

Properties of Compressed Earth Blocks Made of Traditional Materials from Benin Propriétés des Briques de Terre Compressées Réalisées à Partir de Matériaux Traditionnels du Bénin

Philippe Poullain^{1*}, Nordine Leklou¹, Armel Babatoundé Laibi^{1,2}, Moussa Gomina²

¹ Université de Nantes, GeM UMR 6183 - 58 rue Michel Ange, BP 420 - 44606 Saint Nazaire CEDEX, France

² CRISMAT UMR 6508, 6 Boulevard du Maréchal Juin, 14050 Caen CEDEX 4, France

Corresponding Author Email: philippe.poullain@univ-nantes.fr

<https://doi.org/10.18280/rcma.290407>

Received: 9 October 2018

Accepted: 19 January 2019

Keywords:

Compressed Earth Block (CEB), crude earth, kenaf, mechanical properties, thermal properties, Weibull Index

Mots-clés :

Briques de Terre Compressées (BTC), terre crue, kénaf, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, indice de Weibull

ABSTRACT:

The raw earth is a natural material originating from the slow decomposition of rocks and stones. It can be used as a construction material as cob, daub, wattle, adobe, moulded bricks, rammed earth or compressed earth blocks. The use of a specific technique depends on the vernacular habits and also on the climate to which the building will be submitted or on the intrinsic properties of the earth. In this paper, we study the thermal and mechanical properties of compressed earth blocks (CEB) made of raw earth from Benin. In order to improve the mechanical properties of this brittle material, especially the tensile stress, kenaf fibers are incorporated into the mix. To determine the influence of the fibers on the various properties of CEB, the fiber content and the fiber length was varied. The results show a strong influence of these parameters on the porosity and as a consequence on the thermal and mechanical properties (compressive and tensile strengths). The increase in the porosity of the material yields a decrease in the mechanical strengths whatever the fiber content, except for long fibers. This seems to demonstrate combined effects of the porosity decrease and of the resistance to traction efforts due to the fibers. The addition of fibers also induces a decrease in the thermal conductivity of the material mainly due to the increase in the porosity.

RÉSUMÉ :

Issue de la décomposition lente des roches, la terre crue est un matériau naturel utilisable dans la construction de bâtiments. Elle peut être mise en œuvre sous différentes formes (adobe, torchis, pisé, bauge...) en fonction des habitudes vernaculaires, du climat ou des propriétés intrinsèques du matériau. Dans cet article, on présente les résultats d'une étude sur les propriétés thermiques et mécaniques de briques de terre compressées (BTC) réalisées à partir d'une terre du Bénin. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques de ce matériau fragile, notamment en flexion, des fibres de kénaf sont ajoutées au mélange. Pour déterminer l'influence de l'incorporation de fibres de kénaf sur les diverses propriétés de ce composite terre crue, nous avons fait varier la concentration en fibres ainsi que la longueur des fibres. Les résultats montrent une forte influence de ces deux paramètres sur la porosité accessible à l'eau du matériau corrélée aussi bien aux résistances mécaniques en flexion et en compression qu'aux propriétés thermiques. L'augmentation de la porosité du matériau du fait de l'ajout des fibres entraîne une dégradation des résistances mécaniques quelle que soit la concentration, sauf pour les longueurs des fibres les plus grandes, semblant montrer un effet combiné de la diminution de porosité du fait de l'ajout des fibres et de la reprise des efforts de traction du fait de la forte résistance en traction des fibres. L'incorporation des fibres entraîne également une diminution de la conductivité thermique du matériau liée principalement à l'augmentation de la porosité.

1. INTRODUCTION

La terre crue est le matériau de construction naturel le plus utilisé pour la construction de maisons dans les régions au climat chaud, aride et tempéré. Selon les estimations d'Avrami [1], 30 à 50 % de la population mondiale occupe des constructions faites de matériaux à base de terre crue. Le fait que ce matériau local soit de surcroît disponible en grandes quantités et à faible coût est un avantage à son utilisation. De plus, les matériaux à base de terre crue peuvent être mis en œuvre dans les bâtiments à l'aide de techniques simples, bon marché et ne nécessitant pas de savoir-faire importants. La

majorité des bâtiments en terre peuvent être trouvés dans les pays du tiers-monde. Cependant, depuis presque une décennie, l'utilisation de la terre comme matériau de construction connaît un intérêt croissant dans les pays industrialisés, justifié par le désir de préserver le patrimoine architectural [2] et d'économiser les ressources naturelles (matières premières, énergie et espaces) par la construction de bâtiments plus respectueux de l'environnement.

