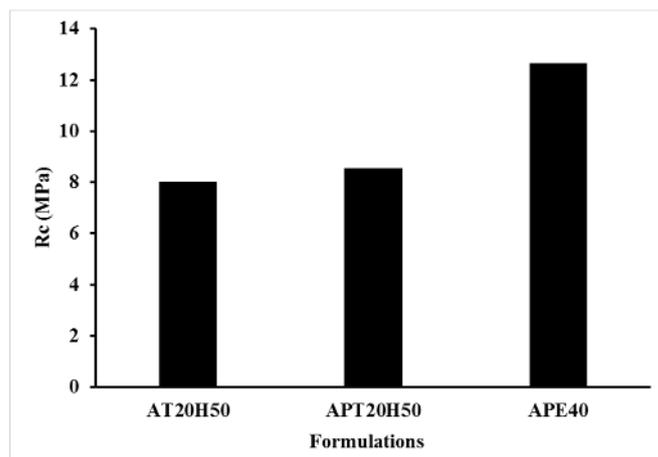


Figure IV. 37 : Effet des modes de cure sur la résistance à la compression des Blocs stabilisés au mélange ciment-laitier

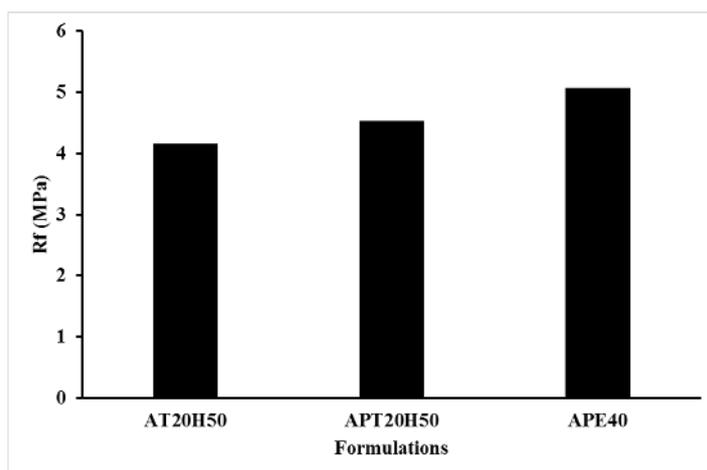


Figure IV. 38 : Effet des modes de cure sur la résistance à la flexion trois points des Blocs stabilisés au mélange ciment-laitier

5. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre, dans un premier temps, l'optimisation de certains paramètres physiques à savoir : la teneur en eau, la contrainte de compactage, la teneur et la

longueur des fibres à incorporer dans les formulations afin d'améliorer la résistance mécanique des blocs. Dans ce chapitre nous avons également étudié la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques des blocs par stabilisation chimique et physique, ainsi que la résistance vis-à-vis de l'eau des blocs. Pour une meilleure stabilisation des BTC, nous avons utilisé des stabilisants chimiques à savoir le ciment et le mélange laitier de haut fourneau activé par le ciment.

Afin d'optimiser les résistances mécaniques, une étude du mode de cure a été menée. Les résultats de cette étude expérimentale ont conduit aux conclusions principales suivantes :

- La cure à l'étuve des BTC stabilisés au ciment ou au mélange ciment-laitier granulé donne les meilleures résistances à la compression et la flexion trois points sèche, comparativement aux autres modes de cure;

- La cure dans une chambre climatique à 20°C et 50% d'humidité relative est acceptable du point de vue de la résistance mécanique. Ce résultat a été obtenu sans dépense d'énergie, d'où son intérêt économique comparé à la cure à l'étuve;

- Une étude d'optimisation du taux et de la longueur des fibres a conduit aux meilleurs résultats de résistance mécanique (résistance à la compression et à la flexion trois points sèche) et de conductivité thermique avec une teneur de 0,5% de fibres de longueur 30mm. ;

- L'ajout des fibres de kénaf a conduit à une amélioration significative de la résistance mécanique et surtout de la résistance à la flexion trois points des BTC. Le matériau passe d'un comportement fragile caractérisé par une rupture brutale à un comportement ductile pour lequel, après apparition des fissures dans la matrice, les fibres végétales reprennent les efforts et permettent une déformation plus importante conjuguée à un endommagement avant la rupture, ce qui permet d'accroître notablement la résistance à la rupture. Bien sûr, après le premier pic correspondant à l'apparition de la fissure matricielle, le matériau est endommagé de manière irréversible ;

- Les meilleurs résultats de résistance mécanique sont obtenus avec les blocs stabilisés à 7 % de ciment et renforcés par 0,5% de fibres de longueur 30mm, ainsi que les blocs stabilisés par 10% de laitier granulé activé par 5% de ciment et renforcés par 0,5 % de fibres de longueur 30 mm ;

- Une baisse générale de la résistance à la compression et à la flexion humide avec l'ajout des fibres pour tous les BTC testés, comparativement aux blocs sans fibres ;

- L'absorption totale d'eau (ATE) des blocs diminue avec l'augmentation de la teneur en liant et augmente avec l'incorporation des fibres;

- L'ATE de tous les BTC étudiés n'a pas dépassé 15 %, limite recommandée par l'organisation suisse « International Labour Organisation »

Bibliographie

- [1] Madsen, B., A. Thygesen, et H. Lilholt. *Plant fibre composites – porosity and stiffness. Composites Science and Technology* 69, 1057-1069, 2009.
- [2] Gencel, O., C. Ozel, W. Brostow, et G. Martínez-Barrera. *Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. Materials Research Innovations* 15, 216-225, 2011.
- [3] Pickering, K. L., M. G. A. Efendy, et T. M. Le. *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83, 98-112, 2016.
- [4] Page, J. *Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée. Thèse de doctorat de l'université de Caen Normandie, 11 décembre 2017.*
- [5] Millogo, Y., Morel, J-C., Aubert, J-E., and Ghavami, K. “*Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers.*” *Construction and Building Materials*, Vol. 52, pp. 71-78. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094, 2014.
- [6] Binici H, Aksogan O, Shah T. *Investigation of fibre reinforced mud bricks as a building material. Construc Build Mater; 19: 313-318, 2005.*
- [7] Ghavami K, Toledo Filho RD, Barbosa NP. *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. Cem and Concr Compos ; 21: 39-48, 1999.*
- [8] Achenza M, Fenu L. *On soil stabilization with natural polymers for soil masonry construction. Mater Struct ; 39: 21-27, 2006.*
- [9] Yetgin S, Cavdar O, Cavdar A. *The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. Construc Build Mater ; 22(3): 222-227, 2008.*
- [10] ACI 544. *State-of-the-art report on fibre reinforced concrete. Reported by ACI Committee 544.1-96, 1996.*
- [11] M. Ben Mansour, A. Jelidi, A. Soukaina Cherif , S. Ben Jabrallah. “*Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB)*” *Construction and Building Materials; 10,444–51, 2016.*
- [12] Mesbah A, Morel JC, Walker P, Ghavami K. *Development of a direct tensile test for compacted soil blocks reinforced with natural fibers. J Mater Civil Eng ; 16(1):95–8, 2004.*
- [13] Bouhicha, M., Aouissi, F., and Kenai, S. “*Performance of composite soil reinforced with barley straw.*” *Cement and Concrete Composites, Vol. 27, No. 5, pp. 617-621. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004. 09.013, 2005.*

- [14] **Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** *Performance of compacted cement stabilised soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.*
- [15] **Oti JE, Kinuthia JM, Bai J.** *Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks. Eng Geol;109(3-4):230-40, 2009.*
- [16] **CHAFEI S.** *Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie 2014.*
- [17] **T. Bachir.** *Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, Génie Civil, 2014.*
- [18] **Namango S.** *Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction. In: Investigations into the properties of compressed earth blocks stabilized with sisal vegetable fibres. cassava powder and cement compositions. A doctoral dissertation. Brandenburg Technical University; Cottbus ,Germany, 2006.*
- [19] **Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J.** *Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. Cem Concr Compos; 27(1):111-116, 2005.*
- [20] **Houben H, Guillaud H.** *Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology, 1994.*
- [21] **Houben H, Rigassi V, Garnier P.** *Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRA Terre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.*
- [22] **Ghavami K, Filho RDT, Barbosa NP.** *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. Cem Concr Compos; 21(1):39-48, 1999.*
- [23] **Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi AA.** *Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. Geotech Geol Eng; 29(5):899-908, 2011.*
- [24] **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.*
- [25] **Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. (2005).** *Performance of composite soil reinforced with barley straw. Cem Concr Compos, 27(5):617-21.*
- [26] **Piattoni Q, Quagliarini E, Lenci S.** *Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. Constr Build Mater;25(4):2067-75, 2011.*
- [27] **Kerali AG.** *Durability of Compressed and Cement-Stabilised Building Blocks. Ph.D. Thesis, Development Technology Unit, Warwick University, 2001.*

- [28] Jackson N, Dhir RK. *Civil Engineering Materials*. 5th ed. England: McMillan Press Ltd., London, England, 1996.
- [29] Rigassi V. *Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production*, CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- [30] 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.
- [31] British Standards Institution. *Code of practice for use of masonry. Part 3. Materials and components, design and workmanship (formerly CP 121: Part 1)*. BS 5628: Part 3: 1985. BSI. London, England, 1985.
- [32] Colas E. *Impact de l'humidité et des solutions salines sur le comportement dimensionnel de grès du Buntsandstein: contribution à la sélection de faciès de restauration*. Thèse de doctorat. Ecole doctorale Sciences, technologies, santé, 2011
- [33] Wild. S., Kinuthia.J.M., Jones, G.I. Higgins, D.D. *Effect of partial substitution of lime with ground granular furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils*. *Engineering Geology* 51, 35–53, 1998.
- [34] Puppala JA, Griffin JA, Hoyos, LR, Chomtid S. *Studies on sulfate-resistant cement stabilization methods to address sulfate-induced soil heave*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 391–402 (ASCE), 2004.
- [35] Celik E, Nalbantoglu Z. *Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils*. *Engineering geology* 163 (2013) 20–25, 2013.
- [36] O. Izemmouren, A. Guettala. *Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate*. Conférence Matériaux -Colloque Ecomatériau. Archives ouvertes hal-01144594. France, 2015.
- [37] J. Page, F. Khadraoui, M. Boutouil, M. Gomina. *Traitements des fibres de lin : influence sur l'hydratation d'un composite ciment-lin*, 34èmes Rencontres de l'AUGC, Université de Liège, Belgique, 25 au 27 mai 2016, 2016.
- [38] ILO/UNIDO. *Small-scale Brickmaking. Technology Series, Memorandum No.6*. International Labour Organisation. Geneva, Switzerland, 1987.
- [39] Neville AM. *Propriétés des bétons*. Editions Eyrolles, Paris, 2000.

Chapitre :

V- COMPORTEMENTS HYGROMECHANIQUE DES BLOCS DE MAÇONNERIES ET ETUDE EXPERIMENTALE DE LEURS TECHNIQUES D'ISOLATION

*Le passage du domaine expérimental au domaine industriel permet d'adapter et de confirmer les données expérimentales. L'étude expérimentale des différentes formulations (éprouvettes 4*4*16 cm³) nous a permis d'identifier des meilleures formulations du point de vue mécanique et hygrométriques. ces différentes formulations à savoir :*

- *La terre seule (cette formulation est notée D0) ;*
- *La terre renforcée par 0,5 % de fibres de longueur 30mm (Cette formulation est notée DF) ;*
- *La terre stabilisée avec 7% de ciment (cette formulation est noté DC) ;*
- *La terre stabilisée avec 7 % de ciment et renforcée par 0,5 % de fibres de longueur 30mm (cette formulation est noté DFC) ;*
- *La terre stabilisée par 10 % laitier de haut fourneau activée par 5 % de ciment (cette formulation est notée DCL) ;*
- *La terre stabilisée par 10 % laitier de haut fourneau activée par 5 % de ciment et renforcée par 0,5 % de fibres de longueur 30mm (cette formulation est notée DFCL);*

ont été utilisées pour réaliser les différentes briques de maçonnerie que nous avons étudiées dans ce chapitre.

Ce chapitre est scindé en deux parties : La première est consacrée à l'étude du comportement mécanique de ces briques et la deuxième partie porte sur l'étude expérimentale des techniques d'isolations de ces briques.

1. Comportement mécanique

Pour mettre en évidence le comportement mécanique des briques dans une structure de maçonnerie nous avons réalisé les essais mécaniques (essais de flexion trois point et essai de compression) sur les briques issues des meilleures formulations obtenues à partir des éprouvettes $4*4*16\text{ cm}^3$.

1.1. Résistance à la compression simple

Cet essai qui a pour objectif de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre crue compressée est réalisé selon la norme XP 13-901[1]. En effet il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de terre à une compression simple jusqu'à la rupture. La résistance à la compression moyenne des blocs est la moyenne arithmétique des résistances à la compression de trois essais réalisés sur des échantillons d'une même formulation.

