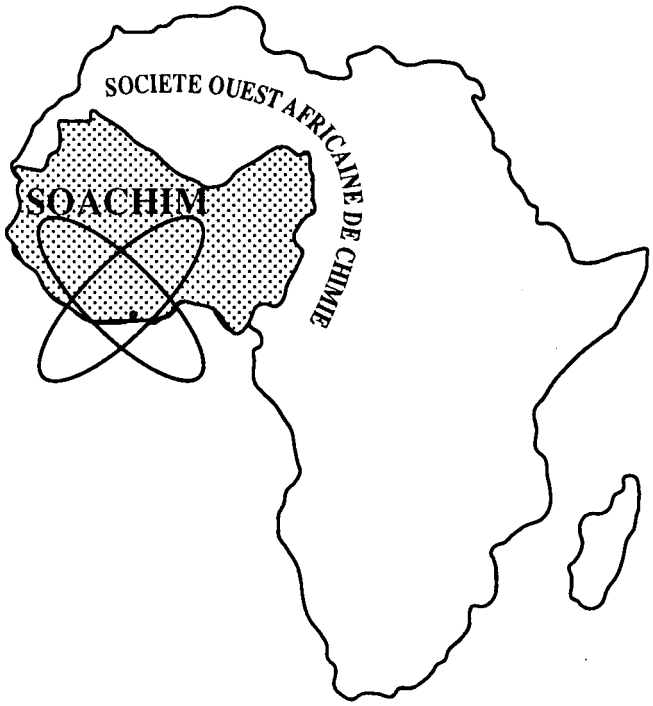
Influence des fibres de kenaf (Hibiscus altissima) sur les propriétés physiques et mécaniques des adobes

Moussa Ouedraogo, Kalifala Dao, Younoussa Millogo, Mohamed Seynou, Jean-Emmanuel Aubert, Moussa Gomina

Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie
J. Soc. Ouest-Afr. Chim.(2017), 043 : 48 - 63
22ème Année, Juin 2017



ISSN 0796-6687
Code Chemical Abstracts : JSOCF2
Cote INIST (CNRS France) : <27680>
Site Web: **http://www.soachim.org**

Influence des fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) sur les propriétés physiques et mécaniques des adobes

Moussa Ouedraogo[1, 2], Kalifala Dao[1], Younoussa Millogo[1,2*], Mohamed Seynou[1], Jean-Emmanuel Aubert[3], Moussa Gomina[4]

[1] *Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, UFR/ Sciences Exactes et Appliquées, Laboratoire de Chimie Moléculaire et des Matériaux (LCMM), 03 B.P. 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*
[2]*Université Nazi BONI, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Techniques (UFR/ST), 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso.*
[3]*Université de Toulouse, LMDC, INSA, UPS, France.*
[4]*Laboratoire CRISMAT UMR 6508 CNRS/ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, 14050 Caen Cedex 4, France*

(Reçu le 21/08/2017 – Accepté après corrections le 04/10/ 2017)

Résumé : L'objectif principal de cette étude était d'élaborer des adobes résistants, durables et avec une faible conductivité thermique. Pour cela, une argile provenant de Korsimoro (Burkina Faso) composée de kaolinite (28%), de quartz (49%), de goethite (7%) et de muscovite (9%) a été mélangée avec des fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) à des teneurs en masse allant jusqu'à 1% avec un pas de 0,2% et longues de 1,5 et 3cm pour élaborer ces adobes. Les caractéristiques physiques, mécaniques, minéralogiques, microstructurales et biochimiques de ces fibres de même que celles physiques, mécaniques et microstructurales des adobes ont été évaluées. Il ressort de cette étude que l'incorporation des fibres de kenaf améliore la résistance mécanique des adobes due à la non propagation des fissures, à la bonne adhérence des fibres de kenaf avec la matrice argileuse et surtout à la présence de la cellulose dans les fibres de kenaf à cause de sa bonne résistance à la traction. La présence des fibres dans la matrice argileuse rend le matériau composite ductile avec deux pics de rupture dont le premier lié à la rupture de la matrice argileuse et le second dû aux fibres reprenant les charges après celle du premier pic. La conductivité thermique des adobes diminue avec l'apport des fibres de kenaf due essentiellement à la présence de la cellulose dans les fibres, un bon isolant thermique. Les adobes adjuvés aux fibres exposés à l'eau sont moins érodés. Ces adobes pourraient être utilisés pour des habitats durables avec un meilleur confort thermique.

Mots clés : Adobe, Fibres de kenaf, Caractérisation microstructurale, Caractéristiques physiques et mécaniques, Conductivité thermique.

Influence of the kenaf fibres (*hibiscus altissima*) on physical and mechanical properties of adobes

Abstract: The main objective of this study was to manufacture resistant, durable adobes and with a low thermal conductivity. For this purpose, clayey material from Burkina Faso composed of quartz (49 wt.%), kaolinite (28 wt.%), goethite (7 wt.%) and muscovite (9 wt.%) was mixed with kenaf fibres (*Hibiscus altissima*) up to 1wt.% and long of 1.5 and 3cm to manufacture adobes. The physical, mechanical, mineralogical, microstructural and biochemical characteristics of these fibres as well as those physical, mechanical and microstructural of adobes have been evaluated. It is shown for this study that kenaf fibres incorporation improves mechanical resistance of adobes due to the non fissures propagation, good fibres adhesion with clayey matrix and mainly cellulose presence in kenaf fibres because of its good bending strength. The presence of fibres in clayey matrix leads the composite material ductile with two fracture peaks which the first is due to clayey matrix rupture and the second due to fibres which recuperate charges after the first rupture peak. Adobes thermal conductivity decreases with fibres additions due mainly to the presence of cellulose in fibres, a good thermal insulator. Adobes amended with fibres exposed to water are less eroded. These adobes could be used for durable habitats with good thermal comfort.

Keywords: Adobe, Kenaf fibres, Microstructural characterization, Physical and mechanical characteristics, thermal conductivity.

* Corresponding author: younoussam@yahoo.fr

1. Introduction

Au niveau mondial, la terre regorge des quantités importantes de matières premières argileuses susceptibles d'être utilisées dans l'élaboration des briques pour la construction des habitats dans le monde en général et en Afrique en particulier. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC). Chaque technique est spécifique à une région bien donnée, liée sans doute aux pesanteurs socio-culturelles. Au Burkina Faso par exemple, les techniques les plus utilisées sont celles des adobes (brique en terre crue moulée à la main) et la brique en terre comprimée (BTC). En plus de ces deux techniques, les briques en parpaings de ciment sont de plus en plus utilisées surtout dans les milieux urbains pour des populations ayant un revenu acceptable à cause de leur résistance mécanique et leur tenue à l'eau. Cependant, les briques de parpaings en ciment ont des inconvénients du point de vue économique et environnemental. En effet, le ciment Portland beaucoup utilisé au Burkina Faso produit par les quatre cimenteries (Diamond Cement, CIMBURKINA, CIMFASO et CIMAF) a un coût très élevé car le clinker est importé et le broyage des constituants du ciment est énergétivore puis polluant à cause de l'émission des poussières.

Il apparaît alors que l'utilisation des adobes (brique en terre crue sans ajout de ciment ni cuisson) dans la construction des habitats est l'une des solutions pour la construction durable pour des populations dans des pays en voie de développement à revenu modeste. Cependant, les adobes crus rencontrent des problèmes tant sur le plan de résistance mécanique que de la durabilité surtout la tenue à l'eau. Ces problèmes sont liés entre autre à la mauvaise cohésion de la matrice argileuse et à l'apparition d'un grand nombre de pores lors de l'élaboration de ces adobes. Pour résoudre cette problématique, des récentes études sur des adobes renforcés par des fibres végétales de *noix* de *coco*, de *palmier à huile*, de *sisal* et de polymères organiques ont montré que l'incorporation de ces renforts réduit les fissures et améliore la durabilité des adobes [1-2]. De nombreux travaux scientifiques sur les fibres végétales en vue de les utiliser comme renforts dans les adobes ont été réalisés [3-9]. Les travaux de Millogo et *al.*, 2014 [4] et Millogo et *al*., 2015 [5] ont été axés sur l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques et la corrélation microstructure et propriétés mécaniques des blocs d'adobes pressés (avec une pression de 2 MPa) fabriqués à partir d'une terre argileuse française par l'apport des fibres de kenaf (*Hibiscus cannabinus*) de différentes tailles (3 et 6 cm) et différents pourcentages jusqu'à 0,8% en masse. Il est à noter que la nature de la terre argileuse, la taille des fibres ajoutées et la procédure d'élaboration du matériau de construction influencent beaucoup sur ses propriétés physiques et mécaniques.

En outre les paramètres physiques tels que l'absorption d'eau par capillarité, la porosité fermée, l'érodabilité et la conductivité thermique des matériaux de construction qui sont des paramètres très importants dans le domaine de la construction surtout en Afrique tropicale, restent sous exploités dans les travaux de recherche sur les matériaux de construction [3-4].

Dans la littérature, à notre connaissance, peu d'études scientifiques ont concerné les interactions entre les molécules du kenaf et celles de la matrice argileuse qui sont pourtant très importantes dans la compréhension de la stabilisation des adobes par ces types de fibres végétales.

Le présent travail étudie l'influence d'une autre variété des fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) provenant de Farakobâ (village de l'Ouest du Burkina Faso) de tailles de 1,5 et 3cm à des teneurs massiques (jusqu'à 1%) sur les transformations microstructurales et les propriétés physico-mécaniques des adobes élaborés à partir d'une argile extraite à Korsimoro, une localité du Centre-Nord du Burkina Faso. Un accent particulier sera mis sur la conductivité thermique, l'érodabilité des adobes élaborés en tenant compte des tailles des fibres de kenaf. Le mécanisme de stabilisation des adobes par des fibres de kenaf et plus spécifiquement à l'échelle moléculaire peu abordée dans la littérature sera discuté. L'objectif à long terme de ce travail est de valoriser la plante de kenaf plus spécifiquement la variété *Hibiscus altissima* cultivée par les paysans à cause de ses feuilles pour la préparation des sauces et de ses fibres pour le cordage et la fabrication des masques traditionnels, dans le domaine des matériaux de construction. Cela contribuera à améliorer davantage le revenu des paysans.