En effet, par rapport aux matériaux de construction conventionnels, les matériaux à base de terre devraient être très intéressants d'un point de vue environnemental en raison :

- du faible impact environnemental de leurs transports,

- de la faible toxicité (si les matériaux sont extraits d'un sol non contaminé)
- de leur recyclabilité (lorsque les matériaux sont utilisés sans addition de liants artificiels)

Par exemple, il a été estimé que la construction d'un mètre carré de blocs de maçonnerie en terre consomme 15 fois moins d'énergie qu'une construction classique en parpaings [3]. En plus de ces facteurs environnementaux avantageux, les constructions en terre présentent d'excellentes performances en termes de stockage de la chaleur, d'inertie thermique, de résistance au feu, d'isolation phonique [4], de régulation de l'humidité dans les bâtiments.

Cependant, de nombreux défis doivent être relevés avant de pouvoir utiliser pleinement la terre ou le sol dans les bâtiments modernes. Le manque de normes et de spécifications pour la caractérisation du matériau et la conception des bâtiments à base de terre crue sont des freins au développement de ce matériau dans le contexte moderne de la construction. Notamment, les questions de la sensibilité à l'eau du matériau, de sa faible résistance mécanique et de sa faible ductilité nous incitent à trouver des solutions d'amélioration de ces propriétés. Cette amélioration peut être apportée par l'addition de faibles quantités de ciment pour stabiliser le matériau et augmenter la résistance des blocs de terre. Cependant, cette technique augmente le coût de production (qui devient comparable à ceux de solutions conventionnelles) ainsi que le coût environnemental de la solution. La propension à la fissuration en raison de la faible ductilité a été réduite par l'ajout de fibres animales, telles que la laine, ou de fibres végétales telles que la paille, le lin, le jute, le sisal [1-3]. Ces études ont montré que l'ajout de fibres permet de réduire le retrait de dessiccation du matériau et d'améliorer la résistance à la flexion du sol, même si les avantages potentiels réalisables grâce à l'ajout de fibres dépend à la fois du type de sol et des caractéristiques mécaniques des fibres. Par exemple, pour les adobes (briques moulée) renforcés aux fibres de kénaf, [5-7] ont déterminé une concentration massique optimale de 0,8 % pour une longueur de fibres de 30 mm. Cependant, il est nécessaire de combler le manque d'informations sur les performances en termes d'isolation thermique, de résistance à la flexion et à la compression et de résistance à la microfissuration.

Par conséquent, le présent travail vise à étudier l'effet de l'incorporation de fibres végétales de kénaf sur la porosité accessible à l'eau de briques de terre compressées (BTC), ainsi que sur les propriétés mécaniques (compression et flexion) et la conductivité thermique du matériau. Dans un premier temps, nous décrirons les matériaux utilisés et les formulations étudiées, puis nous présenterons les méthodes utilisées pour la caractérisation de ces formulations. Notamment, nous présenterons un modèle d'évolution de la porosité en fonction de la concentration et de la longueur des fibres.

2. MATERIAUX ET METHODES

2.1 Matériau

2.1.1 Terre

La terre utilisée provient de Baka dans la commune de Parakou (Bénin). Elle est utilisée traditionnellement pour la confection d'adobes et d'enduits pour le revêtement des toits et des murs. La teneur en eau naturelle du sol est faible

(3,71 %) et la masse volumique du sol non décompacté est de 2650 kg/m³.

L'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage par voie humide et par sédimentométrie pour la fraction fine (passant à 80 µm) afin de déterminer les pourcentages de sable (61,7 %), de limon (23,5 %) et d'argile (14,8 %). La texture du sol correspond donc à un sol limoneux-sableux (voir diagramme de texture sur la Figure 1).

La terre présente une teneur en matière organique inférieure à 2 % correspondant selon la classification des sols à un sol inorganique.

La perte au feu du sol est de 6,99 %. Elle correspond probablement à la déshydroxylation des minéraux argileux présents dans le sol et à leur décarboxylation.

La caractérisation géotechnique du sol a donné des limites d'Atterberg WL=28 %, WP=14 %, soit un indice de plasticité Ip=14 %. L'équivalent de sable du sol est égal à ES=13 % et la valeur au bleu de méthylène du sol est égal à VBS=1,1 g/100g. Le sol présente un optimum Proctor à 12 % de teneur en eau massique ($w=M_w/M_s$ où M_w est la masse d'eau dans l'échantillon et M_s est la masse de matériau solide) avec une masse volumique à l'état sec maximal de $\rho_{dry}=1846$ kg/m³.