La Figure V. 1 présente la variation de la résistance à la compression moyenne en fonction des différentes formulations

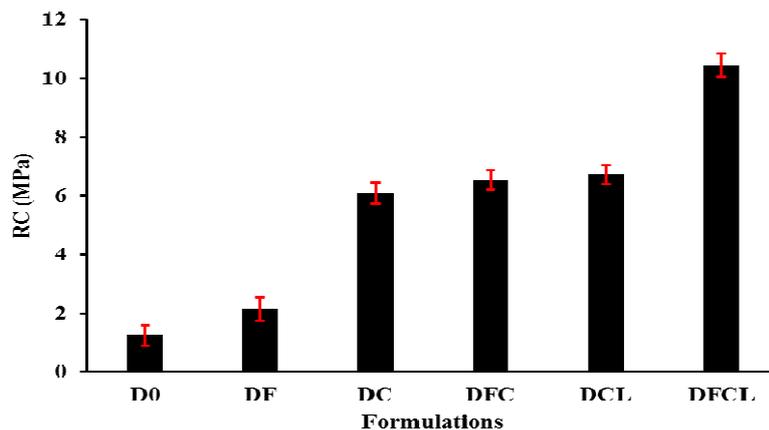


Figure V. 1 : Variation de la résistance à la compression des briques en fonction des différentes formulations

On note comme dans le cas des éprouvettes $4*4*16\text{ cm}^3$, une augmentation de la résistance à la compression avec la stabilisation des blocs de maçonnerie aux liants et au renfort par les fibres. Cette augmentation devient plus importante avec la stabilisation des blocs par le mélange ciment-laitier renforcés par les fibres. On remarque également une diminution de la résistance à la compression des blocs de maçonnerie quelle que soit la formulation considérée comparativement aux éprouvettes $4*4*16\text{ cm}^3$ étudiées dans le chapitre IV. Cette diminution pourrait être attribuée à la force de compaction de la presse hydraulique utilisée pour la confection des blocs de maçonnerie. En effet sur la presse est mise une force de compression théorique de 30 tonnes mais on n'avait pas les moyens pour vérifier cela. Les valeurs de la résistance à la compression enregistrées restent supérieures à 0,2 MPa qui est la valeur limite supérieure de la descente de charge liée au poids des murs. En effet, un mur de BTC maçonné en mortier de terre voit apparaître ses premières fissures autour de 0,55 MPa

(sans stabilisant) à 0,9 MPa (bloc et maçonnerie stabilisée). L'effondrement du muret intervient avec une contrainte de compression beaucoup plus importante (de 1MPa à 3MPa) [2]. Toutes les briques stabilisées ont des résistances à la compression bien supérieure à ces valeurs, ces briques stabilisées conviennent donc à la confection des bâtiments de type R+1.

1.2. Résistance à la flexion 3 points des blocs de maçonnerie

Les résultats de l'essai de flexion trois points sur les blocs de maçonnerie sont présentés par la Figure V. 2

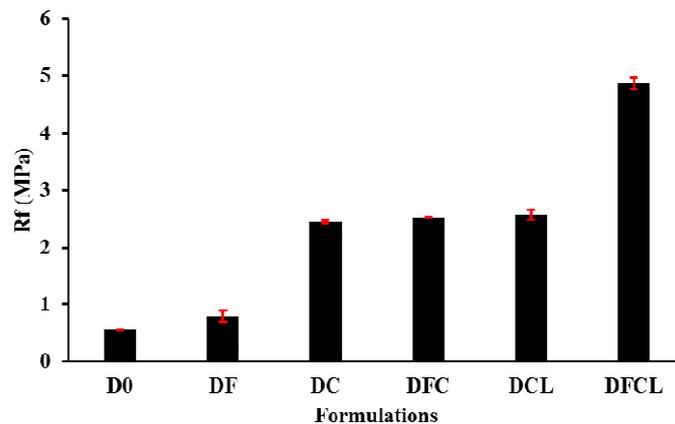


Figure V. 2 : Variation de la résistance à la flexion trois points des briques en fonction des différentes formulations

La résistance à la flexion trois points évolue dans le même sens que la résistance à la compression. Ces résultats ont aussi connu une légère baisse par rapport à ceux obtenus au niveau des éprouvettes 4*4*16 cm³. En effet, comme nous l'avons montré au chapitre IV, les fibres ont contribué à augmenter la résistance aux fissurations et à la propagation de celles-ci, ce qui augmente la résistance mécanique de ses briques.

2. Etude expérimentale de l'isolation des différentes briques formulées

Les parois qui constituent l'enveloppe d'un bâtiment sont en permanence soumises à des sollicitations hygrothermiques ou hydriques provenant de l'environnement. La Figure V. 3, synthétise les différentes sollicitations subies par une paroi. Ces sollicitations sont variables dans le temps (alternance jour/nuit, alternance des saisons, variations climatiques et météorologiques...) et également dans l'espace puisque toutes les parois d'un même bâtiment n'ont pas la même orientation (apports solaires différents, exposition aux vents, à la pluie...).

Ces sollicitations extérieures entraînent des fluctuations des températures et humidités de l'air intérieur dont l'amplitude et les moments d'occurrence dépendent aussi bien de la sollicitation extérieure que des propriétés de transfert hygrothermiques de l'enveloppe. Concevoir l'enveloppe d'un bâtiment et choisir les modes constructifs nécessite donc de prendre

en compte aussi bien les caractéristiques statiques du bâtiment que les caractéristiques dynamiques.

Ces caractéristiques dynamiques sont fortement dépendantes des propriétés hygrothermiques des matériaux, mais également de la manière dont ils sont mis en œuvre dans la paroi. Par exemple, une isolation par l'extérieur ou par l'intérieur n'entraînent pas les mêmes comportements dynamiques de la paroi et par conséquent du bâtiment dans son ensemble. De plus, les caractéristiques dynamiques des parois dépendent également de la période des sollicitations, de telle sorte qu'une fluctuation de la température sur une période d'une heure n'est pas transférée de la même façon par les parois qu'une fluctuation d'une période d'une journée ou d'une semaine.

La norme NF EN ISO 13786 [3] propose une méthode, justifiée d'un point de vue théorique, pour représenter le comportement dynamique des parois par l'intermédiaire d'une matrice de transfert. Les coefficients de cette matrice permettent d'accéder à deux paramètres clé du comportement thermique dynamique de la paroi :

- *le déphasage* : il correspond à l'écart temporel séparant un pic de la température extérieure et le pic qui en résulte sur la température intérieure.
- *l'atténuation* : elle correspond au rapport entre l'amplitude des fluctuations de la température extérieure et l'amplitude qui en résulte sur la température intérieure.

Connaître les propriétés dynamiques des parois présente donc un intérêt du point de vue de la conception des ouvrages puisque leur prise en compte permet de choisir des modes constructifs conférant au bâtiment une inertie adaptée à son usage.

Dans cette partie de l'étude, on propose de déterminer les propriétés thermiques dynamiques de parois réalisées à l'aide de briques de terre compressée. Plusieurs formulations sont testées : terre seule, terre amendée par le ciment, terre renforcée par des fibres de kénaf, terre amendée par le ciment et renforcée par des fibres de kénaf. Les parois sont sollicitées dans une cellule biclimatique permettant d'imposer des cycles de 24h en température et de déterminer par une méthode d'inter-corrélation de signaux le déphasage occasionné par la paroi. L'atténuation est déterminée à partir des amplitudes des signaux intérieur et extérieur mesurées en surface de paroi.

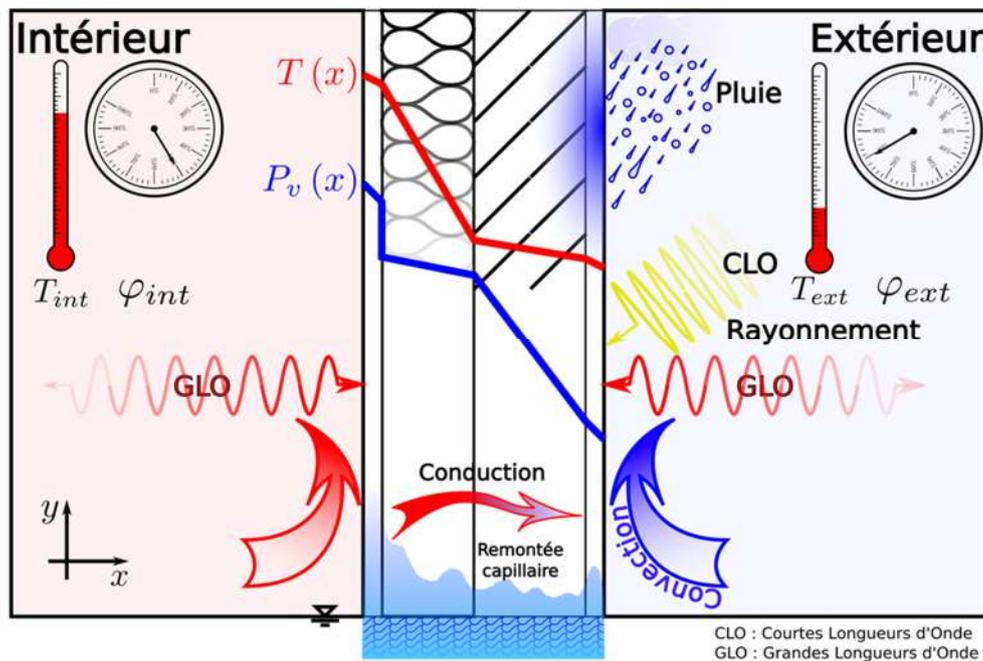


Figure V. 3 : Principales sollicitations hygrothermiques et hydriques imposées à la paroi d'un bâtiment

2.1. Cellule biclimatique analyse des signaux

2.1.1. Dispositif expérimental développé

Le dispositif expérimental a été développé dans le cadre de la thèse d'Inès Othmen (Othmen, 2015) [4]. Le but était alors d'évaluer des paramètres relatant les comportements thermique, hydrique et dynamique de différents types de paroi intégrant un matériau de structure (tuffeau) et un matériau d'isolant thermique par l'extérieur (béton de chanvre).

Le but du dispositif est de placer la paroi entre deux espaces aux conditions hygrothermiques (température et humidité) différentes afin de la solliciter par des créneaux de température. La période des sollicitations choisie est de 24h afin d'étudier les propriétés dynamiques pour des fluctuations quotidiennes de la température.

La cellule biclimatique utilisée ici se compose de deux compartiments séparés par la paroi testée comme l'indique la Figure V. 4. Un premier compartiment, appelé « ambiance intérieure », conditionne une ambiance de 23°C et de 47% d'humidité relative. Dans le second compartiment, dit « ambiance extérieure », la température est maintenue à 5°C durant 8h et à 15°C durant 16h, reproduisant ainsi des créneaux de 24h, comme le montre le graphe de la Figure V. 5. Avant de mener les essais cycliques, les parois sont stockées dans une cellule climatique contrôlée en température et humidité relative (20°C;50%HR) jusqu'à stabilisation de leur masse (équilibre hygrothermique avec l'environnement de stockage). Elles sont ensuite

mises en place dans la cellule biclimatique où les températures sont maintenues à 23°C et 15°C de part et d'autre de la paroi durant 15 jours afin de s'assurer de conditions initiales stabilisées dans la paroi. En effet, durant cette durée, l'humidité contenue initialement dans la paroi se redistribue jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre hygrothermique.

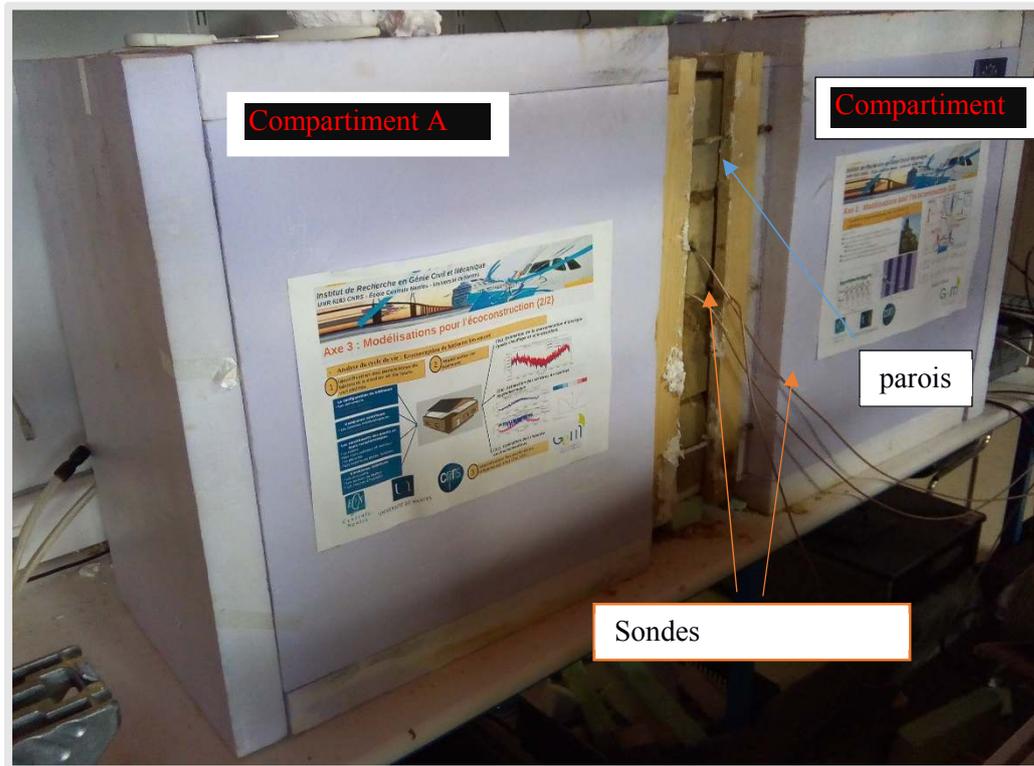


Figure V. 4 : Cellule bichimatique vue de face

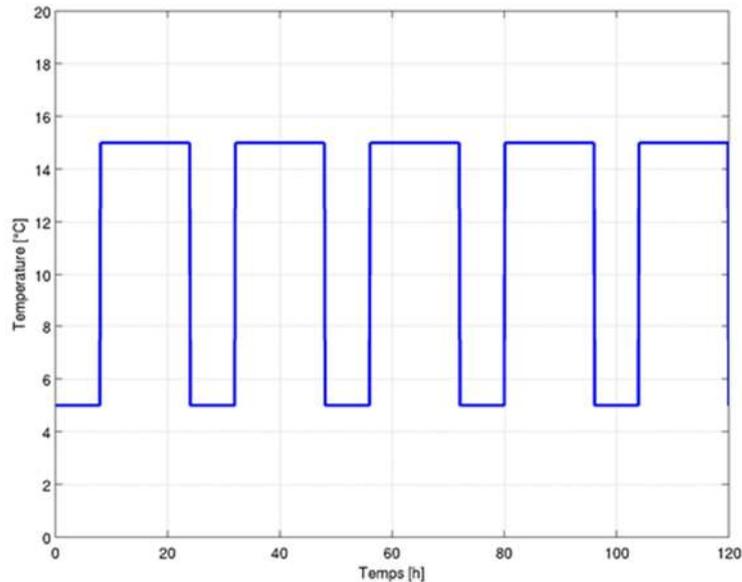


Figure V. 5 : Sollicitation thermique cyclique imposée à la paroi

Durant les essais, la pression de vapeur (potentiel pour le transfert de vapeur) est plus élevée dans le compartiment froid que dans le compartiment chaud. Par conséquent, un flux de vapeur dirigé du compartiment froid vers le compartiment chaud pourrait avoir tendance à augmenter l'humidité absolue de l'air dans le compartiment chaud. Les solutions salines

saturées placées dans chaque compartiment permettent d'absorber le surplus d'humidité et d'alimenter le flux de vapeur. Par conséquent, le volume de ces solutions et la quantité de sels en surplus par rapport à la limite de solubilité du sel dans l'eau sont déterminés de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire de les changer durant l'application des cycles de température.