2. Matières premières, méthodes et procédures expérimentales

2.1. Matières premières

La terre argileuse utilisée dans cette étude référencée KORS, a été prélevée à Korsimoro (12°79' Latitude Nord et -1°09' Longitude Ouest) dans le centre-nord du Burkina Faso. C'est une terre

argileuse de couleur rouge-brun ayant quelques parties marron claire.

La distribution granulométrique complète de la terre argileuse a été déterminée par tamisage (particules de diamètre ≥ 80 µm) et par sédimentométrie (particules de diamètre < 80 µm) respectivement selon les normes NF P 94-056 et NF P 94-057.

Les limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène du sol ont été respectivement déterminées suivant les normes NFP 94-051 et NF P 94-068.

La distribution granulométrique des particules de KORS (**Figure 1**) montre que d_{50} et d_{90} sont respectivement à 12 et 200µm. En tenant compte de la valeur de l'essai au bleu de méthylène (V_{BS} = 5,17 g/100g), KORS peut être classé comme une argile à caractère limoneux de plasticité moyenne [10] . Cette nature de l'argile KORS se confirme par les limites d'Atterberg : limite de liquidité (W_L = 31%), limite de plasticité (W_P = 17%) et indice de plasticité (I_P = 14%). En considérant le fuseau des indices de plasticité de terres utilisables pour la confection des briques [10], KORS s'avère convenable pour la fabrication des briques de terre crue (adobes). Les fibres de kenaf (*Hibiscus altissima*) utilisées pour la stabilisation des adobes proviennent d'un champ expérimental de l'Institut d'Environnement et de Recherche Agronomique (INERA) basé à Farakobâ, village dans la région des Hauts Bassins (Ouest du Burkina Faso). Ce champ expérimental visait à valoriser les fibres de kenaf en vue de procurer aux paysans un revenu supplémentaire monétaire [11]. L'extraction des fibres est manuelle après le rouissage des tiges des plantes de kenaf dans des bassins d'eau.

Hibiscus altissima est une plante ligneuse dressée ou sarmenteuse, vivace, pouvant atteindre jusqu'à 10 m de hauteur, à feuilles alternes et pubescentes. Le limbe est pentagonal long et large de 7 à 12 cm, la base est cordée, le sommet porte 3 pointes acuminées. Les bords de la feuille sont denticulés. Une glande verruqueuse est à la base de la nervure médiane. Le pétiole long de 3 à 10 cm, porte de même que les tiges et les pédoncules, quelques épines courbes à base tuberculée violacée. Les fleurs sont axillaires au sommet d'un pédoncule long de 2 à 4 cm. La corolle est jaune foncé, large de 6 à 8 cm, comprenant 5 pétales fortement nervés (10 à 12 nervures), largement arrondis au sommet, la base marquée d'une belle tache pourpre bien délimitée. Le calice est long de 15 à 20 mm, large de 10 à 12 mm à la base, formé de 5 lobes triangulaires. Le calicule ayant 12 bractéoles à sommet fourchu. Le pédoncule orné au sommet, juste sous le calice, d'une touffe de longs poils, sur 5 à 10 mm. Le fruit est une capsule conique haute de 15 à 20 mm, à 5 valves triangulaires [12]. Sur les **Figure 2** sont présentées les plantes de kenaf, les tiges et les fibres extraites.

Cette plante est fréquente dans les galeries forestières, les bosquets de palmier à huile, le bord des lieux marécageux et est bien dispersée en Afrique.

2.2. Confection des adobes

La terre argileuse KORS utilisée pour la confection des adobes a été broyée jusqu'à une granulométrie inférieure à 5mm. L'élaboration des adobes a été faite en réalisant un mélange de KORS et des fibres de kenaf (de longueurs 1,5 et 3cm) à des teneurs jusqu'à 1% en masse de terre argileuse sèche.

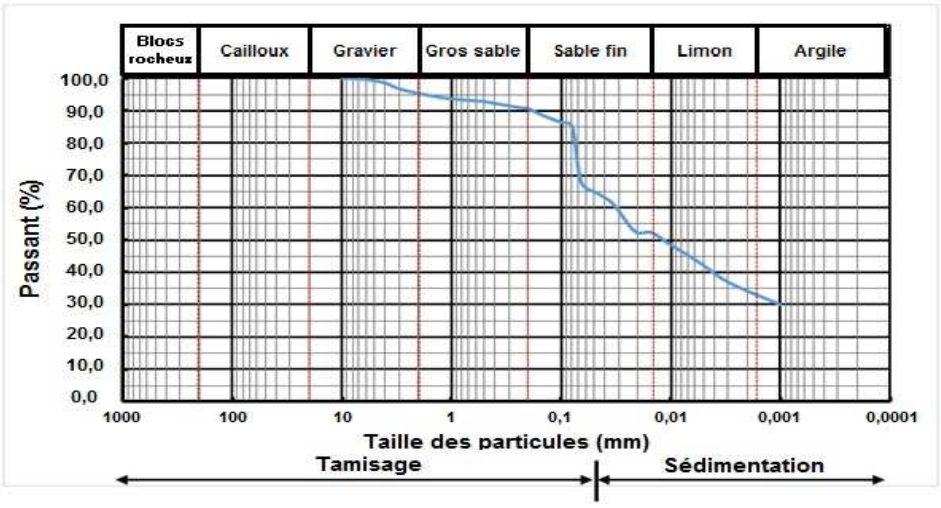


Figure 1 : Courbe d'analyse granulométrique complète de l'échantillon KORS

Un mélange homogène avec une proportion d'eau égale à 24% en masse sèche de KORS par malaxage pendant une vingtaine de minutes a été réalisé. Cette pâte homogène est mise dans un moule (4 x 4 x 16) cm^3en deux couches avec un tassement de 30 coups manuels pour chaque couche. Séchées pendant 24h à l'ombre (30±5°C) et à l'air libre, les éprouvettes ont été démoulées pour être séchées à nouveau à l'ombre pendant 21 jours. Les éprouvettes ayant subi un temps de cure d'au moins 21 jours ont fait l'objet de caractérisation mécanique, physique et microstructurale.

2.2. Méthodes et procédures expérimentales

La composition chimique de KORS a été déterminée par spectrométrie d'émission atomique (Inducted Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry ou ICP-AES) après une digestion de l'échantillon dans des fondants. La perte au feu a été obtenue par calcination de l'échantillon jusqu'à une température de 1000°C.

La diffraction des rayons X (DRX) et la calorimétrie différentielle par balayage (DSC) couplée à l'analyse thermogravimétrique (DSC-ATG) ont été utilisées pour déterminer la composition minéralogique des échantillons de KORS et des fibres de kenaf. Le diffractomètre utilisé est de type Siemens D5000 équipé d'une lampe monochromatique avec une anticathode en cobalt et utilisant la raie Kα (λ= 1,789 Å). Les thermogrammes DSC-ATG ont été réalisés sur un appareil Netzsch SATA 449 F3 Jupiter avec une vitesse de montée en température de 10°C/min jusqu'à 1000°C.

L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et la spectrométrie à dispersion d'énergie sur les fibres de kenaf ont été réalisées à l'aide d'un appareil JEOL 6380 LV équipé d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés. Les faciès de rupture des adobes ont été analysés avec un vidéo-microscope de type Keyence VH-5911.

La conductivité thermique (K) des adobes a été mesurée avec une sonde TR-1 (2,4mm de diamètre ; 10cm de longueur, de plage de travail entre 0,1 et 4 $Wm^{-1}K^{-1}$) reliée au dispositif KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. La sonde est introduite dans un trou fait dans l'éprouvette de telle sorte qu'elle ne soit pas en contact avec l'air. Ce procédé de mesure de la conductivité thermique s'applique pour n'importe quelle teneur en eau dans la matrice argileuse.

L'essai pour la détermination du coefficient d'absorption d'eau (*A*) a porté sur des éprouvettes prismatiques (4 cm x 4 cm x 16 cm) séchées à la température de 60°C. Le coefficient d'absorption d'eau (*A*) est déterminé en suivant la masse d'eau absorbée par l'adobe en fonction du temps et de la surface de base. La valeur du coefficient d'absorption d'eau (*A*) est déterminée par la relation (1) :

$$A = \frac{m_1 - m_0}{S\sqrt{t}} \quad (1)$$

Avec m_0 : masse de l'adobe séchée

m_1 : masse de l'adobe imbibé d'eau pendant un temps *t*

S : surface inférieure de base (4x4) cm² de l'adobe

t : temps d'absorption en seconde

Les porosités fermées des adobes sont déduites des mesures de leurs densités apparentes hydrostatiques d_a et des densités absolues mesurées au pycnomètre (d_{ab}). La relation (2) permet de déterminer la porosité (η).

$$\eta\,(\%) = \left(1 - \frac{d_a}{d_{ab}}\right) * 100 \quad (2)$$

Les essais mécaniques de flexion trois points et de compression simple ont été effectués à l'aide d'une presse multifonction de marque CONTROLAB avec une vitesse de 0,5 mm/min et une charge maximale de 200kN.

L'érosion des adobes par les eaux de pluie a été simulée à travers un dispositif de spray test qui a consisté à asperger les adobes en continu pendant 10 minutes par de l'eau à pression et débit constants. L'arrosoir placé à 50 mm au-dessus fait couler verticalement l'eau sur un plan incliné d'environ 30° par rapport à la verticale sur lequel sont disposés les adobes (**Figure 3**).