L'analyse du sol par analyse thermogravimétrique (ATG) et infrarouge par transformée de Fourier montre que le sol est composé principalement de kaolinite (33,1 %) et illite (13,7 %), quartz (49,4 %) et anatase (0,8 %).

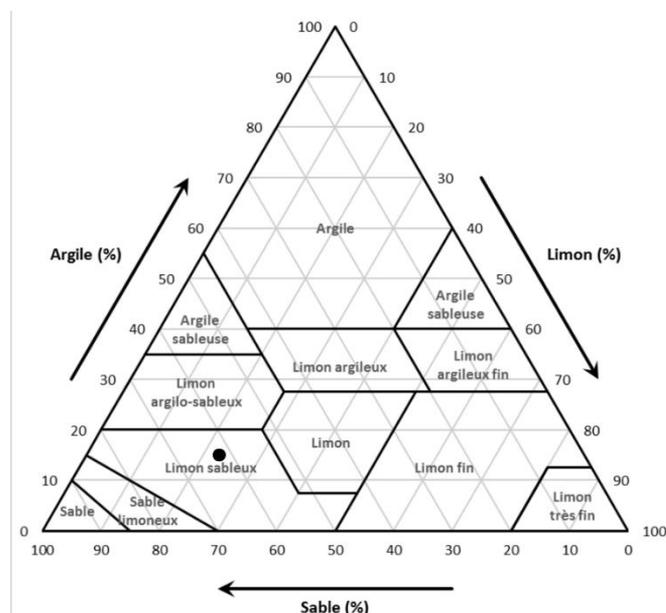


Figure 1. Diagramme de texture du sol

2.1.2 Fibres

Les fibres utilisées sont issues de kénaf (*Hibiscus Cannabinus L.*) cultivé et récolté à 6 mois dans la région de Parakou au nord du Bénin. Après récolte, les tiges sont préparées selon un protocole traditionnel et manuel par rouissage dans une eau de rivière puis défibrées manuellement.

Pour les besoins de l'étude, les fibres de kénaf sont coupées à différentes longueurs. La coupe s'effectue sur des faisceaux de fibres préalablement torsadés ensemble afin d'obtenir un toron de diamètre 1 cm qui est ensuite introduit dans un massicot et tendu. La réalisation d'un toron et sa tension pour la découpe permet d'éviter la dispersion des fibres au moment où la lame du massicot effectue la découpe. La coupe est alors plus nette que lorsque les fibres ne sont pas contraintes.

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) montre des diamètres de faisceaux de fibres variant entre 100 et 300 μm . Ces faisceaux sont constitués de plusieurs fibres élémentaires.

Les mesures réalisées par diffraction de rayon X à l'aide d'une source CuK α permet d'analyser la part cristalline des fibres végétales correspondant à un des états polymorphiques de la cellulose. Les analyses montrent une teneur importante en matières amorphes (lignine, hémicellulose et cellulose amorphe). Les fibres de kénaf ont un indice de cristallinité $I_c=49,2$.

L'analyse des fibres par analyse thermogravimétrique (ATG) et infrarouge par transformée de Fourier ont été réalisées sur les fibres séchées et broyées. Les analyses montrent que les fibres de kénaf contiennent 3 composants principaux : la cellulose (73 %), l'hémicellulose (18 %) et la lignine (6 %).

2.1.3 Préparation des échantillons

Les matériaux correspondant aux différentes formulations étudiées sont utilisés pour réaliser des briques de terre compressées.

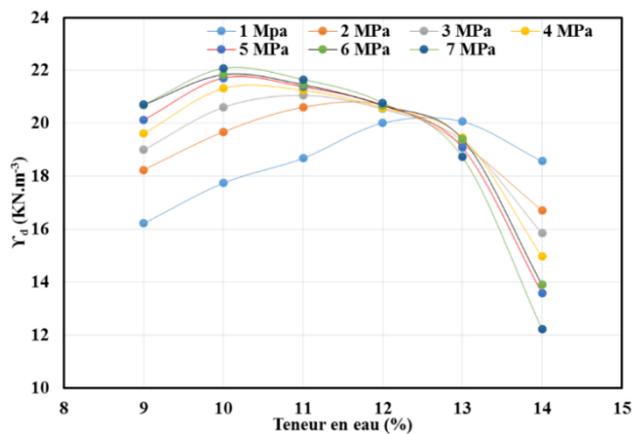


Figure 2. Essai Proctor statique réalisé à différentes contraintes de compactage sur les échantillons de terre seule

Pour cela, une étude préalable a permis de déterminer la teneur en eau optimale à fabrication permettant d'obtenir la plus forte compacité du matériau. La méthode est dérivée de l'essai Proctor dynamique et remplace le compactage dynamique par un compactage statique non drainé à vitesse contrôlée et contrainte homogène sur toute la surface de l'échantillon. La représentation de l'évolution de la masse volumique du matériau après compactage en fonction de la teneur en eau à la fabrication montre un optimum dénoté *optimum Proctor statique* (Figure 2). Cette teneur en eau de 10 % est la valeur retenue pour la confection des éprouvettes. La masse volumique du matériau est alors de 2138 kg/m^3 . L'essai permet également de connaître la masse volumique ρ_{max} du matériau final et ainsi de calculer la quantité de matériau à utiliser pour obtenir une éprouvette de la dimension souhaitée.