2.2. Description de la cellule biclimatique

La cellule biclimatique, décrite dans les Figure V. 6 et V. 7 est fabriquée en contreplaqué bakélinisé. Chaque compartiment mesure 30 cm de largeur, 60 cm de hauteur et 50 cm de profondeur. L'ensemble est ensuite recouvert avec 6 cm de polystyrène extrudé afin d'isoler thermiquement les compartiments.

Des échangeurs de chaleur dans chaque caisson sont alimentés par une circulation d'eau qui permet de réguler la température souhaitée. L'échange de chaleur entre les ambiances à l'intérieur des caissons et la circulation d'eau est assuré par un échangeur de chaleur Aspen 4105. Cet échangeur est fixé au plafond de chaque caisson et équipé d'un ventilateur afin d'assurer la circulation de l'air intérieur dans l'échangeur ainsi qu'une uniformisation par brassage de la température et de l'humidité relative de l'air dans les caissons.

L'échangeur du caisson « ambiance intérieure » est relié à un bain thermostaté Huber qui permet la régulation de température de l'ambiance à 23°C avec une précision de $\pm 0,05^\circ\text{C}$. L'échangeur du caisson « ambiance extérieure » est connecté à un cryothermostat Thermo Scientific Haake Arctic dont la plage de température de fonctionnement est comprise entre 10°C et 100°C. Les deux bains sont placés en dessous des compartiments des ambiances. La circulation de l'eau dans les circuits est réalisée par une mini pompe Terluran submersible assurant un débit de 5 L/min.

Afin de limiter les variations de l'hygrométrie dans les ambiances intérieure et extérieure, on y place des bacs contenant des solutions salines saturées. Les sels utilisés sont :

- le carbonate de potassium (K_2CO_3) pour l'ambiance intérieure qui permet d'imposer une humidité relative de 43 %
- le chlorure de potassium (KCl) pour l'ambiance extérieure qui permet d'imposer une humidité relative de 88 %

Chaque caisson contient alors un récipient de solution aqueuse saturée, dont la surface couvre la quasi-totalité du fond du caisson. La Figure V. 8 illustre davantage le système permettant d'imposer la température et l'humidité relative dans un caisson.

La paroi à tester est placée entre les deux compartiments. Des joints Compriband permettent d'assurer l'étanchéité entre les deux compartiments. Les surfaces latérales de la paroi testée sont isolées thermiquement à l'aide de mousse de polyuréthane projetée.

Les échanges de chaleur à la surface des parois intérieure et extérieure de la cellule ont été étudiés par Othmen (2015). Les résistances thermiques d'échange sur ces deux surfaces ont été évaluées et les valeurs sont données dans le Tableau V. 1.

R_{si} [m ² .K/W]	0,05 ± 0.01
R_{se} [m ² .K/W]	0,15 ± 0.003

Tableau V. 1 : Coefficients d'échange convectif à la surface des parois intérieure (R_{si}) et extérieure (R_{se}) (Othmen 2015)

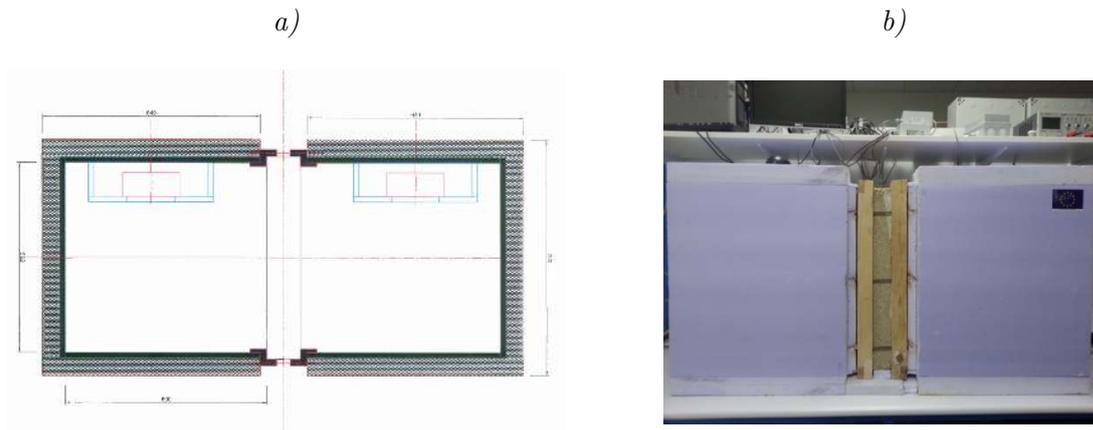


Figure V. 6 : Cellule biclimatique a) coupe Auto CAD b) vue in-situ (Othmen 2015)

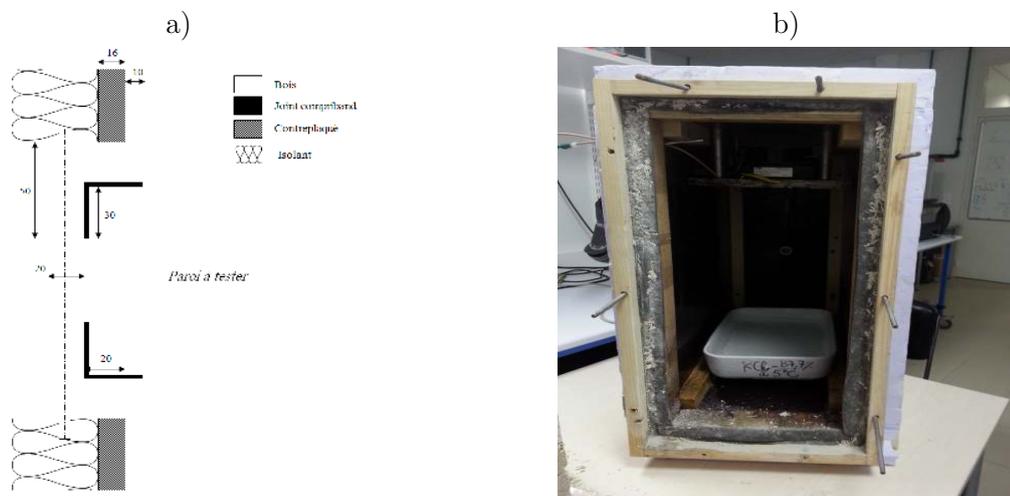


Figure V. 7 : Détail d'étanchéité au niveau de l'emplacement de la paroi a) schéma de principe et b) photo in situ (Othmen 2015)

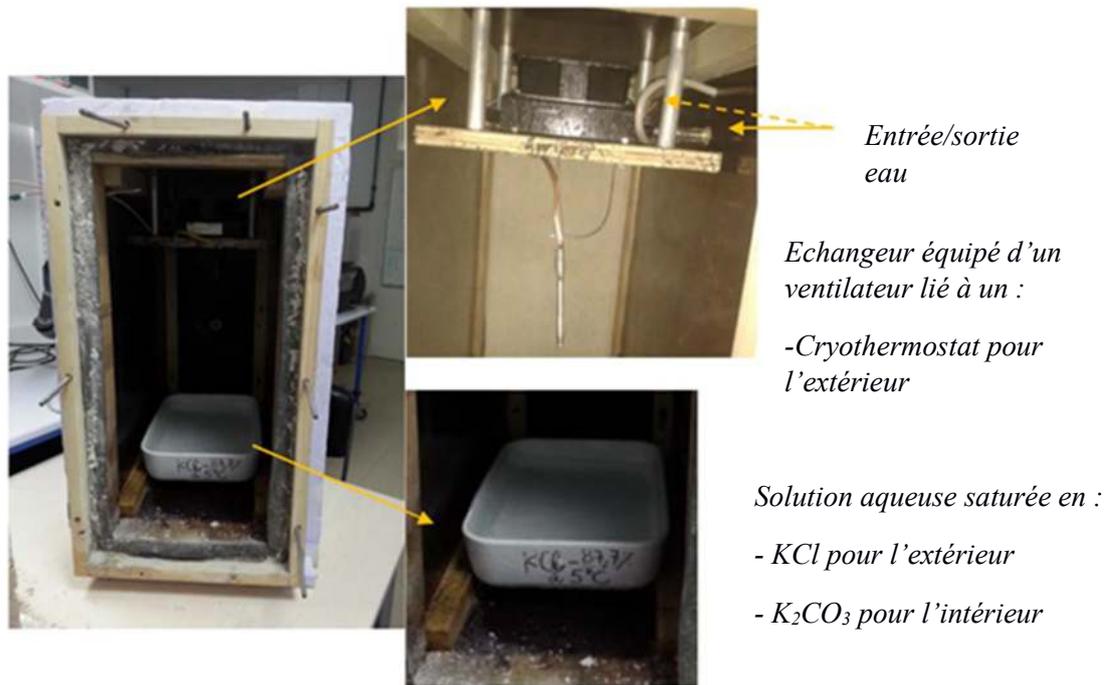


Figure V. 8 : Photo du principe de génération de température et d'humidité relative

2.3. Acquisition des données

2.3.1. Système d'acquisition

Afin de suivre les variations de température et d'humidité relative dans les parois testées, nous avons utilisé des capteurs hygrométriques commercialisés de Rotronic qui délivrent un signal en tension de 0 à 1 V. Elle correspond à une acquisition de température de -30°C à 70°C et une humidité relative de 0% à 100%. Les incertitudes de mesure suivant le fabricant sont de 0,3°C pour la température et de 1% pour l'humidité relative.

Les sondes sont placées en différentes positions dans les caissons et dans la paroi testée. Deux sondes sont placées dans les deux ambiances pour vérifier les conditions aux limites imposées. D'autres sondes sont placées à la surface et au centre de la paroi testée comme l'indique la Figure V. 9

Les capteurs sont alimentés sous une tension de 10V et l'acquisition est réalisée par LabView (National Instrument).



Figure V. 9 : Photo de la brique comportant des sondes placées au milieu de la paroi

2.3.2. Diminution du bruit de mesure

L'acquisition des signaux de température et d'humidité relative en différentes positions est faite toutes les minutes. Face à un nombre considérable de points de mesure et tenant compte de l'incertitude de mesure de chaque sonde, les profils temporels de l'évolution de température et d'humidité relative sont souvent très bruités. Il est donc nécessaire de réduire cette erreur de mesure en procédant à un lissage ne modifiant pas la forme générale de la courbe de mesure. Pour cela, un lissage des données expérimentales faisant intervenir le développement des fonctions en séries de Taylor est développé sous *Matlab*. On rappelle dans la Relation V. 1 le développement de Taylor d'une fonction f à l'ordre n :

$$f(x + \alpha dx) = f(x) + \frac{\alpha dx}{1!} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{(\alpha dx)^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{(\alpha dx)^3}{3!} \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \dots + \frac{(\alpha dx)^n}{n!} \frac{\partial^n f}{\partial x^n} + O((\alpha dx)^{n+1}) \quad \text{Relation V. 1}$$

Cette expression peut être écrite pour tout point situé à proximité du point x et est générale. Pour déterminer la valeur de la fonction f en fonction de ses valeurs aux points $x+dx$ et $x-dx$, il suffit de faire la moyenne des deux expressions de f au voisinage de x (Relation V. 2)

$\check{f}(x) = \frac{f(x-dx) + f(x+dx)}{2} + O(dx^2)$	<i>Relation V. 2</i>
Tel que :	
$f(x+dx) = f(x) + \frac{dx}{1!} \frac{\partial f}{\partial x} + O(dx^2)$	
$f(x-dx) = f(x) - \frac{dx}{1!} \frac{\partial f}{\partial x} + O(dx^2)$	

La valeur de x n'est autre que la moyenne de la fonction à l'emplacement de ses plus proches voisins et elle n'est valable que pour l'ordre 1. Mais pour établir une expression valable pour un ordre supérieur, Poullain a établi le poids des voisins de x à prendre en fonction du nombre de points utilisé pour l'estimation de la fonction (voir Tableau V. 2) [5]. Cette conclusion met l'accent sur l'importance d'utiliser un grand nombre de point pour mieux estimer la valeur au point x mais également la forme de la fonction dans le voisinage de x [2]. On remarque que plus les points utilisés sont proches du point où la fonction est calculée, plus leur poids est important.