Le pourcentage de perte de matériau après le test détermine le degré d'érosion (ou l'érodabilité) qui est estimé par un coefficient d'érosion donné par la relation (3) : $C_E = (M_0-M_s)/M_0*100$ (3) où M_0 est la masse de l'adobe sec (après étuvage à 105°C) avant l'essai et M_s la masse sèche de l'adobe après le test d'érosion.

La composition biochimique des fibres de kenaf a été déterminée sur des fibres broyées de kenaf selon la méthode de Van Soest en utilisant quatre détergents d'extraction : NDS (Neutral Detergent Soluble), NDF (Neutral Detergent Soluble), ADF (Acid Detergent Fiber) et ADL (Acid Detergent Lignin) [14-15]. Ces détergents sont utilisés dans le but de quantifier les teneurs en cellulose,

hémicelluloses, lignine et les cendres des fibres de kenaf.

L'absorption d'eau par capillarité des fibres et la cinétique d'absorption ont été mesurées sur des échantillons de 1g préalablement séchés à 60°C pendant 3 jours. Le coefficient d'absorption a été déterminé en immergeant les échantillons dans l'eau à différents temps : 5, 15, 30 mn, 1, 24, 48 et 72h.

Le diamètre des fibres supposé ayant une forme circulaire a été mesuré avec un pied à coulisse avec une précision de 0,01mm.

La masse volumique absolue a été déterminée selon la procédure adoptée par Ghavami et *al.*, 1999 [9]. La résistance à la traction des fibres a été évaluée selon la procédure d'essai décrite par Sawsen et *al.*, 2015 [16] et Charlet et *al.*, 2010 [17]. Les longueurs des jauges étaient de 5, 10 et 20mm. Une presse mécanique universelle de type Instron 5566 équipée d'une cellule de capacité de charge de 10kN avec une vitesse en déplacement de 1mm/mn a été utilisé pour l'essai. Au moins 22 essais sont nécessaires pour valider l'essai.

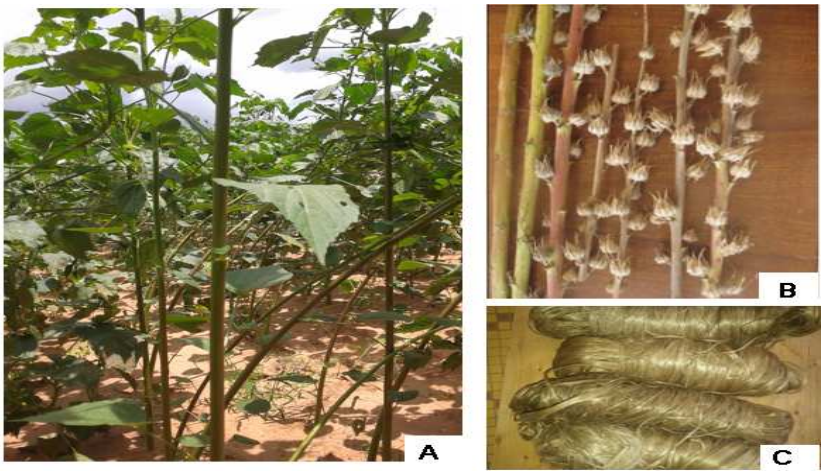


Figure 2 : Plantes (A), tiges (B) et fibres (C) de kenaf de variété *Hibiscus altissima*

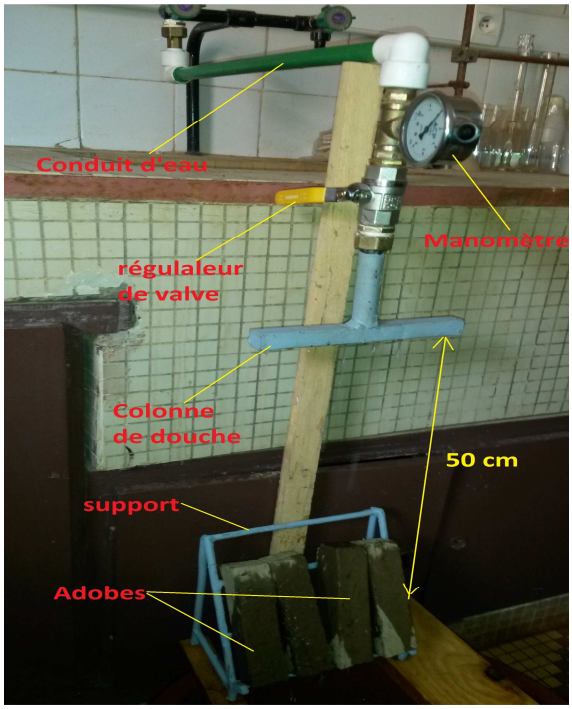


Figure 3 : Disposition du test d'érosion pluviométrique (spraytest)

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation chimique et minéralogique de KORS

Le **tableau I** présente les résultats de l'analyse chimique de l'échantillon KORS.

L'échantillon KORS contient une forte teneur en oxyde de silicium, une teneur acceptable en alumine et une teneur non négligeable d'oxyde de fer lui conférant une teinte grisâtre. Au vu de ces résultats, l'échantillon serait riche en quartz et minéraux argileux et contiendrait une teneur non négligeable en minéraux de fer.

L'analyse par diffraction des rayons X (**Figure 4**) vient confirmer la présence du quartz (SiO_2), de la kaolinite ($Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$), de la goethite (α-FeO(OH)) et de la muscovite ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$).

En combinant les résultats de la diffraction des rayons X et ceux de l'analyse chimique, la teneur des phases minérales cristallisées présentes dans KORS a été évaluée en utilisant une technique de calcul décrite par Millogo et *al.* (2014) [4].

La composition minéralogique des phases cristallisées est présentée dans le **tableau II**.

Il ressort de ce tableau que l'échantillon est riche en quartz et en minéraux argileux (kaolinite, muscovite) et contient une teneur non négligeable en goethite.

La composition minéralogique de l'échantillon est complétée par la DSC-ATG. Les courbes DSC-ATG de l'échantillon KORS (**Figure. 5**) mettent en évidence un pic endothermique à 96,5°C dû au départ de l'eau hygroscopique ou d'hydratation, provoquant une perte en masse de 1,2%. Le pic endothermique à 399°C est relatif à la transformation de la goethite en hématite. Le pic endothermique très prononcé à 518°C, est attribuable à la déshydroxylation de la kaolinite et sa transformation en une phase amorphe dite metakaolinite. La perte de masse liée à cet accident thermique est de 3,4%. Cette déshydroxylation se fait selon l'équation :

$Si_2Al_2O_5(OH)_4$ (kaolinite) → $Si_2Al_2O_7$ (metakaolinite) + $2H_2O$

Le pic endothermique à 576°C traduit la transformation du quartz α en quartz β. Enfin le pic exothermique à 920°C est dû à la réorganisation structurale de la metakaolinite.

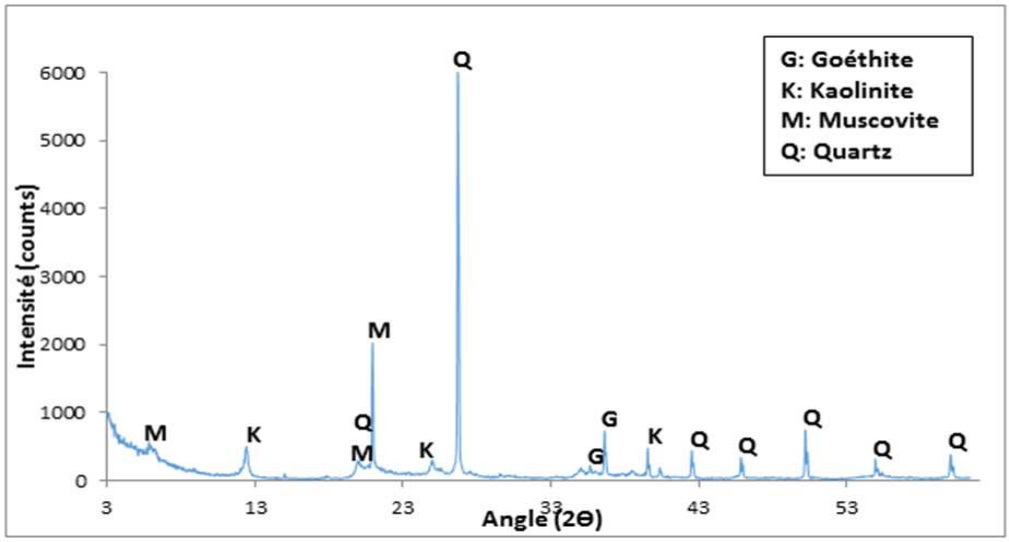


Figure 4 : Diffractogramme de KORS

Tableau I : Composition chimique de KORS

Oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	PF	Total
%	66,13	14,38	6,68	0,15	0,45	0,41	0,24	1,00	1,09	0,06	8,93	99,53

Tableau II : Composition minéralogique de KORS

Minéral	Kaolinite	Muscovite	Goethite	Quartz	Balance
%	28	9	7	49	7

3.2. Caractérisation minéralogique, chimique, physique et mécanique des fibres de *Hibiscus altissima* (kenaf)

Le diffractogramme de poudre des fibres de kenaf broyées est présenté sur la **Figure 6**. Ce diffractogramme montre la présence de la cellulose native (cellulose de type I). Cette cristallinité est prouvée par de larges pics de diffraction apparus aux angles 18,68, 25,8, 39,84 et 40,74°. Les pics de diffraction à 17,68 et 18,68° sont bien individualisés dans le diagramme des rayons X et cela prouve la présence en quantité importante de la cellulose de type I. Ces mêmes résultats sont obtenus sur les kenaf du Burkina Faso de variété *Hibiscus cannabinus*, de la Malaisie et de la Korée [5, 20-21]. Le principal pic qui apparaît à 39,84° et qui n'est pas dédoublé est une preuve supplémentaire que la cellulose de type I est majeure dans l'échantillon parmi les cinq types de celluloses (I, II, III, IV et V). La cristallinité de la cellulose contenue dans les fibres de kenaf est définie par l'indice de cristallinité (I_c) évalué en utilisant la méthode de Segal. Cet indice est calculé en utilisant la relation suivante :

$Ic= (I_{002}-I_{am})/ I_{002}*100$ (relation (4)) où I_{002} est l'intensité du pic de diffraction à 2θ=25,8° et I_{am} l'intensité du pic de diffraction à 2θ = 18,68° [21]. La valeur calculée était de 43. Cette valeur bien que faible est celle rapportée par la littérature sur des travaux de recherche sur les fibres de kenaf [21]. La faible valeur de cet indice peut être liée à la présence en quantité non négligeable des composés amorphes dont les hémicelluloses et la lignine qui contribuent à la diminution de l'indice de cristallinité.