Le matériau est dans un premier temps préparé dans un malaxeur à mortier. Les matériaux secs sont tout d'abord introduits dans le bol puis malaxés à vitesse constante et faible durant 2 minutes afin de répartir les fibres dans le mélange et d'assurer une bonne homogénéité du mélange. Le temps de mélange est d'autant plus long que les fibres sont longues et difficiles à séparer. Ensuite, l'eau de gâchage est ajoutée en la

répartissant uniformément sur la surface de matériau sec. Le malaxage est alors poursuivi jusqu'à répartition homogène de l'eau dans le mélange.

Pour réaliser les éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm^3 , la masse de matériau correspondant au volume de 256 cm^3 est pesée et introduite dans le moule équipé d'une rehausse de hauteur suffisante pour accueillir la totalité du matériau. Ensuite, le matériau est compacté jusqu'à une contrainte de 5MPa (contrainte couramment rencontrée sur les presses à BTC industrielles). L'éprouvette est ensuite démoulée et stockée dans une chambre à température et humidité contrôlées (20 °C et 50 % d'humidité relative). Le durcissement du matériau sans liant est dû à son séchage. Un suivi de la masse de l'éprouvette est donc assuré jusqu'à stabilisation. Les essais de caractérisation sont réalisés une fois que l'éprouvette est en équilibre hygrothermique avec la salle de maturation.

2.1.4 Formulations étudiées

Dans cette étude, on s'intéresse à l'effet de l'ajout des fibres sur les propriétés mécaniques, thermiques et d'absorption d'eau des BTC. Pour étudier cet effet, nous faisons la quantité de fibres (3 concentrations massiques : 0,5 %, 1 % et 1,5 %) ainsi que la longueur des fibres (4 longueurs : 5, 10, 20 et 30mm). Une formulation de référence contenant de la terre seule a été également étudiée.

Au total, 12 formulations fibrées et une formulation de référence ont été étudiées.

2.2 Porosimétrie à l'eau

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 50mbar. Ensuite, le vide est maintenu pendant au moins 4h. L'éprouvette est ensuite immergée dans l'eau déminéralisée à mi-hauteur durant 48h, puis immergée complètement durant 24h supplémentaires. Les éprouvettes saturées sont alors 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 :

$$n = \frac{M_{sat} - M_S}{M_{sat} - M_{hyd}} \quad (1)$$

On peut déduire de la valeur de la porosité totale, la teneur en eau maximale qui correspond à la quantité d'eau maximale que l'échantillon peut retenir dans ses pores intragranulaires :

$$w_{max} = \frac{M_{sat} - M_S}{M_S} \quad (2)$$

2.3 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques, résistance à la compression et résistance à la flexion (trois points) sont réalisées grâce à une presse Zwick d'une capacité de 50kN.

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes 4x4x16 cm^3 . Tout d'abord, les éprouvettes sont centrées sur le bâti de flexion 3 points, sur lequel la distance entre appuis est fixée à $l=100$ mm. La force F est alors appliquée à une vitesse de

10mm/min soit jusqu'à rupture brutale de l'éprouvette (rupture fragile pour les éprouvettes non fibrées), soit jusqu'à une déformation de 10 % pour les éprouvettes fibrées. La contrainte normale de traction σ appliquée sur la section carrée de côté a de l'éprouvette est donnée par la relation :

$$\sigma = \frac{3Fl}{2a^3} \quad (3)$$

Ensuite, les deux morceaux de l'éprouvette sont récupérés afin de réaliser le test de résistance à la compression. Pour cela, l'éprouvette est posée entre les deux plateaux de la presse (plateau supérieur rotulé) et un dispositif anti-fretage constitué d'un patin de néoprène et d'une surface en téflon est placé entre l'éprouvette et le plateau. La force est ensuite appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette.