Par exemple, la valeur de la fonction au point x si on choisit un développement à l'ordre 2 faisant intervenir les 4 plus proches voisins de x est :

$$f(x) = \frac{-f(x-2dx) + 4f(x-dx) + 4f(x+dx) - f(x+2dx)}{6}$$

	$f(x-4dx)$	$f(x-3dx)$	$f(x-2dx)$	$f(x-dx)$	$f(x)$	$f(x+dx)$	$f(x+2dx)$	$f(x+3dx)$	$f(x+4dx)$
1 point				1					
2 points			1/2	0	1/2				
4 points			-1/6	4/6	0	4/6	-1/6		
6 points		1/20	-6/20	15/20	0	15/20	-6/20	1/20	
8 points	-1/70	8/70	-25/70	56/70	0	56/70	-25/70	8/70	-1/70

Tableau V. 2 : Poids des voisins de x [2]

Pour améliorer le résultat du lissage, on peut effectuer plusieurs passages et faire intervenir un facteur de relaxation (α), de sorte que :

$$f^{(N+1)} = \alpha f^{(N)} + (1 - \alpha)f^{N+1}$$

Relation V. 3

où $f^{(N+1)}$ et $f^{(N)}$ sont la fonction f après $N+1$ passages et N passages et α est le facteur de relaxation. Au premier passage de la fonction de lissage $f^{(N)}$ n'est autre que la valeur de la fonction mesurée au point x . Cette valeur n'est donc pas totalement oubliée par le lissage.

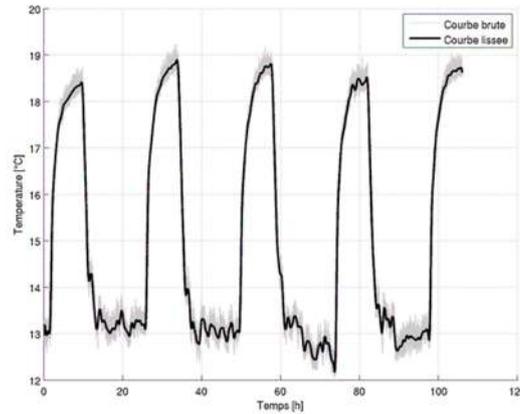


Figure V. 10 : Comparaison entre les données brutes mesurées à l'aides des sondes hygrothermiques et les données lissées par la procédure de lissage à l'ordre 2 présentées plus haut – Résultat pour 100 passages

La Figure V. 10 représente le résultat du lissage d'une courbe expérimentale bruitée. Le lissage à l'ordre 2 a été appliqué pour 100 passages (applications successives de la procédure de lissage). On remarque une bonne adéquation entre les données brutes et les données lissées avec une réduction significative du bruit de mesure sans modification de la forme générale du signal brut. Dans la suite de ce chapitre, les données expérimentales analysées seront préalablement lissées à l'aide de cette procédure. Le bruit de mesure correspond à des fluctuations de haute fréquence et sont donc caractérisées par une période très courte et par conséquent très inférieure à la période des signaux que l'on imposera à la paroi. Le lissage de ces fluctuations de haute fréquence n'aura donc qu'une influence minimale sur la détermination des paramètres dynamiques des parois.

2.4. Inter-corrélation de signaux

Le traitement des données expérimentales vise à déterminer les caractéristiques thermiques dynamiques des différentes parois traitées, à savoir le déphasage (ou décalage temporel) et l'atténuation (ou facteur d'amortissement).

La détermination de l'atténuation de la paroi est entreprise en faisant le rapport des amplitudes des signaux extérieur et intérieur. Cette détermination est identique à celle que l'on peut rencontrer dans d'autres méthodes de la littérature.

Le déphasage en revanche est déterminé grâce au calcul de la fonction d'inter-corrélation $I(\tau)$ des signaux intérieurs et extérieurs. La définition mathématique de la fonction d'inter-corrélation de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ est la suivante :

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt$$

Lorsque les signaux sont périodiques et de même période, la fonction d'inter-corrélation présente une série de pics d'intensité croissante puis décroissante dont le décalage temporel correspond à la période principale du signal. La position du pic de plus forte intensité par rapport à $\tau = 0$ correspond au décalage temporel entre les deux signaux. La Figure V. 11 représente différentes fonctions d'inter-corrélation calculées pour différents couples de signaux. La Figure V. 11-a) correspond à des signaux de même période et la Figure V. 11-b) correspond à des signaux de périodes différentes. On remarque que les fonctions d'inter-corrélation pour les signaux de même période présentent des pics dont l'espacement correspond à la période des signaux.

Sur la Figure V. 11-a), les signaux présentent un pic principal dont la position par rapport à la valeur $\tau = 0$ correspond au déphasage entre les deux signaux inter-corrélés. La Figure V. 12 est un agrandissement des fonctions à proximité de $\tau = 0$ permettant d'identifier les déphasages entre les signaux. La courbe noire est obtenue pour des signaux en phase et le pic est situé en $\tau = 0$. La courbe grise est obtenue pour des signaux déphasés de $\pi/2$ et le pic se situe à la valeur $\tau = 1,57rad = \pi/2$.

La méthode d'inter-corrélation sera appliquée pour déterminer les déphasages entre les signaux mesurés dans la cellule biclimatique et évaluer les propriétés de déphasage thermique des parois. Ceci est possible puisque les signaux imposés et résultant de la sollicitation par des échelons ont la même période. En effet, la paroi ne modifie pas cette période.

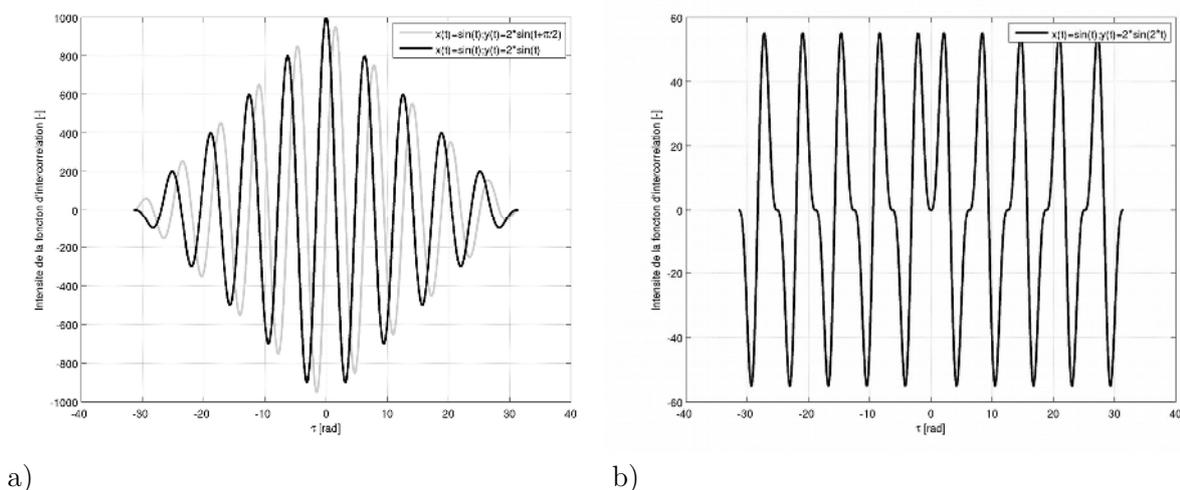


Figure V. 11 : Exemple de fonction d'inter corrélation pour a) des signaux périodiques de même période – b) des signaux périodiques de période différente

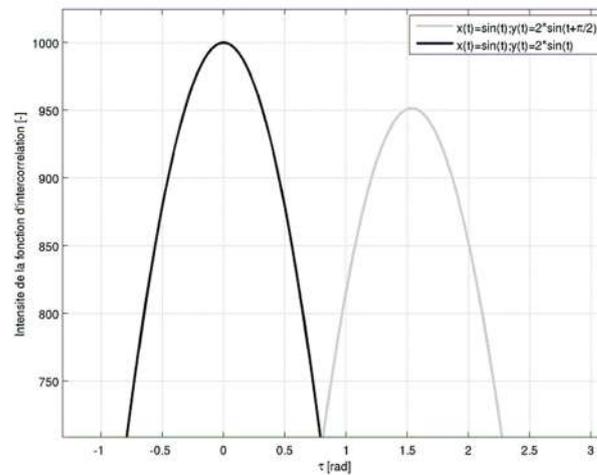


Figure V. 12 : Agrandissement des courbes de la figure V.9-a) montrant le déphasage de $\pi/2$ entre les signaux $x(t)$ et $y(t)$ dans le cas de la courbe grise et de 0 dans le cas de la courbe noire

Les fonctions d'inter-corrélation seront déterminées numériquement, l'équation présentée ci-dessus définissant la fonction d'inter-corrélation n'est donc pas utilisée directement. Le calcul de la fonction est fait numériquement par la relation :

$$I(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)y(m-n) \text{ avec } n \in [0, M+N-1]$$

où M et N correspondent respectivement au nombre de valeurs contenues dans les signaux x et y .

2.5. Signaux de température

La Figure V. 13 représente les évolutions temporelles de la température de consigne de l'eau du cryothermostat et la température de la partie froide de la cellule biclimatique. On remarque que les échelons de température imposés par la circulation d'eau en provenance du cryothermostat dans l'échangeur de la partie froide de la cellule biclimatique entraînent bien une variation de la température de ce compartiment. Du fait de l'efficacité de l'échangeur censé refroidir l'air du compartiment froid, des apports de chaleur par les parois de la cellule et par la paroi étudiée, la température la plus basse atteinte est de 12°C et la température la plus haute est de 18°C . Les échelons réels correspondant à la sollicitation thermique de la paroi se développent donc entre ces deux températures extrêmes.

De plus, les sollicitations thermiques de la paroi suivent bien une période de 24h avec un démarrage des cycles de refroidissement et de chauffage en phase avec les échelons imposés. Cependant, on n'obtient pas de véritables échelons de température dans le compartiment froid du fait de la trop faible puissance de l'échangeur de chaleur et de l'inertie thermique du

cryothermostat aussi bien que du compartiment froid. Comme la période qui nous intéresse est une période de 24h (période principale du signal), ce type de sollicitation est suffisant.

C'est ce type de signal, et non le signal échelon périodique parfait, qui sera donc utilisé pour solliciter les parois étudiées.

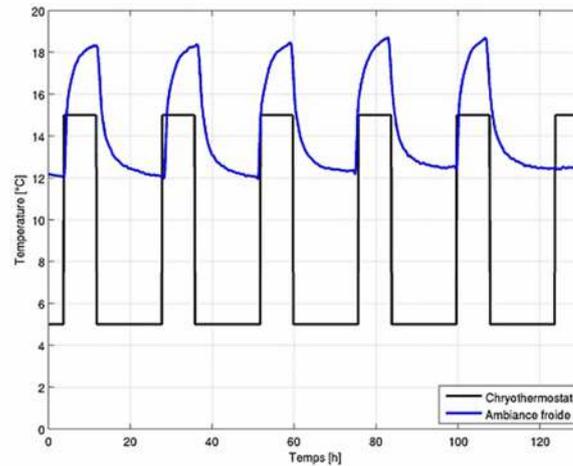
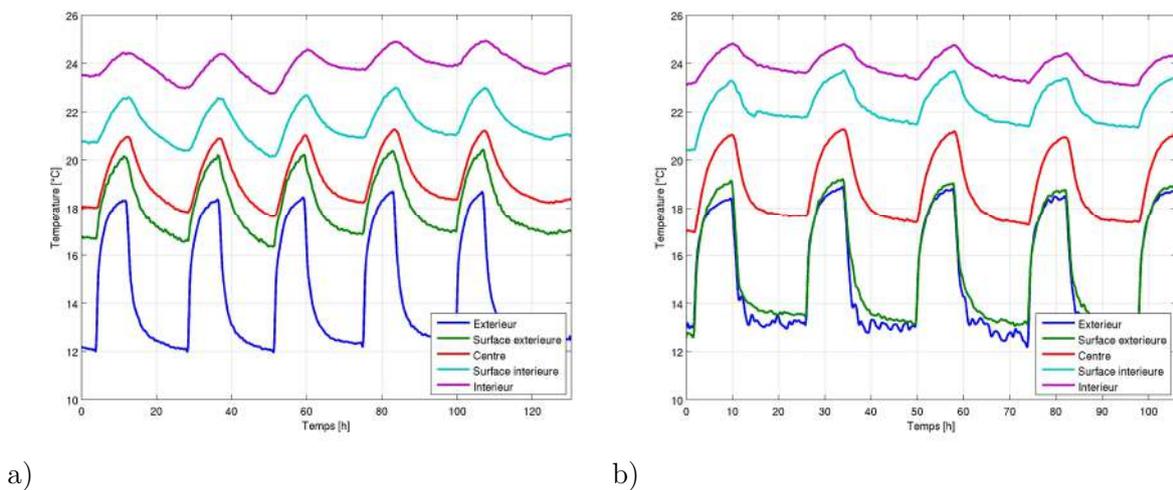