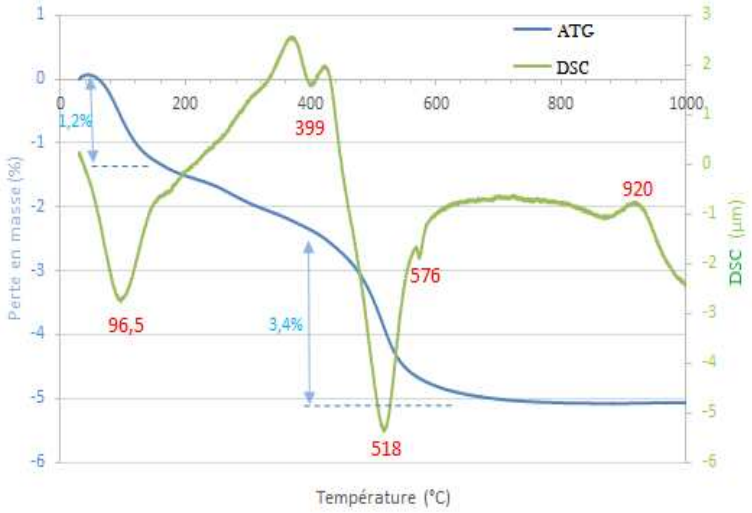


Figure 5 : Courbes DSC-ATG de l'échantillon KORS

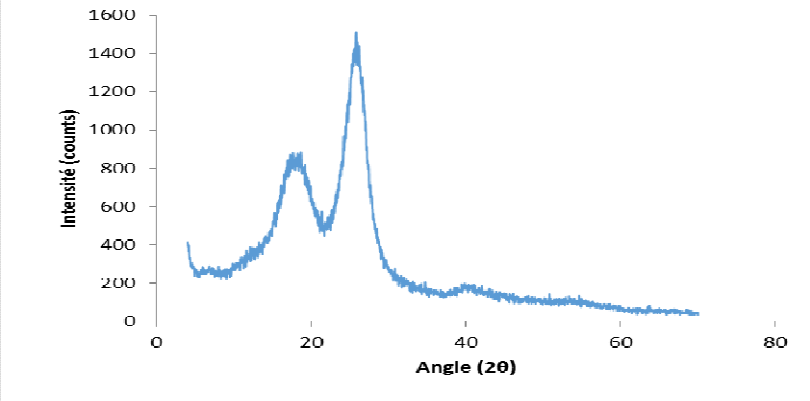


Figure 6: Diffractogramme des rayons X des fibres de kenaf

Pour connaître la morphologie fine et l'agencement des fibres de kenaf entre elles, l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisée sur ces dernières. Cette observation a été couplée à une analyse chimique élémentaire des fibres par la spectrométrie à dispersion d'énergie (SDE). Sur la **Figure 7**, sont présentées l'image au microscope électronique à balayage et le spectre SDE des fibres de kenaf.

L'observation au Microscope Electronique à Balayage des fibres de kenaf (**Figure 7a**) montre une orientation des fibres de kenaf en paquets constitués de fibres élémentaires dans la même direction. Les fibres sont sous forme effilée. Elles présentent une surface rugueuse (présence des nodules) qui serait favorable à une bonne adhérence avec la matrice argileuse. L'analyse par spectrométrie à dispersion d'énergie (SDE) réalisée sur les fibres de kenaf séchée et broyée (**Figure 7b**) montre qu'elle renferme essentiellement du carbone (matière organique) mais également de l'alumine, de la silice et de l'oxyde de calcium sous forme de traces. L'abondance du carbone dans les fibres est bien corrélée avec la présence des composés organiques tels que la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. La présence des oxydes d'aluminium, de silicium et de calcium est due à la contamination des fibres par le sol lors du séchage.

Le diamètre (0,14mm) et la densité absolue (1,05) de ces fibres sont presque les mêmes que ceux des fibres de kenaf de variété *Hibiscus cannabinus* du Burkina Faso. Cela montre que la variété influence très peu sur la densité absolue et le diamètre des fibres. Ces mêmes paramètres sont dans l'ordre de grandeur que ceux des fibres de sisal, coco et Lechuguilla [9, 27]. Par contre ces paramètres sont inférieurs à ceux de la paille et des palmiers à huile [23, 28]. Quant aux fibres de lin, elles sont plus denses que les fibres de *Hibiscus altissima* mais moins épaisses que celles-ci [16]. Les différences de densités des fibres sont sans doute liées à la composition biochimique des différentes fibres. Le taux d'humidité (4,56%) des fibres de *Hibiscus altissima* est faible par rapport à la variété *Hibiscus cannabinus* et aussi par rapport aux fibres de sisal, coco et Lechuguilla [9, 27]. Cette valeur relativement faible du taux d'humidité des fibres (les fibres absorbent peu l'eau hygroscopique) pourrait améliorer la résistance à la traction des fibres et leur durabilité dans la matrice argileuse. L'absorption d'eau par les fibres a été déterminée en fonction du temps. La courbe d'absorption d'eau (**Figure 8**) montre une augmentation de ce paramètre avec le temps jusqu'à 24h à partir duquel la courbe se stabilise montrant ainsi la saturation des fibres étudiées en eau. La valeur d'absorption d'eau au bout de 24 h est d'environ 230%. L'augmentation de l'absorption d'eau avec le temps est due au caractère hydrophile des fibres de kenaf à cause des molécules de cellulose et d'hémicelluloses. Cette valeur d'absorption d'eau à la saturation est du même ordre de grandeur que celle des fibres naturelles de sisal mais elle est plus élevée que les valeurs obtenues sur les fibres de coco et de lin [9, 16] et plus faible par rapport à celle de la paille [28]. Comparativement aux fibres de la variété *Hibiscus cannabinus*, l'absorption d'eau reste faible et ceci est bien corroboré avec le taux d'humidité. La forte valeur d'absorption d'eau pourrait créer un problème de vieillissement dans les composites avec la matière argileuse.

L'analyse biochimique des fibres a montré que celles-ci contiennent 71% de cellulose, 20% d'hémicelluloses, 4% de lignine et 2% de cendres. Cette composition biochimique est du même ordre de grandeur que celle de la variété de *Hibiscus cannabinus* [5] . Cela montre que la composition biochimique des fibres de kenaf n'est pas fortement liée à la variété. Comme rapportés dans les travaux de Millogo et *al*. (2015) [5], les fibres de kenaf utilisées dans notre étude ont une composition biochimique différente de celle de certaines fibres de kenaf [8, 21, 29-30]. Cette différence de composition biochimique est due à la nature du sol, du climat et de la région de culture des plantes. Une étude comparative en termes de composition biochimique d'autres fibres végétales naturelles est consignée dans le **tableau III**.

Cette étude comparative est plus axée sur la teneur de cellulose dans les fibres qui influence considérablement les propriétés mécaniques des fibres du fait de sa très grande résistance mécanique. Il ressort du tableau III que les fibres de lin, de chanvre et de jute ont la composition similaire en cellulose. Celle du sisal est faible en cellulose par rapport aux fibres étudiées. Par contre la fibre de coton a une composition en cellulose plus importante que la fibre étudiée. Ces différences en terme de composition biochimique (en cellulose plus spécifiquement) pourraient impacter sur les propriétés physiques et mécaniques des adobes renforts de ces fibres végétales.

La résistance à la traction des fibres a été déterminée avec trois longueurs de jauge : 5mm, 10mm et 20mm. Sur la **Figure 9**, est présentée la courbe donnant la résistance à la traction en fonction de la longueur de jauge. Ce graphe montre une diminution de la résistance à la traction à mesure que la longueur de jauge augmente. La contrainte moyenne pour les longueurs de jauge de

5, 10 et 20mm sont respectivement (965±135) MPa, (880±145) MPa et (821±202) MPa. Il est constaté une forte dispersion des valeurs des résistances (écart-type élevé) à cause de l'hétérogénéité des fibres et probablement à cause du défibrage manuel. Ces résistances sont légèrement élevées par rapport à la résistance à la traction de la variété *Hibiscus cannabinus.* Cette différence est certainement liée aux conditions de cultures. La culture de la variété *Hibiscus altissima* a été bien suivie (variété d'un champ expérimental) avec l'apport des engrais conséquemment tandis que la variété *Hibiscus cannabinus* profite seulement des engrais d'autres cultures : maïs, sorgho, coton. Globalement la résistance à la traction des fibres étudiées est du même ordre de grandeur que les fibres de lin [16] mais meilleur à celle de sisal et de coco [9]. La résistance à la traction élevée est liée à une forte teneur en cellulose (molécule cristalline) dans les fibres étudiées.