Figure V. 13 : Évolutions de la température de l'eau du cryothermostat et de la température dans la partie froide de la cellule biclimatique

2.5.1. Évolutions temporelles de la température

Les graphes de la Figure V. 14 représentent les évolutions temporelles des températures mesurées durant l'application des cycles en différents points de la cellule biclimatique pour différentes formulations de BTC (terre seule, terre fibre, et terre fibre ciment laitier).



a)

b)

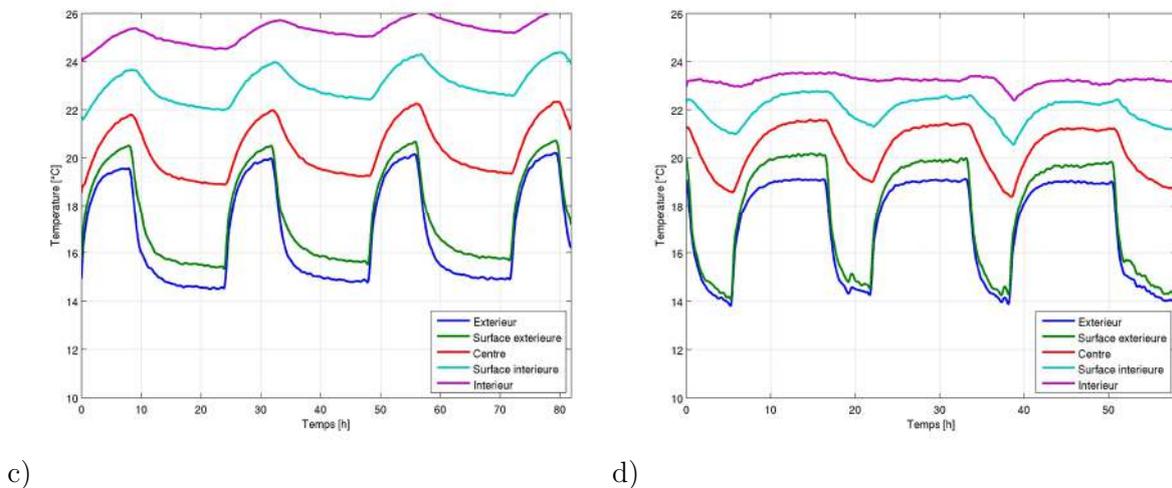


Figure V. 14 : Evolution des températures en différents points de la cellule biclimatique – a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

Comme évoqué plus haut, la sollicitation dans le compartiment froid sont des quasis échelons de température s'étalant entre 12°C et 18°C avec une période principale de 24h.

Les températures en différents points de la cellule sont ordonnées conformément à la direction du flux de chaleur, avec des températures de plus en plus élevées à l'approche du compartiment chaud de la cellule. On remarque cependant que les températures sur la surface extérieure de la paroi sont quelquefois très proches (moins de 0,2°C) de la température extérieure. Ceci est dû au fait que la sonde peut ne pas être en contact direct avec la paroi du fait d'un collage imparfait contre la paroi. Ceci est particulièrement vrai pour la paroi de BTC contenant des fibres et du ciment (Figure V. 14-b) et des fibres (Figure V. 14-c).

La détermination des propriétés dynamiques de la paroi se basera par conséquent sur la température extérieure plutôt que sur la température de la surface extérieure de la paroi. On obtiendra alors des paramètres dynamiques tenant compte de l'effet de la couche limite thermique à la surface de la paroi. Ceci pourra entraîner une légère surestimation de l'atténuation, mais sera sans effet notable sur le déphasage dans la mesure où la couche d'air à la surface de la paroi est supposée sans capacité de stockage de la chaleur conformément aux hypothèses de la norme NF EN ISO 13786.

On peut noter également que les températures dans le compartiment chaud de la cellule sont en évolution pour certaines formulations, ce qui montre que la durée de la sollicitation limitée à 4 cycles de chauffage/refroidissement, n'est pas suffisante pour atteindre le régime établi d'oscillations entretenues. Ceci est particulièrement vrai pour la température intérieure dans le cas des BTC fibrés, pour lesquelles même à l'issue de 4 cycles de 24h, les variations au cours du temps présentent des oscillations autour d'une courbe en évolution. Ceci peut

entraîner un biais dans la détermination de l'atténuation et du déphasage de la paroi. Pour éviter ce biais, il serait nécessaire de contrôler la mise en place du régime établi et de réaliser les analyses sur au moins 4 cycles de ce régime établi. La nécessité d'étudier plusieurs formulations dans un temps très restreint nous a contraints à ne pas attendre le régime établi pour les mesures. En effet, le passage d'un échantillon nécessite une première période de mise à l'équilibre de 15 jours suivie d'une sollicitation cyclique durant 4 jours, soit 20 jours au total en comptant la mise en place de la paroi. L'influence du fait que l'on n'a pas attendu le régime établi pour l'analyse des données n'a pas fait l'objet, pour le moment, d'étude d'influence sur la qualité des paramètres dynamiques, mais sera nécessaire à l'avenir.

L'observation des évolutions temporelles de la température montre que l'amplitude des fluctuations de température décroît en fonction de la proximité au compartiment chauffé. L'atténuation des amplitudes est due à l'inertie thermique de la paroi. On remarque que l'atténuation est plus faible pour la paroi de terre seule et est la plus élevée pour les BTC contenant des fibres, et ce quel que soit le liant utilisé. On peut donc en conclure que l'ajout de fibres végétales permet d'augmenter l'atténuation de la paroi.

L'inertie de la paroi entraîne également un décalage temporel entre la sollicitation et le signal en résultant. Ce décalage est difficile à déterminer par la seule observation des signaux du fait de sa faible valeur. L'analyse réalisée dans la partie suivante à partir de la détermination des fonctions d'inter-corrélation des signaux permettra de quantifier ce décalage temporel.

2.6. Signaux liés à l'humidité relative

La Figure V. 15 présente l'évolution de l'humidité relative en différents points de la cellule biclimatique pour les différentes formulations testées.

2.6.1. Sollicitation réelle

On remarque que l'humidité relative dans les compartiments chaud et froid n'est pas constante et que par conséquent les solutions salines saturées ne parviennent pas à réguler l'humidité relative lorsqu'on fait varier les températures. L'absorption ou la libération de vapeur d'eau par les solutions salines est un phénomène trop lent pour permettre une régulation fine de l'humidité relative et une réaction rapide aux variations de température. Lorsque la température de l'eau circulant dans l'échangeur du compartiment froid est fixée à 15°C, l'humidité relative parvient toutefois à atteindre les 88 % requis au bout de 8h.

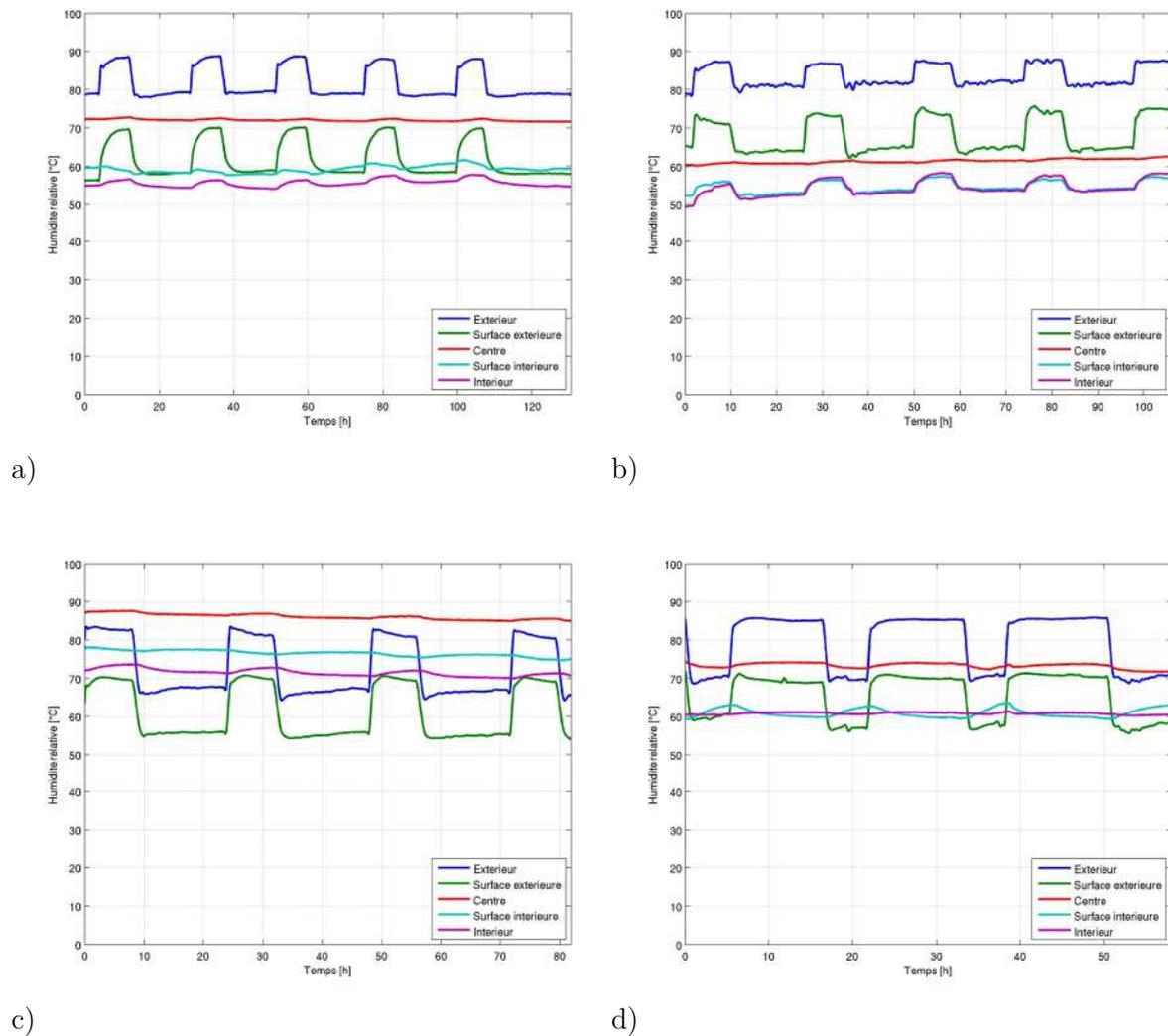


Figure V. 15 : Evolution des humidités relatives en différents points de la cellule biclimatique –
 a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

En revanche, lorsque la température de l'eau de circulation est fixée à 5°C durant les cycles de refroidissement, deux phénomènes entrent en compétition : la régulation de l'humidité relative à 88 % par la solution saline et la déshumidification d'air due à la température de surface de l'échangeur. En effet, lorsque la température de l'eau de circulation est fixée à 15°C, la température de l'air est de 18°C pour une humidité relative de 88 %. Ces conditions correspondent à :

- une pression de vapeur à saturation de 2062 Pa,
- une pression de vapeur de 1815 Pa,
- une température de rosée de l'air de 16°C.

Or la température de surface de l'échangeur est de l'ordre de 15°C, il se produit donc une déshumidification de l'air à une vitesse dépendant de la puissance de l'échangeur. Le taux de

déshumidification est ici suffisamment faible pour permettre à la solution saline de maintenir une humidité relative de 88 %. En revanche, au moment de la modification de la température de l'eau de circulation à 5°C, la température de surface de l'échangeur chute brutalement entraînant une forte déshumidification de l'air à une vitesse ne permettant pas à la solution saline de maintenir l'humidité relative. Ainsi, la sollicitation de la paroi par des cycles de température entraîne également des cycles d'humidité relative. Ceci montre qu'une réflexion doit être menée afin d'améliorer le système de régulation de l'humidité relative dans les deux compartiments.

2.6.2. Évolutions temporelles

Comme pour les températures, on remarque que les évolutions de l'humidité relative en différents points de la paroi suivent des oscillations dont les périodes sont toutes identiques et correspondent à la période principale de la sollicitation de 24h. Les amplitudes de ces oscillations sont d'autant plus importantes pour les capteurs placés près du compartiment froid où les variations de température et donc d'humidité relative sont imposées. Le fait que les oscillations soient de plus faible amplitude dans le compartiment chaud traduit l'atténuation hydrique occasionnée par la paroi.

L'humidité relative au centre de la paroi est quasiment constante quelle que soit la paroi étudiée, avec cependant quelques oscillations de faible amplitude autour de la moyenne. Cette humidité relative varie en fonction de la formulation étudiée.

2.7. Pression de vapeur

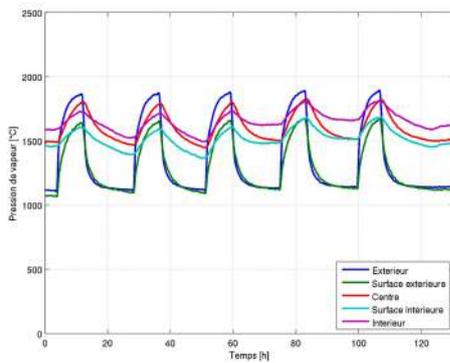
L'humidité relative mesurée n'est pas le potentiel de transfert de la vapeur d'eau. La détermination des déphasages et atténuations hydriques des parois doit donc être réalisée sur les évolutions temporelles des pressions de vapeur. La pression de vapeur est en effet le potentiel de transfert de la vapeur d'eau.

Les évolutions de la pression de vapeur traduisent mieux les transferts de vapeur car celle-ci est transférée des zones de forte pression de vapeur aux zones de faibles pressions de vapeur. On peut observer que, contrairement aux courbes de températures, les courbes de pression de vapeur (Figure V. 16 a-b-c-d) ne sont pas ordonnées du compartiment froid vers le compartiment chaud. Ceci signifie que le transfert de vapeur peut se faire dans des directions différentes contrairement au transfert de chaleur qui s'effectue toujours du compartiment chaud vers le compartiment froid. Lorsque la température dans le compartiment froid est élevée (durant les 8 premières heures d'un cycle), la pression de vapeur évolue d'une valeur basse dans le compartiment froid vers une valeur haute, ce qui signifie que le sens du transfert de vapeur s'inverse au cours de cette partie du cycle. Elle est dans un premier temps transférée de l'intérieur vers l'extérieur, puis la pression de vapeur devient plus importante dans le compartiment froid ce qui entraîne l'inversion du transfert de vapeur de l'extérieur vers

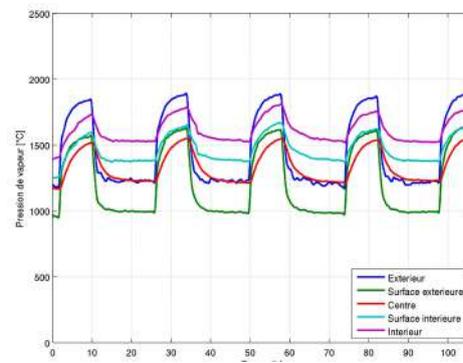
l'intérieur. Dès que la température chute dans le compartiment froid (au départ de la période froide de 16h), le gradient de pression de vapeur s'inverse et la vapeur est alors transférée du chaud vers le froid. Ceci peut être observé sur tous les cycles représentés.

Si on analyse plus finement les courbes durant la période de refroidissement, on remarque que la pression de vapeur à la surface extérieure de la paroi est quelquefois plus faible que les pressions de vapeur dans le compartiment froid et au centre de la paroi. Ceci indique que le transfert de vapeur s'effectue du centre de la paroi vers la surface extérieure et de l'extérieur vers la surface extérieure. Il en résulte donc une accumulation de vapeur dans une couche de matériau comprise entre le centre et la surface extérieure. Cette accumulation de vapeur est alimentée par la vapeur provenant du compartiment intérieur, puisqu'on remarque que la pression de vapeur y est alors plus élevée qu'à la surface intérieure et qu'au centre de la paroi.

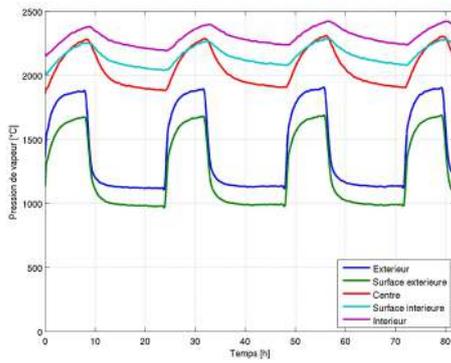
En revanche, durant la période de réchauffage, la pression de vapeur est plus élevée dans le compartiment froid et à la surface extérieure qu'au centre. La zone qui a accumulé la vapeur durant la phase de refroidissement perd alors de la vapeur au profit d'une zone se décalant vers le compartiment chaud. Ce comportement de la paroi vis à vis du transfert de vapeur (comparé au comportement au transfert de chaleur) traduit la complexité du phénomène de transfert de vapeur et les couplages importants qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert de vapeur.



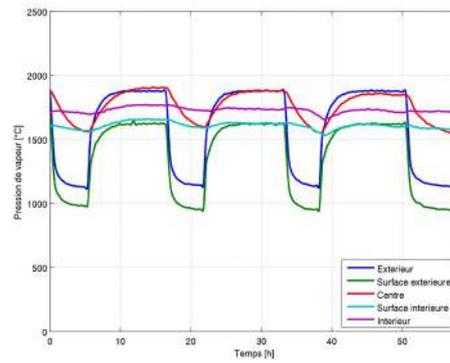
a)



b)



c)



d)

Figure V. 16 : Evolution des pressions de vapeur en différents points de la cellule biclimatique – a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

2.8. Représentation spatiale

Pour mieux visualiser la répartition spatiale de la pression de vapeur à l'intérieur de la cellule, on représente sur la Figure V. 17 les évolutions en fonction de la position dans la paroi pour différents instants répartis entre 5 et 25h. La représentation prend en compte les phases de réchauffage et de refroidissement. L'encart sur chaque graphe représente l'évolution de la sollicitation thermique dans le compartiment froid et permet de connaître les instants correspondant à chaque courbe.

La pression de vapeur subit de très faibles variations dans le compartiment chaud et des variations plus importantes dans le compartiment froid. Durant les phases de refroidissement, la pression de vapeur diminue globalement dans la paroi, ce qui dénote une diminution de la teneur en eau du matériau et donc une désorption de l'eau adsorbée à la surface des pores. Cette eau désorbée se retrouve sur forme de vapeur et se dirige alors vers le compartiment froid où la pression de vapeur est plus faible. Durant les phases de réchauffage en revanche, la pression de vapeur extérieure augmente rapidement et peut même dépasser la pression de vapeur intérieure. Un flux de vapeur dirigé de l'extérieur vers l'intérieur apparaît alors qui entraîne l'augmentation de la pression de vapeur dans la paroi et donc une augmentation de la teneur en eau du matériau. Cette augmentation est due à l'adsorption de la vapeur d'eau sur la paroi des pores.

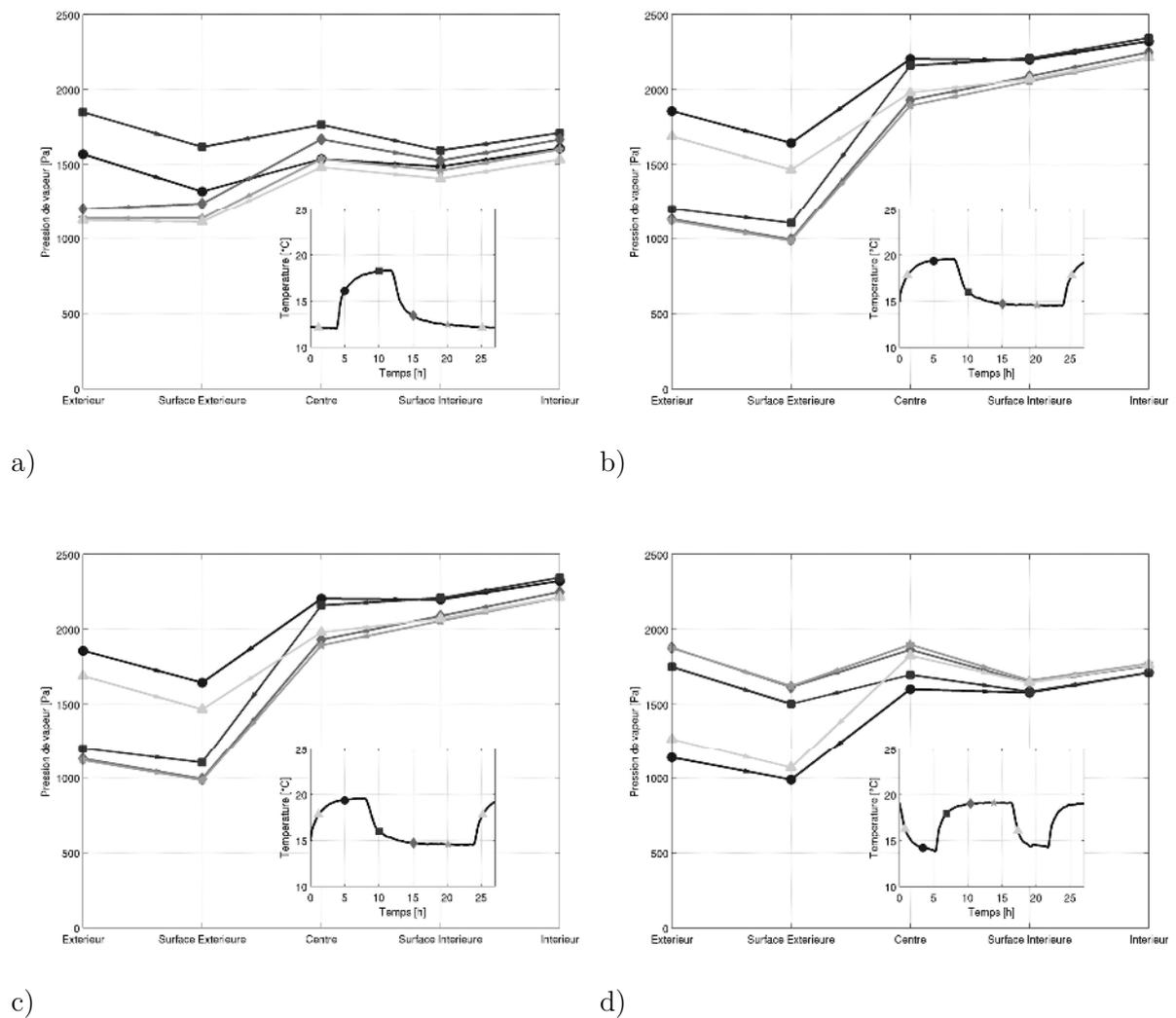


Figure V. 17 : Représentation spatiale des pressions de vapeur dans la paroi pour différents instants du cycle – l’encart permet de connaître les instants représentés – les flèches sur les segments de droite indiquent le sens du flux de vapeur a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

On peut remarquer sur la Figure V. 17-b, que les pressions de vapeur à l’instant $t=5h$, sont plus élevées à l’intérieur et à l’extérieur qu’au centre de la paroi. L’augmentation de la teneur en eau du matériau est donc due à un apport de vapeur d’eau depuis les deux compartiments situés de part de d’autre de la paroi.

Les flèches représentées sur les segments de droite des graphes de la Figure V. 17 indiquent la direction du flux de vapeur. Elles montrent que globalement, le flux de vapeur est dirigé des compartiments vers la paroi.

2.9. Détermination du déphasage et de l'atténuation

2.9.1. Thermique

Les graphes représentés sur la Figure V. 18 représentent les fonctions d'inter-corrélation obtenues pour les quatre parois testées. Elles présentent une série de pics successifs distants de 24h, traduisant la période des sollicitations imposées aux parois dans la cellule biclimatique. La position du pic le plus élevé peut être utilisée afin de déterminer le décalage temporel et par conséquent le déphasage occasionné par la paroi. Sur les graphes, ces positions sont matérialisées par un point noir. Les encarts de chaque figure sont des agrandissements de la zone proche du pic principal.

Le Tableau V. 3 répertorie les déphasages et atténuations déterminés à partir des mesures et permettent de comparer les différentes parois entre elles. L'ordre de grandeur du déphasage thermique pour la période de 24h est de 1h, avec des valeurs s'échelonnant entre 0,95h et 1,15h.

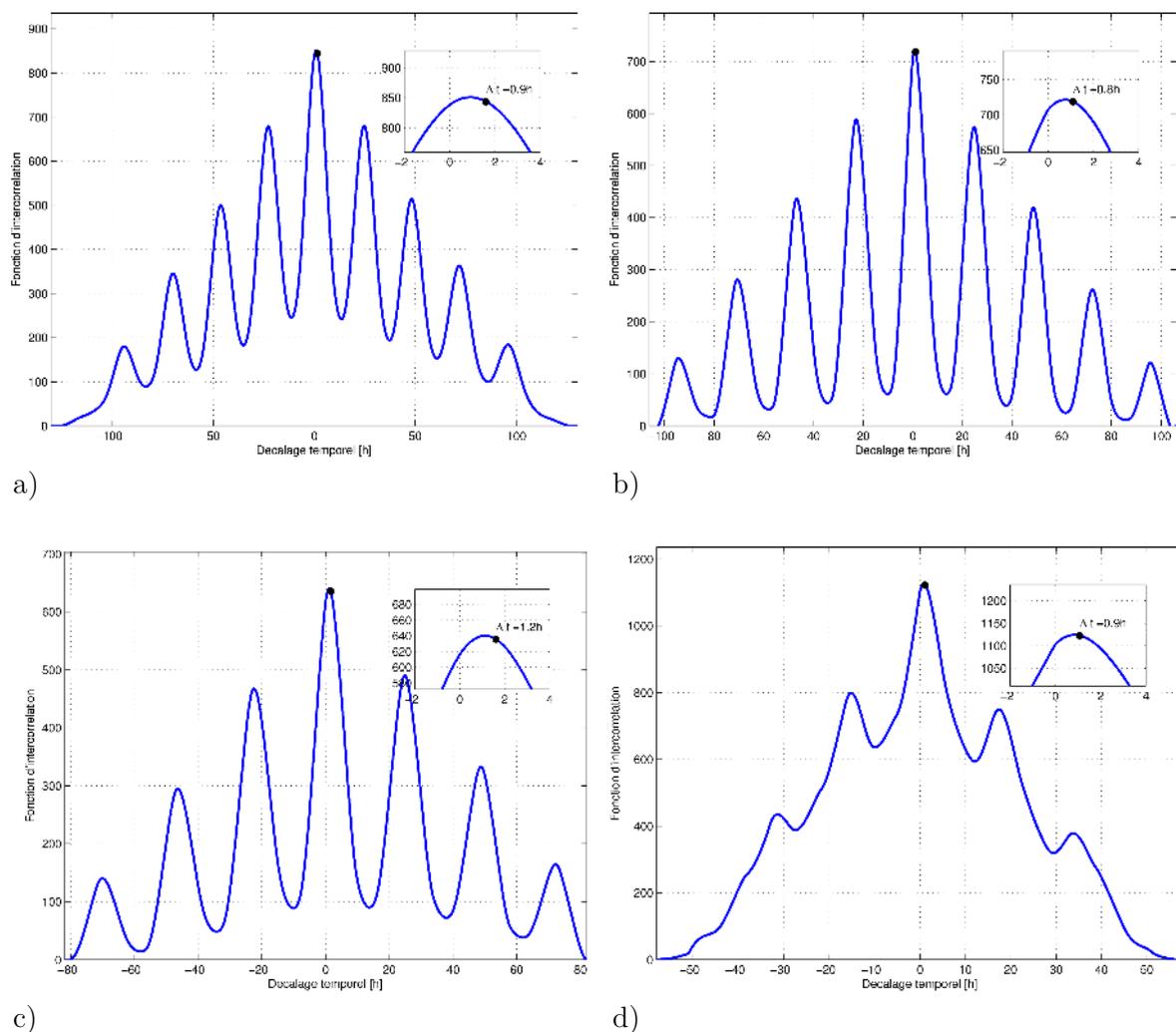


Figure V. 18 : Fonctions d'inter-corrélation obtenues à partir de l'évolution temporelle des températures sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi de BTC : a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