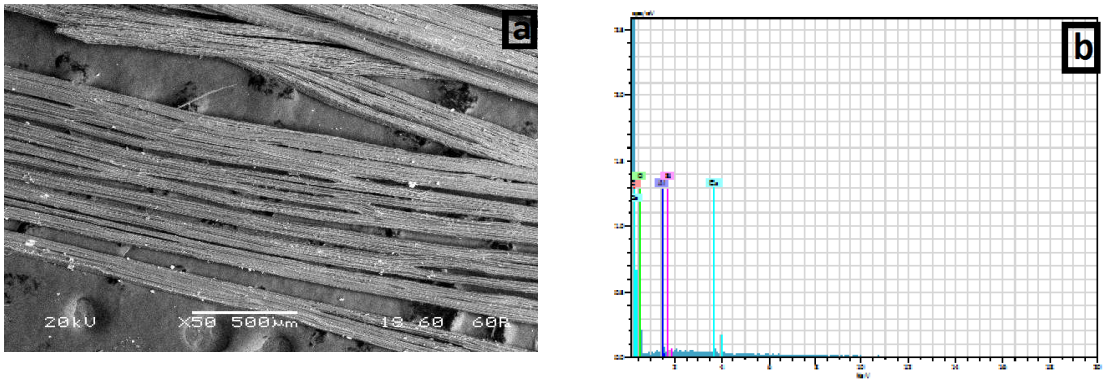


Figure 7: Microscopie Electronique à Balayage (a) et Spectre de Dispersion d'Energie (b) des fibres de kenaf

Tableau III : Composition biochimique de la fibre étudiée et d'autres types de fibres de kenaf [8, 23, 29-30].

Fibres Végétales	Cellulose (%)	Hémicelluloses (%)	Lignine (%)
Fibre étudiée	71	20	4
Lin	71	19-20,6	2,2
Chanvre	70-74	18-22,4	3,7-5,7
Jute	61-71	14-20	12-13
Sisal	63-64	12,0	10-14
Coton	85-90	5,7	-

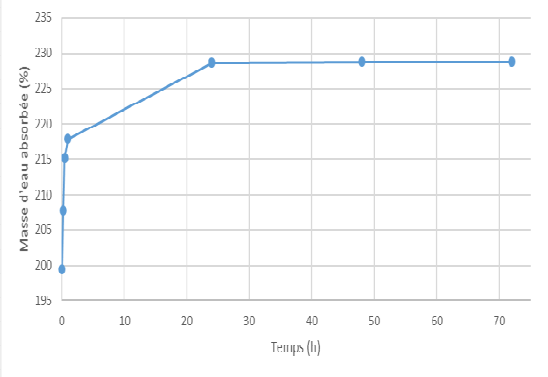


Figure 8 : Absorption d'eau par les fibres en fonction du temps.

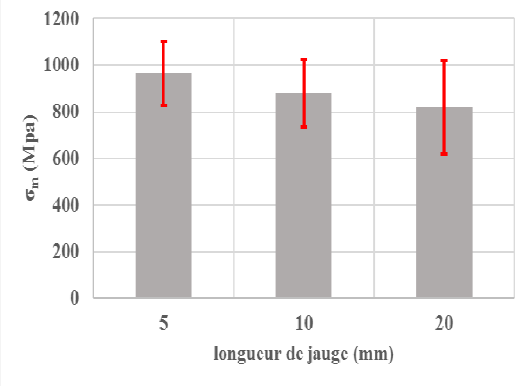


Figure 9 : Résistance à la traction des fibres en fonction de la longueur de jauge

3.3. Propriétés microstructures, physiques et mécaniques des adobes

L'observation au vidéo-microscope des faciès de rupture des différentes formulations des adobes montre des fissures et beaucoup de pores au niveau de l'adobe sans fibres (**Figure 10a**) tandis qu'avec l'apport des fibres de kenaf dans la matrice argileuse à une teneur d'au plus 0,4% de longueur 1,5cm et 0,2% de longueur 3cm rend la microstructure homogène, sans zone comportant de fissure et une diminution de la porosité. Au-delà de ces teneurs en fibres dans l'adobe, il y a augmentation progressive en nombre et en taille des pores et des fissures (avec souvent des fragments d'adobes) dans l'adobe du fait de l'entassement des fibres dans la matrice argileuse dans certaines zones (**Figure 10c** et **Figure 10e**). Pour des teneurs faibles en fibres, il y a une répartition homogène et une bonne adhérence des fibres à la matrice argileuse laquelle adhérence est liée à l'aspect rugueux des fibres. Cette adhérence s'établit par la formation des liaisons par pont hydrogène par suite des interactions au cours du malaxage des composantes des adobes (terre argileuse, fibres de kenaf et eau) entre les molécules du kenaf (cellulose, hémicelluloses et lignine), les minéraux argileux (kaolinite et muscovite) et la goethite. Ces liaisons résultent des interactions entre les doublets libres des oxygènes des molécules citées et des atomes d'hydrogène provenant aussi de ces molécules. Le résultat est l'augmentation de la compacité des composites et qui affecterait les propriétés mécaniques des adobes. Pour des teneurs faibles de fibres, leur taille n'influence pas la microstructure des adobes (**Figure 10b** et **Figure10d**) par contre pour des teneurs importantes en fibres, les tailles des fibres influencent fortement sur la microstructure des adobes (**Figure 10c** et **Figure 10e**). En effet avec l'augmentation de la taille des fibres, la microstructure devient plus poreuse et hétérogène avec le paquetage des fibres dans beaucoup de zones.

L'évolution du coefficient d'absorption d'eau par capillarité par les adobes en fonction de la teneur et de la taille des fibres est présentée sur la **Figure 11**.

L'absorption d'eau par capillarité des adobes renforcés aux fibres de kenaf, augmente avec la quantité de fibres de kenaf longues de 1,5cm jusqu'à 0,8% de fibres en masse tandis que les adobes adjuvés des fibres de kenaf longues de 3cm présentent une absorption capillaire d'eau qui croit seulement jusqu'à 0,2% en masse de fibres puis décroit par la suite.

L'augmentation de l'absorption d'eau par capillarité avec l'ajout des fibres de kenaf est essentiellement due à la teneur élevée de la cellulose dans les fibres qui a un caractère hydrophile. La baisse de ce paramètre surtout avec l'augmentation de la quantité de fibres et/ou la taille des fibres est liée à l'entassement des fibres de kenaf dans la matrice argileuse diminuant la cinétique de remontée capillaire d'eau. La nature absorbante des fibres (la cellulose) crée une voie dans la matrice argileuse des adobes, permettant une remontée d'eau par capillarité [2, 9]. Au-delà de 0,4% de fibres de kenaf longues de 3cm, la réduction du coefficient d'absorption est due à un entassement des fibres empêchant certaines fibres de la matrice argileuse d'être en contact parfait avec l'eau qui monte très lentement par capillarité dans l'adobe. Ces adobes présentent une hétérogénéité du point de vue de la répartition des fibres de kenaf en leur sein.

L'influence de la teneur et de la taille des fibres sur la porosité fermée est présentée sur la **Figure 12**. La courbe montre une augmentation de la porosité avec l'ajout des fibres. Cette influence est plus ressentie avec les fibres longues de 3cm. Ces résultats évoluent en général en sens inverse avec l'absorption d'eau par capillarité qui est liée surtout à la porosité ouverte c'est-à-dire accessible à l'eau. L'ajout des fibres à la matrice argileuse surtout en grande quantité induit la création des pores interne. Ceci est confirmé par les observations en vidéo-microscopie par les formulations riches en fibres (**Figures10 (c, e)).**

La conductivité thermique des adobes (**Figure 13**) décroit avec l'augmentation des fibres de kenaf. Ce phénomène est en adéquation avec la propriété intrinsèque de la cellulose qui a un caractère d'isolant thermique. Une diminution allant jusqu'à 69% pour les formulations d'adobes à 1,5cm de longueur de kenaf et à 34% pour les adobes à 3cm de longueur de fibres de kenaf est observée. La baisse de la conductivité thermique est plus ressentie pour les fibres longues de 1,5cm à cause de leur nombre plus élevé dans la matrice argileuse. D'autre part cette baisse de conductivité thermique est bien corrélée avec l'augmentation de la porosité totale fermée dans les adobes. La présence des vides remplis d'air à l'intérieur des adobes ralentit la conduction de la chaleur et par conséquent fait baisser la conductivité thermique. Ce résultat a été observé dans la stabilisation des blocs d'adobes pressés (BAPs) renforcés par des fibres de kenaf de variété *Hibiscus cannabinus* [4]. Les résultats de conductivité thermique sont meilleurs à ceux rapportés par Laibi et *al.* (2017) [31] concernant la stabilisation des blocs de terre comprimés (BTC)

par les fibres de kenaf du Benin. Cette différence est liée à la procédure de façonnage. En effet les BTC sont moins poreux que les adobes et cet état de fait augmente la conductivité thermique. Globalement les valeurs de conductivité thermique sont dans le même ordre de grandeur que les valeurs rapportées dans la littérature sur les briques crues ou renforcées par les fibres végétales [32]. La diminution de la conductivité thermique est favorable pour des bâtiments parce qu'elle réduit la transmission de la chaleur du milieu extérieur vers l'intérieur et régule la température à l'intérieur des bâtiments. Cela offrira un bon confort thermique aux bâtiments et diminuera la dépense en énergie qui est chère dans le contexte du Burkina Faso pour la majorité de la population.