La position du pic d'inter-corrélation de la fonction permet de déterminer directement le déphasage en heure. Le facteur d'amortissement est obtenu à partir du rapport entre l'amplitude des fluctuations des températures sur les surfaces extérieure et intérieure de la paroi

Formulation	Déphasage	Atténuation
Terre	0,95 h	1,19
Terre Fibre	1,15 h	1,72
Terre Fibre Ciment	0,80 h	1,58
Terre Fibre Ciment Laitier	0,90 h	2,24

Tableau V. 3 : Déphasage et atténuation thermiques des différentes parois

Les déphasages calculés pour une période de 24h montrent que ceux-ci sont de l'ordre de 1h, ce qui est relativement faible, mais il ne faut pas oublier que l'épaisseur des parois est relativement faible.

Les valeurs présentées permettent cependant de comparer les différentes formulations entre elles. Globalement, il n'existe pas de différences importantes entre les formulations excepté pour la formulation terre-fibre, pour laquelle le déphasage est près de 20 % supérieur au déphasage obtenu pour la terre seule. Ceci peut être attribué à l'effet de l'ajout de fibres végétales qui diminue la conductivité thermique du matériau. Pour schématiser le concept d'inertie thermique, dont le déphasage est l'un des indicateurs, on peut dire qu'elle résulte d'une compétition entre les propriétés de transfert de la chaleur du matériau et les propriétés de stockage de la chaleur. Une diminution de la conductivité thermique entraîne donc une augmentation du déphasage.

On remarque cependant que l'ajout de fibres n'est pas une condition nécessaire à l'amélioration du déphasage puisque les formulations contenant des fibres mais liées au ciment ou au ciment-laitier présentent des déphasages plus faibles que pour la terre seule. Ceci peut être dû au fait que l'ajout d'un liant hydraulique diminue la porosité du matériau et par conséquent augmente sa conductivité thermique. L'effet de l'ajout des fibres est donc réduit du fait du rôle prépondérant du liant sur l'évolution de la porosité.

L'influence de la formulation des BTC sur l'atténuation du matériau est différente puisqu'il apparaît que l'atténuation la plus forte est obtenue pour la formulation contenant un liant mixte ciment-laitier. Les atténuations déterminées ici sont comprises entre 1,19 et 2,24. Il existe donc des différences importantes. Les BTC terre fibrée entraînent une atténuation importante avec une valeur 45 % supérieure à la valeur obtenue avec la terre seule. Ce résultat confirme l'effet des fibres sur l'inertie thermique de la paroi et sur la qualité des BTC vis à vis de la régulation de la température.

2.9.2. Hydrique

Les graphes représentés sur la Figure V. 19 représentent les fonctions d'inter-corrélation obtenues pour les trois parois testées. Elles présentent une série de pics successifs distants de 24h, traduisant la période des sollicitations imposées aux parois dans la cellule biclimatique. La position du pic le plus élevé peut être utilisée afin de déterminer le décalage temporel et par conséquent le déphasage occasionné par la paroi. Sur les graphes, ces positions sont matérialisées par un point noir. Les encarts de chaque figure sont des agrandissements de la zone proche du pic principal.

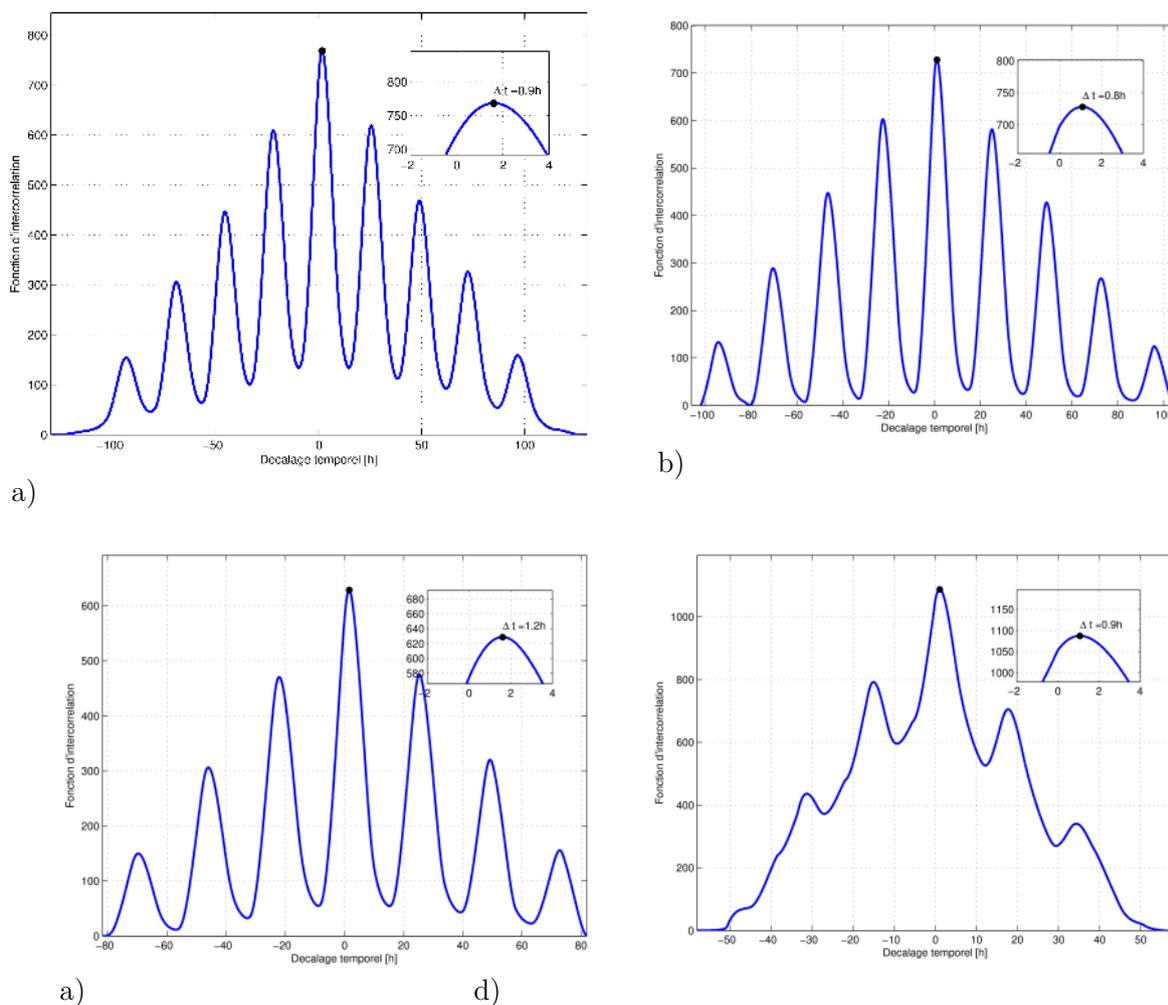


Figure V. 19 : Fonctions d'inter-corrélation obtenues à partir de l'évolution temporelle des pressions de vapeur sur les surfaces intérieure et extérieure de la paroi de BTC : a) Terre seule – b) Terre Fibre Ciment – c) Terre Fibre – d) Terre Fibre Ciment Laitier

Le Tableau V. 4 répertorie les déphasages et atténuations déterminés à partir des mesures et permettent de comparer les différentes parois entre elles. L'ordre de grandeur du déphasage thermique pour la période de 24h est de 1h, avec des valeurs s'échelonnant entre 1,13h et 1,64h

Formulation	Déphasage	Atténuation
Terre	1,63 h	1,69
Terre Fibre	1,64 h	1,75
Terre Fibre Ciment	1,13 h	1,99
Terre Fibre Ciment Laitier	1,10 h	2,05

Tableau V. 4 : Déphasage et atténuation hydriques des différentes parois

Il apparaît clairement que les déphasages hydriques sont fortement diminués par l'ajout d'un liant dans le matériau puisque les valeurs obtenues pour ces formulations sont de l'ordre de 1,1 h, c'est à dire près de 33 % inférieures aux déphasages des formulations non liées. L'ajout d'un liant limite donc les capacités du matériau à déphaser dans le temps les fluctuations de l'humidité extérieure. En revanche, l'ajout de liant permet d'augmenter l'atténuation puisqu'on note une augmentation comprise entre 18 % et 21 % par rapport à l'atténuation de la terre seule.

Les valeurs obtenues, aussi bien pour le déphasage que pour l'atténuation, sont quasiment identiques pour la terre seule que pour la terre additionnée de fibres végétales. Les différences observées ne sont pas significatives au regard de la précision sur la détermination du déphasage.

Les valeurs obtenues pour les terres liées sont également très proches les unes des autres, ce qui dénote un comportement identique vis à vis des sollicitations hydriques cycliques.

3. Conclusion

Ce chapitre a présenté d'une part l'étude de la résistance mécanique des blocs de maçonnerie formulés à partir des meilleures formulations obtenues à partir de l'étude des éprouvettes 4*4*16 cm³ et d'autre part l'étude du comportement hygrothermique sous sollicitations cycliques de différentes parois constituées de BTC.

Les résistances à la compression et à la flexion des briques sont améliorées par la stabilisation aux liants et par le renfort par les fibres comme dans le cas des éprouvettes 4*4*16 cm³ issus des mêmes formulations.

Les ont permis de .

L'analyse des signaux issues des mesures réalisées en chambre biclimatique, à l'aide d'une méthode d'inter-corrélation a permis de caractériser les comportements hydriques et thermiques des différents matériaux en termes de leurs effets sur le déphasage et l'atténuation lors de sollicitations cycliques de 24h, correspondant aux variations quotidiennes de la température. Les résultats montrent que l'ajout d'un liant diminue le déphasage et augmente l'atténuation du matériau.

L'effet de l'ajout de fibres végétales sur les inerties thermique et hydrique de la paroi est un point intéressant et il est nécessaire de mieux comprendre le rôle de ces ajouts. Ceci pourrait

être étudié en testant différentes formulations de BTC dans des conditions identiques, mais en variant la quantité de fibres afin de comprendre comment les fibres augmentent les déphasages et l'atténuation par rapport à la terre seule. Ces essais permettraient de tracer des courbes d'évolution du déphasage et de l'atténuation en fonction de la teneur en fibres.

Cependant, la compréhension fine des phénomènes de transfert de chaleur et de vapeur dans le matériau terre au moyen de la cellule biclimatique développée par Othmen et utilisée dans ce travail nécessiterait de pouvoir découpler ces phénomènes. Des améliorations sur la cellule devraient être apportées, notamment pour améliorer la régulation de l'humidité dans le compartiment froid. En effet que le refroidissement à l'aide d'un échangeur de chaleur à eau glacé entraîne une diminution de l'humidité relative de l'air dans le compartiment froid car la température de surface de l'échangeur est inférieure à la température de rosée de l'air. De plus, l'utilisation des solutions salines saturées pour réguler l'humidité devrait être abandonnée car le temps de réaction des solutions est trop long pour permettre d'atteindre rapidement les humidités souhaitées. Une meilleure régulation de l'humidité en termes d'écart à la consigne et de rapidité des phases transitoires permettrait d'étudier plus précisément et en les découplant les phénomènes de transfert de la chaleur et de la vapeur d'eau.

Dans ce travail de thèse, les efforts se sont principalement portés sur les propriétés mécaniques des BTC et sur les paramètres de formulation et de réalisation qui influencent ces propriétés. L'étude du comportement hygrothermique dynamique est une première approche de ce comportement. D'autres essais de caractérisation n'ont pas pu être menés comme la mesure des propriétés thermophysiques (conductivité thermique et chaleur volumique), des courbes d'adsorption/désorption du matériau, du MBV (Moisture Buffering Value), de la perméabilité à la vapeur d'eau... Pourtant, ces paramètres permettraient de mieux connaître les propriétés de transfert de stockage de la chaleur et de l'humidité des matériaux et de mieux interpréter les signaux mesurés dans la cellule biclimatique. La connaissance des propriétés thermophysiques permettrait par exemple de comparer les valeurs de déphasage et d'atténuation mesurées par la méthode d'inter-corrélation avec les valeurs théoriques de la norme NF EN ISO 13786. Les éventuels écarts à la théorie pourraient être expliqués par les couplages entre transfert de chaleur et de vapeur.