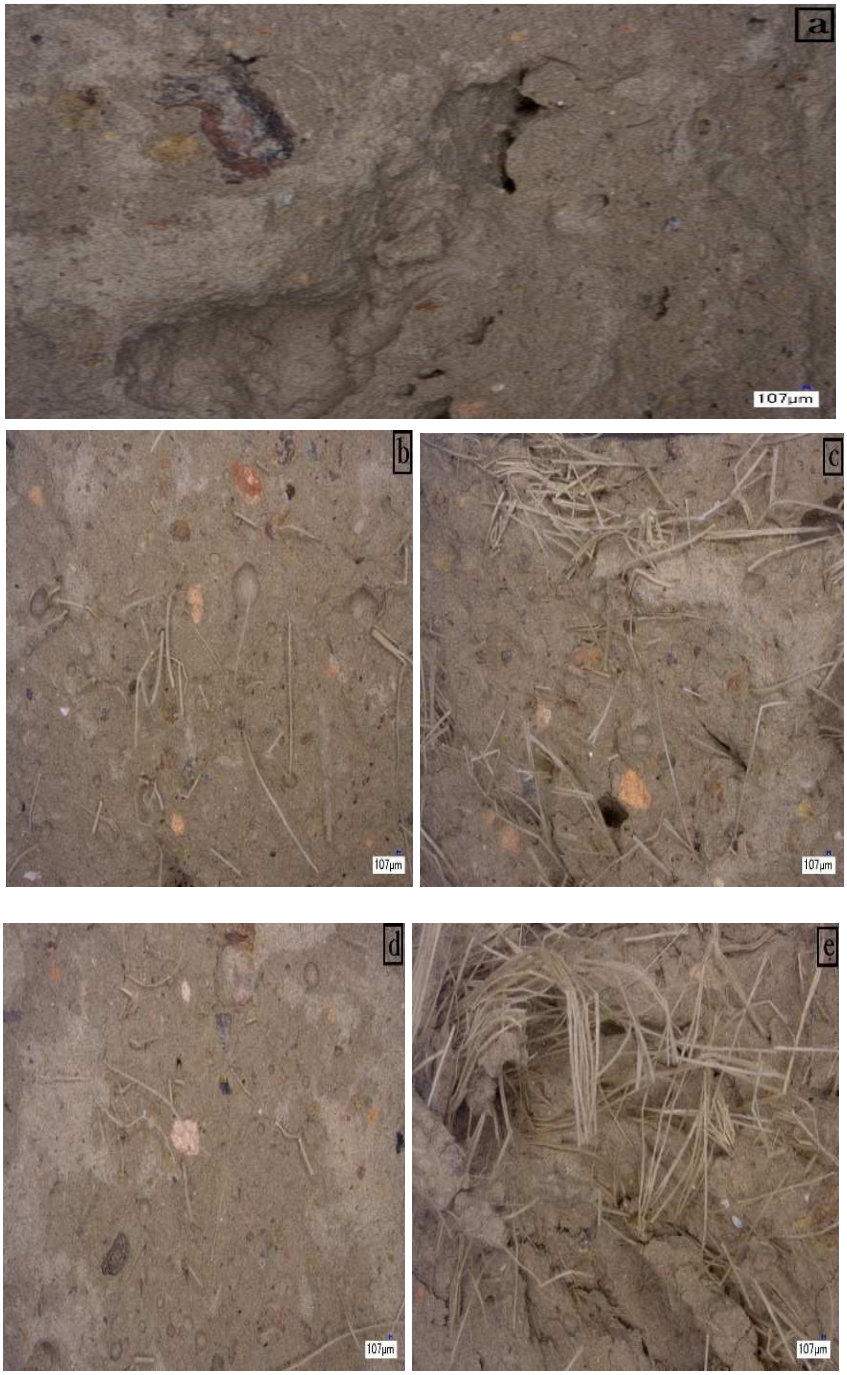


Figure 10 : Vidéo-microscopie des faciès de rupture des adobes
(a): Adobe sans fibre; (b): Adobe + 0,2% kenaf (1,5cm); (c): Adobe + 1% kenaf (1,5cm); (d): Adobe + 0,2% kenaf (3cm); (e): Adobe + 1% kenaf (3cm).

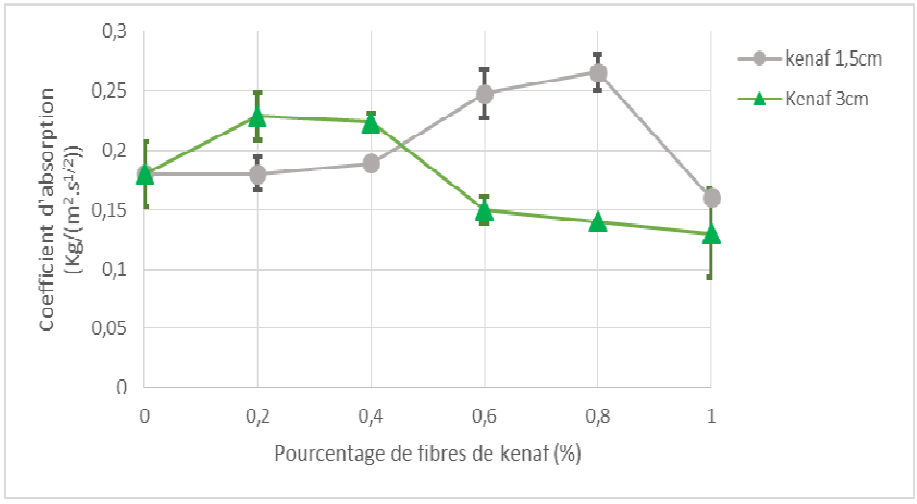


Figure 11 : Absorption capillaire d'eau des adobes

Figure 12 : Evolution de la porosité fermée des adobes en fonction de la teneur et de la taille des fibres

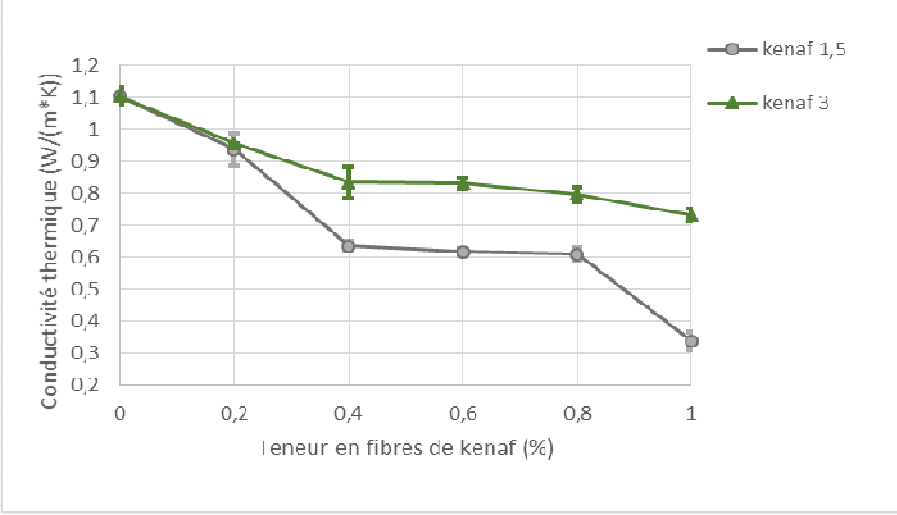


Figure 13 : Conductivité thermique des adobes

La résistance à la compression simple (**Figure 14**) augmente avec les ajouts de fibres de kenaf jusqu'à 0,2% pour les fibres longues de 3cm et jusqu'à 0,4% pour celles longues de 1,5cm puis par la suite diminue pour des teneurs importantes en fibres. L'amélioration de la résistance à la compression est due à la présence des fibres dans la matrice argileuse empêchant la propagation des fissures grâce à leur bonne adhérence à cette matrice à cause de leurs surfaces rugueuses. Pour des teneurs faibles en fibres, les adobes sont peu poreux comme le montrent les observations en vidéo-microscopie. Ce fait est aussi une preuve supplémentaire de l'augmentation de la résistance mécanique avec l'apport des fibres. Dans cette étude, la longueur des fibres est aussi un paramètre pouvant influer sur la résistance mécanique. En effet, plus les fibres sont longues, plus elles font augmenter la résistance à la compression en formant une sorte de pont de jonction entre elles et la matrice argileuse. La résistance optimale est obtenue pour les adobes à 0,2% de kenaf 3cm. Pour de fortes teneurs en fibres, la microstructure des adobes devient très hétérogène avec un entassement ou paquetage des fibres par endroit enduisant une forte porosité fermée. Dans ce cas, la résistance à la compression simple devient plus faible par rapport aux adobes naturels.

Les résultats de la flexion trois points des adobes sont présentés sur la **Figure 15**. Ces résultats révèlent que l'apport de fibres améliore la résistance à la flexion des adobes renforcés. Cette amélioration atteint 40% pour la teneur en fibres de 0,2% et longues de 3cm. Cette amélioration croit jusqu'à 0,2% de fibres longues de 3cm et 0,4% de fibres longues de 1,5cm puis décroit par la suite. D'une manière générale, pour un même pourcentage de fibres de kenaf, la plus grande résistance à la flexion trois points est obtenue pour les fibres de 3cm de longueur. En effet, plus les fibres sont longues dans une certaine limite, plus elles augmentent la résistance à la flexion en formant une sorte de pont de jonction dans la matrice argileuse. Cette amélioration de la résistance à la flexion s'explique principalement par la résistance à la traction élevée des fibres de kenaf liée à leur teneur élevée de la cellulose (70 % en masse) qui a une résistance à la traction élevée. La valeur de la résistance à la flexion est relativement élevée, comparée à celle des adobes renforcés par des fibres de *sisal* de 2 cm ou 5 cm (respectivement 0,23 et 0,25 MPa) [7]. Cette différence de résultat est liée à la composition biochimique des deux fibres. En effet les fibres de kenaf contiennent plus en cellulose que celles de sisal et donc auront une meilleure résistance à la traction et par conséquent améliorent plus la résistance à la flexion des adobes par rapport à celles du sisal.