Tous ces points sont des pistes futures pour les recherches concernant le matériau terre et son adaptation au contexte moderne de la construction.

Bibliographie

- [1] **XP P13-901.** *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception, Octobre 2001.*
- [2] **BUI, Q. B. and MOREL, J.-C.** *Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth Materials and structures, Vol.42 (8), pp.1101-1116, 2009.*
- [3] **NF EN ISO 13786.** *Performance thermique des composants de bâtiment - Caractéristiques thermiques dynamiques - Méthodes de calcul, 2008.*
- [4] **Othmen Inès.** *Étude des matériaux d'isolation compatibles avec la pierre de tuffeau : application à la réhabilitation du bâti ancien et/ou historique. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 2015*
- [5] **Poullain P.** *Étude comparative de l'écoulement d'un fluide viscoplastique dans une maquette de malaxeurs pour bétons : PIV, IRM et simulation numérique. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.*

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une thématique de développement durable à travers l'écoconstruction. Nous nous intéresserons dans cette thèse à l'amélioration des performances du BTC, en exploitant les matériaux locaux : la terre, les fibres végétales et notamment celles de kénaf qui constitue l'une des richesses végétales du Bénin encore délaissées de nos jours. Pour réduire la sensibilité à l'eau du BTC, nous avons fait appel aux liants, à savoir le ciment et le laitier de haut fourneau. Après la caractérisation des matières premières minérales et végétales, nous avons procédé à l'élaboration des éco- matériaux.

Nous avons procédé à la caractérisation physicochimique, minéralogique et géotechnique des sols de Baka et Etigbo. Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons, des limites d'Atterberg, de l'équivalent de sable (ES) et de l'essai au bleu de méthylène révèlent que l'échantillon de Baka est limoneux-argileux de plasticité moyenne (sol de type A2) et que celui de Etigbo est un sol très argileux (sol de type A3). La composition minéralogique des échantillons bruts indique que les minéraux majoritaires de l'échantillon de Baka sont le quartz (49,43%) et la kaolinite (33,11% en masse). La kaolinite (78,16%) et l'hématite (13,20%) sont les phases majoritaires dans l'échantillon d'Etigbo. La forte teneur en kaolinite et en hématite de cet échantillon dernier le prédispose à être utilisé dans la céramique contrairement à l'échantillon de Baka, riche en dégraissant (quartz), qui peut être utilisé dans l'éco-construction. Le sol de Baka de par sa composition minéralogique a été sélectionné pour la confection des blocs de terre comprimée.

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des fibres de kénaf du Bénin ont été également étudiées dans ce travail. Il ressort que :

- La résistance à la traction des fibres de kénaf diminue quand la longueur de jauge augmente. Quelle que soit la longueur de jauge considérée, la résistance moyenne à la traction des fibres de kénaf est supérieure à la résistance à la traction de nombreuses autres fibres locales telles celles de sisal, de noix de coco ou de palmier à huile ;
- Les fibres de kénaf sont très riches en cellulose (73%) de type I, en hémicelluloses (18%) et de la lignine (6%) ;

Nous avons ensuite procédé à l'élaboration des différentes formulations, la confection des blocs et la caractérisation des matériaux.

Dans le but d'améliorer la résistance mécanique et surtout de réduire le nombre de formulations, certains paramètres physiques à savoir : la teneur en eau, la contrainte de compactage, le teneur et la longueur des fibres à incorporer dans les blocs ont été optimisés dans un premier temps. Ensuite, nous avons étudié la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques des blocs par stabilisation chimique (ciment et le mélange laitier de haut fourneau activé par le ciment) et par stabilisation physique (fibres de kénaf). De même, nous avons cherché à réduire la sensibilité à l'eau des blocs.

Afin d'optimiser le comportement mécanique, une étude de mode de cure a été conduite. Les principaux résultats de cette étude expérimentale sont :

- La cure à l'étuve des BTC stabilisés au ciment comme au mélange ciment-laitier granulé conduit aux meilleures résistances à la compression sèche et la flexion trois points, comparativement aux autres modes de cure;

- La cure dans une chambre climatique (20°C et 50% d'humidité relative) est acceptable du point de vue résistances mécaniques. Ce résultat a été obtenu sans dépense d'énergie, d'où son intérêt économique par rapport à la cure à l'étuve;

- Une étude d'optimisation du taux et de la longueur des fibres vis à vis des résistances mécaniques (résistance à la compression sèche et à la flexion trois points) et de la conductivité thermique conduit à retenir une teneur de 0,5% de fibres de longueur 30mm.

- L'ajout des fibres de kénaf a conduit à une amélioration significative de la résistance mécanique et surtout de la résistance à la flexion trois points. Le matériau passe d'un comportement fragile caractérisé par une rupture brutale des éprouvettes, à un comportement ductile pour lequel, après la première fissuration de la matrice, les fibres végétales reprennent les efforts et permettent une déformation plus importante du matériau la phase de rupture contrôlée, ce qui permet d'un caractère de tolérance à l'endommagement. Bien sûr, après le premier pic correspondant à l'apparition de fissures, le matériau endommagé peut être réparé.

- Les meilleurs résultats de résistance mécanique sont obtenus avec les blocs stabilisés à 7% de ciment et renforcés par 0,5% de fibres de longueur 30 mm et aussi les blocs stabilisés par 10% de laitier granulé activé par 5% de ciment et renforcés par 0,5 % de fibres de longueur 30 mm.

- Une baisse générale de la résistance à la compression et à la flexion humide avec l'ajout des fibres pour tous les BTC testés comparativement aux blocs sans fibres,

- L'absorption totale d'eau (ATE) des blocs diminue quand la teneur en liant est accrue et augmente avec l'incorporation des fibres.

- L'ATE de tous les BTC étudiés reste en deçà de 15%, limite recommandée par l'organisation suisse « International Labour Organisation »

La dernière partie de cette étude est consacrée au comportement hygrothermique sous sollicitations cycliques de parois constituées des matériaux formulés dans ce travail. Les mesures réalisées en chambre biclimatique ont permis de caractériser les différents matériaux, en étudiant les transferts de chaleur et de vapeur d'eau.

L'analyse des signaux à l'aide d'une méthode d'inter-corrélation a permis de déterminer les atténuations et déphasages occasionnés par ces matériaux en se basant sur une période de sollicitations cycliques de 24h, correspondant aux variations quotidiennes de la température. Les résultats mettent en évidence un effet significatif du liant ciment ou laitier de haut fourneau au sol, aussi bien sur le déphasage que sur l'atténuation de la température et de l'humidité. L'ajout d'un liant diminue le déphasage et augmente l'atténuation du matériau. Les meilleurs résultats de comportement hygrothermique sont obtenus avec le sol fibré.

Perspectives

- Etude du comportement physicochimique des blocs à l'interface fibres et matrice minérale
- Etude de la durabilité du bloc de terre comprimée renforcée par les fibres de kénaf
- Etude de l'effet de l'ajout de fibres végétales sur les inerties thermique et hydrique de la paroi

ANNEXE

LISTE DES PUBLICATIONS & COMMUNICATIONS ISSUES DE LA THESE

Liste des Publications :

- Armel B. LAIBI, Moussa GOMINA, Brahim SORGHO, Etienne SAGBO, Philippe BLANCHART, Mohamed BOUTOUIL et Dominique K. C. SOHOUNHLOUE. *Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin en vue de leur valorisation dans l'éco-construction. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2017, vol. 11, no 1, p. 499-514.*

- LAIBI, Armel B., POUILLAIN, Philippe, LEKLOU, Nordine, Moussa Gomina and Dominique K. C. Sohounhloué. *Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB). KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, p. 1-9.*

- Laibi B.A., Gomina M., Sagbo E., Agbahoungbata M., Poullain P., Leklou N. and Sohounhloué K.C.D. *Physicochemical and mechanical characterization of Benin's Kenaf fibers and its effect on the building compressed Earth Blocks (CEB) mechanical properties. Research Journal of Chemical, 2017, Vol. 7, No. 2, pp. 6-15, ISSN 2231-606X.*

Liste des communications orales :

- LAIBI, Armel B., POUILLAIN, Philippe, LEKLOU, Nordine, Brahim SORGHO Etienne SAGBO, Moussa GOMINA, Dominique K. C. SOHOUNHLOULE. *Comportement mécanique de matériaux composites sol/fibres de kénaf, 17^{ème} journée annuelle de la Société Ouest Africaine de Chimie (SOACHIM), Cotonou, Bénin 2016.*

- Armel LAIBI, Brahim SORGHO, Etienne SAGBO, Mohamed BOUTOUIL, Fouzia KHADRAOUI, Moussa GOMINA, Dominique K. C. SOHOUNHLOULE. *Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin. 16^{èmes} Journée Annuelles de la Société Ouest Africaine de Chimie (SOACHIM), Abidjan, Côte d'Ivoire, 2015*

Résumé

Les briques de terre compressée (BTC) à la façon traditionnelle au Bénin présentent de piètres propriétés mécaniques, ce qui explique que les populations recourent aux parpaings de ciment relativement trop coûteux et dont l'emploi affecte fortement les ressources en eau et en énergie. Ce travail propose des pistes d'amélioration des BTC pour l'écoconstruction par l'ajout de fibres végétales à des sols usités localement pour la construction. Cette stratégie permet de valoriser les matières premières minérales et végétales dans un domaine d'activités qui concerne une grande partie de la population.

Dans un premier temps, un sol a été choisi d'après sa composition chimique, ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques. Le choix de la fibre de kénaf pour le renforcement de la matrice minérale se justifie par ses excellentes propriétés mécaniques spécifiques et sa disponibilité à très faible coût. Les effets des fibres sur le comportement du sol au jeune âge, puis sur les comportements mécanique et hygrothermique des matériaux consolidés sous 5 MPa (pression applicable avec les équipements facilement disponibles au Bénin), ont été étudiés pour trois taux massiques de fibres (0,5%; 1% et 1,5% relativement au sol) dans différentes longueurs (5, 10, 20 et 30 mm). Les résultats indiquent une nette amélioration du comportement mécanique des BTC renforcés par le kénaf en termes des résistances à la flexion et à la compression, et de la résistance à la rupture catastrophique (comportement pseudo ductile). Les résultats les plus élevés sont obtenus pour une teneur de 0,5% de fibres de longueur 30 mm. L'ajout de ciment seul au sol fibré (taux de 3, 5 et 7%) ou de ciment associé au laitier de haut fourneau (taux de 3-5% et 5-10%, respectivement) permet en sus d'améliorer de façon importante la résistance à la prise d'eau. Les meilleurs résultats sont obtenus avec 5% de ciment et 10% de laitier de haut fourneau. Les mesures réalisées en chambre biclimatique ont permis de caractériser les matériaux comme paroi séparatrice, en étudiant les transferts de chaleur et de vapeur d'eau. Les résultats mettent en évidence l'effet significatif de l'ajout d'un liant au BTC : L'ajout d'un liant diminue le déphasage et augmente l'atténuation du matériau. Les meilleurs résultats de comportement hygrothermique sont obtenus pour le sol fibré.

Cette étude démontre qu'il est possible de produire au Bénin, à partir de matières premières locales et avec des équipements peu onéreux, des éco-matériaux aux propriétés mécaniques et hygrothermiques satisfaisantes pour la construction d'habitat de type R+1.

Mots-clés : Bloc de terre comprimée, kénaf, fibres végétales, comportements mécaniques, sollicitation hygrothermiques, isolation, écoconstruction.

Discipline : Chimie

ENSICAEN, CRISMAT UMR6508, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 CAEN Cedex 4

Abstract

Traditional Compressed Earth Blocks (CEB) in the Republic of Benin have poor mechanical properties, this justifies why people rely on relatively expensive cement blocks; the use of which greatly affects resources such as water and energy. In this work we have proposed ways to enhance CEB properties for eco-construction by adding plant fibers to locally used construction's soils. This strategy makes it possible to value mineral and vegetable raw materials in a field of an activity that is common to a large part of the population. At first, a soil was chosen according to its chemical composition, its physical, mechanical and technological properties. The choice of kenaf fiber for the reinforcement of the mineral matrix is justified by its excellent specific mechanical properties and its availability at very low cost. The effects of fibers on soil behavior at young age and on the mechanical and hygrothermal behavior of consolidated materials under 5 MPa (pressure applicable with equipment readily available in Benin) were studied for three mass content of fibers relatively to the soil (0.5% 1% and 1.5%) and different lengths (5, 10, 20 and 30 mm). The results indicated a remarkable improvement in the mechanical behavior of kenaf-reinforced CEBs in terms of flexural and compressive strengths and tolerance to damage. The highest results were obtained with 0.5% of fibers 30 mm long. The addition of a binder (3, 5 and 7% of cement) or (3-5% and 5-10% of cement and blast furnace slag mix) allowed an important reduction in water uptake. The best mechanical results were obtained for a biocomposite made up with BAK soil, 0.5% of flax fibers 30 mm long and a mix of 5% cement and 10% blast furnace slag. Measurements carried out in a bi climatic chamber made it possible to characterize the hydric and thermal behavior of the soil-based materials. The addition of a binder decreases the phase shift and increases the attenuation of the material. These different results show that it is possible to produce in Benin with the available equipment, CEB with mechanical and hygrothermal properties sufficient enough for the construction of type R + 1 habitat.

Key words: Compressed earth block, kenaf, plant fibers, mechanical behavior, hygrothermal sollicitation, isolation, eco-construction.