L'importance de l'incorporation des fibres est qu'elles renforcent mécaniquement les adobes et empêchent la propagation des fissures après les chocs, augmentant ainsi la ductilité des adobes adjuvés. Ces phénomènes sont dus à la formation des ponts hydrogènes entre les hydrogènes et les doublets non liants des oxygènes [33] des deux matières premières entrant dans l'élaboration des adobes adjuvés en présence de l'eau et sous l'action du malaxage (frottements) qui active cette formation des liaisons par pont hydrogène.

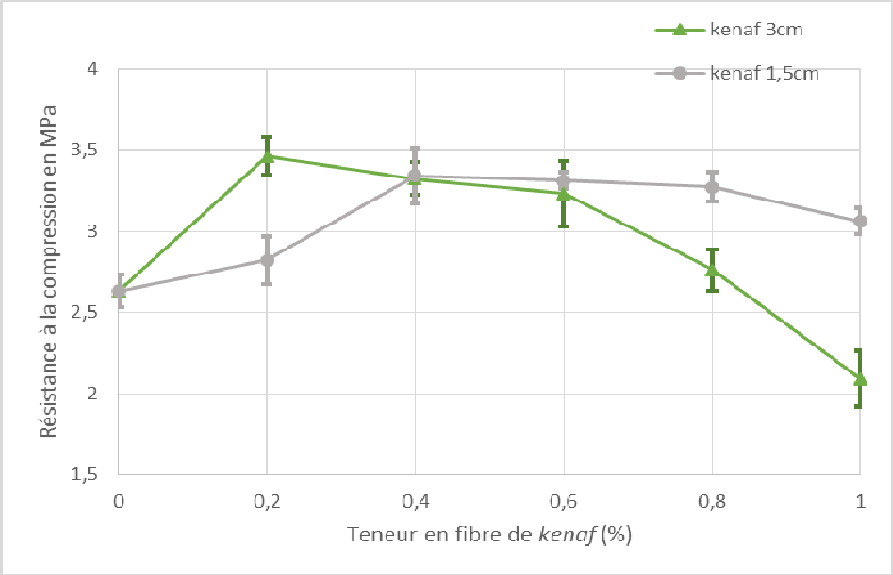


Figure 14 : Résistance à la compression des différentes formulations d'adobes

Pour connaitre le comportement des adobes à la rupture en flexion, des courbes contrainte-déformation (**Figure 16** et **Figure 17**) des adobes ont été enregistrées. Contrairement aux adobes non renforcés qui ont une rupture brutale, les adobes renforcés par les fibres de kenaf se comportent comme des matériaux élasto-plastiques en présentant au moins deux points de rupture. Ce comportement élasto-plastique des adobes est d'autant meilleur si les fibres sont longues (cas des fibres de 3cm). Une fois la rupture de la matrice argileuse, il y a reprise des charges par les fibres au niveau des adobes. Le premier point de rupture correspond à la rupture de la matrice argileuse et le second point ou post pic correspond à la rupture des fibres. Pour des formulations riches en fibres (1% en masse par exemple), le second pic de rupture qui survient avec une force plus importante que le premier est dû à une reprise des charges par les fibres plus résistantes en flexion que la matrice argileuse. Cela montre réellement l'effet des fibres sur la résistance à la flexion intimement liée à leur composition biochimique riche en cellulose. Cette propriété ductile des adobes est convenable pour la construction d'habitats avec de tels adobes.

Du point de vue de la résistance mécanique, les adobes élaborés sont convenables pour la construction d'habitats tenant compte de certaines normes en vigueur sur les matériaux de construction [34-35].

Le comportement hydrique des adobes adjuvés aux fibres végétales (composites biosourcés) est un aspect important de leur acceptabilité dans la construction. Pour cela nous avons donc exploré l'incidence de la présence des fibres de kenaf dans la formulation des adobes sur leur tenue à l'eau à travers le test d'érosion ou « spray test ». La **Figure 18** représente la perte en masse des adobes avec la teneur et la taille des fibres. Les adobes sans fibres sont plus érodés que ceux avec des fibres. Ce résultat est lié d'une part à la microstructure des adobes et d'autre part à la forte liaison entre les particules argileuses et les fibres de kenaf à cause de leur surface rugueuse et aussi par la possibilité de formation des liaisons par pont hydrogène entre ces deux matières premières. Ces ponts se forment entre l'hydrogène et les doublets non liants de l'oxygène provenant de l'argile (la kaolinite, la muscovite et la goethite) et des fibres (la cellulose, les hémicelluloses et la lignine). Ce comportement des fibres de kenaf dans l'adobe est également semblable à celui des racines des plantes qui luttent contre l'érosion en retenant le sol [2, 36-37] donnant ainsi une meilleure résistance aux adobes adjuvés de fibres à l'eau. L'érosion est généralement surfacique mais peut se faire par infiltration de l'eau à travers les fissures et les pores extérieurs. Les adobes adjuvés de 0,2 à 0,6% de fibres de kenaf présentent peu de fissures et de pores, subissent quasiment pas d'érosion et cela réduit considérablement la perte en masse de ces formulations lors de l'érosion

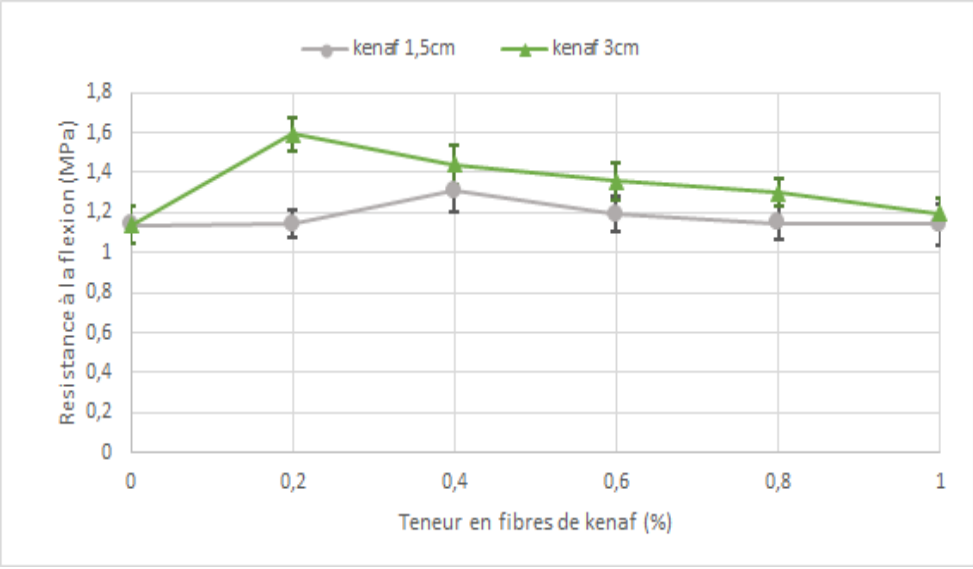


Figure 15 : Evolution de la résistance à la flexion des adobes

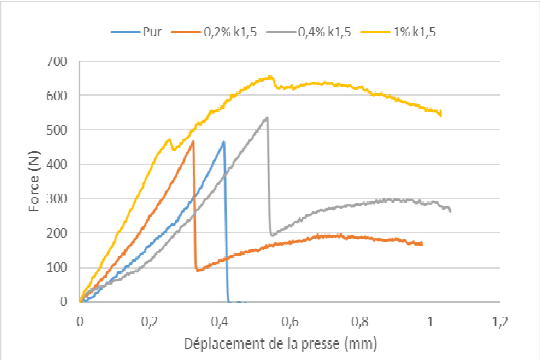


Figure 16 : Courbe de contrainte-déformation des adobes naturels et ceux adjuvés aux fibres de kenaf de 1,5cm

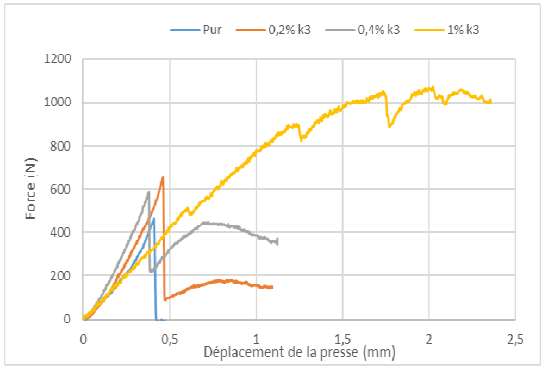


Figure 17 : Courbe de contrainte-déformation des adobes naturels et ceux adjuvés aux fibres de kenaf de 3cm

.

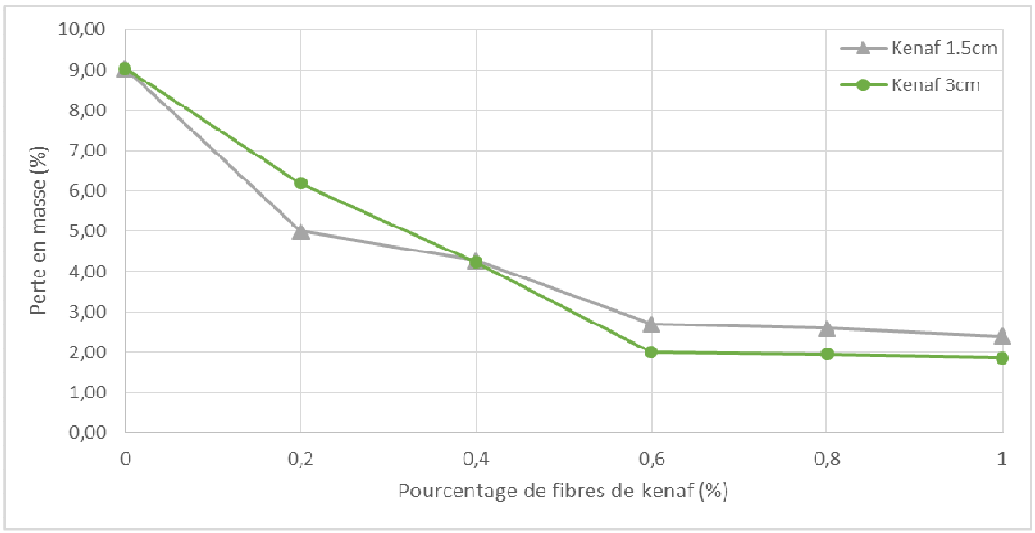


Figure 18 : Evolution de la perte en masse des adobes à l'érosion

4. Conclusion

Les propriétés physiques, mécaniques, les compositions chimique et minéralogique et la microstructure des fibres de kenaf de même que les propriétés microstructurales, physiques et mécaniques des adobes renforcés par ces fibres ont été étudiées. Les conclusions importantes issues de ce travail peuvent être résumées comme suit :

1. L'argile utilisée dans cette étude est constituée essentiellement de quartz (49%), de kaolinite (28%), de goethite (7%) et de muscovite (9%). Au regard des propriétés géotechniques de cette argile ; celle-ci est convenable pour l'élaboration des adobes.
2. Les fibres de kenaf ont une surface rugueuse et sont riches en cellulose (71%), hémicelluloses (20%) et lignine (4%).
3. L'incorporation des fibres de kenaf dans des adobes réduit la macroporosité et conduit à une microstructure plus homogène.
4. Les résistances à la compression et la flexion trois points des adobes adjuvés sont améliorées (excepté la résistance à la compression de celui à 1% de fibres 3cm) du fait d'une macroporosité plus faible et de l'effet de pontage de la fissure matricielle par les fibres de kenaf empêchant la propagation des fissures dans les adobes.
5. L'absorption d'eau des adobes adjuvés par des fibres de kenaf augmente à cause de l'hydrophilie des fibres de kenaf liée à leur teneur en cellulose.
6. La conductivité thermique des adobes baisse fortement avec l'ajout des fibres de kenaf due au caractère isolant de la cellulose contenue dans les fibres de kenaf et à l'augmentation de la microporosité.
7. Les propriétés mécaniques optimales sont obtenues des taux massiques de fibres de kenaf compris entre 0,2% et 0,4% pour les fibres de longueur variante de 1,5 à 3cm.

8. Les adobes adjuvés aux fibres de kenaf ont un comportement élasto-plastique avec deux pics de rupture dont le premier est lié à la destruction de la matrice argileuse et l'autre dû à la présence des fibres qui reprennent la charge après destruction de la matrice argileuse.
9. Les adobes élaborés ont une bonne tenue à l'eau à cause de la bonne adhérence entre les fibres de kenaf et la matrice argileuse.
10. Les travaux en cours portent sur la détermination des propriétés hygrothermiques, l'étude des isothermes de sorption-désorption en vue d'une utilisation potentielle de ces adobes dans le domaine de la construction.

5. Remerciements

Les auteurs de l'article remercient messieurs SANA Ali et KABORE Kalsibiri du Laboratoire National de Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) à Ouagadougou au Burkina Faso pour leur aide dans la réalisation des essais géotechniques et mécaniques. Ils remercient également le Docteur SANOU Jacob de l'Institut d'Environnement et de Recherche Agronomique (INERA) basé à Farakobâ (Bobo-Dioulasso, BURKINA FASO) pour leur avoir fourni les fibres de kenaf de leur champ expérimental.

6. Bibliographie

[1] Vandna S, Hemant KV, Bhanu MM. Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *Int. J. Sustainable Built Environ.* (2015), 4, 348-358.
[2] Danso H, Martinson DB, Muhammad A, John BW. Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Constr. Build. Mater.* (2015), 101, 797-809.
[3] Taallah B, Guettala A, Guettala S, Kriker A. Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Constr. Build. Mater.* (2014) 59, 161–168.
[4] Millogo Y, Morel JC, Aubert JE, Khosrow G. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Constr. Build. Mater.* (2014) 52, 71-78.
[5] Millogo Y, Aubert JE, Hamard E, Morel JC. How properties of kenaf fibers from Burkina Faso contribute to the reinforcement of earth blocks. *Materials* (2015) 8, 2332–2345.
[6] Alavéz-Ramirez R, Montes-Garcia P, Martinez-Reyes J, Altamirano-Juarez DC, Gochi-Ponce Y. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Constr. Build. Mater.* (2012) 34, 296-305.
[7] Mesbah A, Morel JC, Walker P, Ghavami K. Development of a direct tensile test for compacted soil blocks reinforced with natural fibers. *J. Mater. Civ. Eng.* (2004**)**, *16 (1)*, 95-8.
[8] Akil HM, Omar MF, Mazuki AAM, Safiee S, Ishak ZAM, Abu Bakar A. Kenaf fiber reinforced composites. *Mater. Des.* (2011) 32, 4107-4121.
[9] Ghavami K, Toledo FRD, Barbosa NP. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cem. Concr. Compos*. (1999), *21*, 39-48.
[10] Millogo Y. Stabilisation des Matériaux Locaux par des Liants Minéraux, Application au Génie Civil. Editions Universitaires Européennes, 2012, p.59.
[11] Sanou J, Ouedraogo I, Paré P, Sib/Kaboré J, Sandouidi N R, Bicaba BF, Soulama A. Manuel de production rentable de plante à écorce textile (Kénaf, Urena), *INERA/ANVAR* 2013, 13p.
[12] Mugnier J. Nouvelle flore illustrée du Sénégal et des régions voisines, 2008.
[13] Chabriac PA. Mesure du Comportement Hygrothermique du Pise, Thèse de 3ième cycle, de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2014-268 p.
[14] Van Soest PD, Wine RH. The use of detergents in the analysis of fibrous feed II: A rapid method for determination of fiber and lignin. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.* (1967), 50, 50-55.
[15] Fulgencio SC, Jaime C, Juan GR. Determination of hemicelluloses, cellulose, and lignin contents of dietary fibre and crude fiber of several seed hulls. *Data Comp.* (1983), 177, 200–202.
[16] Sawsen C, Fouzia K, Boutouil M, Gomina M. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. *Constr. Build. Mater.* (2015) 79, p. 229-235.
[17] Charlet K, Jernot JP, Breard J, Gomina M. Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres. *Ind Crops Prod* (2010), 32:220-4.
[18] Farmer VC. Infrared spectra of minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland (1974).
[19] Madejova J, Komadel P. Baseline studies of the clay minerals society source clays: Infrared Methods. *The Clay Minerals Society* (2001).
[20] Shin HK, Jeun JP, Kim HB, Kang PH. Isolation of cellulose fibers from kenaf using electron beam. *Radiat. Phys. Chem.* (2012), *81*, 936–940.
[21] Jonoobi M, Harun J, Tahir PM, Shakeri A, Saiful Azry S, Makinejad MD. Physicochemical characterization of pulp and nanofibers from kenaf stem. *Mater. Lett.* (2011**)**, *65*, 1098–1100.
[22] Lamia Y. Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss). Thèse de doctorat de l'Université FERHAT ABBAS-SETIF-UFAS, ALGERIE, 2011, p.23.
[23] Ismail S, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibres. *Pertanika J. Sci. Technol. (2011)*, vol. 19, no. 1, pp. 33–43.
[24] Assal HH. Influence of silica fume on the properties of fired then water cured lime-rich clay bricks. *Sil. Ind.* (2003) 68, (5-6), 55-60.
[25] Dias CMR, Cincotto MA, Savastano JH, John VM, Long-term aging of fiber-cement corrugated sheets. The effect of carbonation, leaching and acid rain. *Cem. Concr. Compos*. (2008) 21, 255-265.
[26] Dutta DK, Bordoloi D, Prakash C. Hydratation of portland cement clinker in the presence of carbonaceous material. *Cem. Concr. Res.* (1995) 25, 1095 –1102.
[27] Juárez C, Guevara B, Durán-Herrera A. Mechanical properties of natural fibers reinforced sustainable masonry. *Constr. Build. Mater.* (2010**)**, ***24***, 1536-41.
[28] Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cem. Concr. Compos*. (2005), *27*, 617-21.
[29] Godin B, Ghysel F, Agneessens R, Schmit T, Gofflot S, Lamaudière S, Sinnaeve G, Goffart JP, Gerin PA, 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.* (2010), 14, 549-560.
[30] Morel JC, Gourc JP. Behavior of sand reinforced with mesh elements. *Geosynth. Int*. (1997), 4, 481-508.
[31] Laibi AB, Poullain P, Leklou N, Gomina M, Sohounhloué DKC. Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks (CEB). KSCE *J. Civ. Eng.* (2017), (0000) 00(0):1-9.
[32] Meukam P, Noumowe A, Jannot Y, Duval R. Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilise en vue de l'isolation thermique de bâtiment. *Mater. Struct.* (2003) 36, 453-460.
[33] Sumit C, Sarada PK, Aparna R, Basudam A, Majumder SB. Effect of Jute as Fiber Reinforcement Controlling the Hydration Characteristics of Cement Matrix. *Ind. Eng. Chem. Res.* (2013), 52, 1252-1260.
[34] CID-GCB-NMBC-91-1, New Mexico Building code, 1991.
[35] CDI, CRAterre-EAG and ENTPE, Blocs de terre comprimée : procédures d'essais. Technologie n°16, CDI, Belgique, mars 2000.
[36] Huat BBK, Kazemian S. Study of root theories in green tropical slope stability. *Electr. J. Geot. Eng.* (2010) 15, 1825–1834.
[37] Michalowski RL, Zhao A. Failure of fiber-reinforced granular soil. *J. Geot. Eng.* (1996) 121, (2) 152–162.