2.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique λ est mesurée à 20 °C et 50 % d'humidité relative à l'aide du dispositif HotDisk. La sonde utilisée est une sonde Kapton 5501 de 6,403cm de diamètre ($R_{ref}=6,717456W$, $TCR=0,004716K^{-1}$). La sonde de température est une sonde résistive assurant aussi bien le chauffage du milieu que la mesure de l'élévation de la température. La puissance de chauffage est de 280 mW pour les mesures sur BTC. La durée de la mesure est fixée à 40s afin de respecter les hypothèses de diffusion de la chaleur dans un milieu infini. La profondeur sondable est alors de 9,6 mm pour une distance minimale aux bords de l'éprouvette de 13 mm.

Les mesures non destructives sont réalisées sur deux éprouvettes 4x4x16 cm³ de même formulation. La sonde est placée entre les deux faces lisses de l'éprouvette sur l'axe médian, c'est à dire au plus loin des bords de l'éprouvette.

2.5 Module de Weibull des fibres

Les fibres de kénaf contiennent des défauts intrinsèques développés lors de sa croissance ou induits par les traitements mécaniques lors de son extraction. Une approche statistique selon le formalisme de Weibull a été menée sur les valeurs de contrainte à la rupture. Cette méthode 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).

Selon l'approche de Weibull, la probabilité de survie d'une fibre de longueur L soumise à une contrainte σ est donnée par la relation :

$$P_S = \exp \left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

où σ_0 est la contrainte caractéristique, L_0 la longueur moyenne de fibre ne contenant qu'un seul défaut, σ_u la contrainte seuil de rupture ($\sigma_u=0$ afin de simplifier l'analyse).

On en déduit que :

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_S} \right) \right] = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) + m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (5)$$

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 (méthode des moindres carrés). Cette pente est le paramètre de Weibull.

Il est ici déterminé pour différentes longueurs de jauge (5, 10 et 20 mm). Les fibres sont collées sur une feuille de papier et soumises à un effort de traction afin de déterminer la contrainte à la rupture. Les résultats des essais sont utilisés pour déterminer la probabilité de survie P_S d'une fibre en fonction de la contrainte à la rupture σ .

2.6 Modèle d'évolution de la porosité

La porosité d'un matériau composé de différentes phases peut être déterminée à partir de la porosité et de la concentration des différents constituants. Un modèle basé sur cette hypothèse peut être développé afin de prédire la porosité des différentes formulations étudiées et de déterminer les valeurs des paramètres de ce modèle à partir des données expérimentales.

Cependant, la prise en compte de la porosité et des concentrations des différents constituants mène à un modèle linéaire incapable de rendre compte de l'effet de la longueur des fibres sur la porosité. Or, il a été observé expérimentalement que la porosité des matériaux incorporant des fibres évolue en fonction de la longueur et de la concentration en fibres.

Pour tenir compte de ces deux effets (concentration et longueur des fibres), on suppose qu'il existe autour des fibres une interface poreuse de transition constituée du même matériau que la matrice, mais dont la porosité est différente et nécessairement plus élevée que celle de la matrice (décompactage du matériau à l'interface ou effet géométrique propre au matériau granulaire).

La porosité d'un matériau totalement sec est définie comme le rapport du volume d'air dans le matériau et du volume total de matériau.

Dans la suite, on note V le volume, M la masse d'un matériau et n sa porosité. Les indices m , f , i et a se réfèrent respectivement à la matrice (terre crue), aux fibres, à l'interface et à l'air. Par conséquent la porosité du matériau composite s'exprime :

$$n_T = \frac{V_{am} + V_{af} + V_{ai}}{V_m + V_f + V_i} \quad (6)$$

On peut faire apparaître dans cette équation les porosités des différents milieux :

$$n_T = \frac{n_m V_m + n_f V_f + n_i V_i}{V_m + V_f + V_i} \quad (7)$$

Soit :

$$n_T = \frac{n_m + n_f \frac{V_f}{V_m} + n_i \frac{V_i}{V_m}}{1 + \frac{V_f}{V_m} + \frac{V_i}{V_m}} \quad (8)$$

Or $\frac{V_f}{V_m} = \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f$ (avec $\alpha_f = \frac{M_f}{M_m}$) d'où :

$$n_T = \frac{n_m + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f n_f + n_i \frac{V_i}{V_m}}{1 + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f + \frac{V_i}{V_m}} \quad (9)$$

On suppose à présent que les fibres sont de diamètre moyen D et de longueur L et que la zone d'interface autour de la fibre

est d'épaisseur δ . Dans ce cas, le volume d'une fibre est $v_f = \frac{\pi D^2}{4} L$ et le volume de l'interface est $v_f = \frac{\pi(D+2\delta)^2}{4} (L + 2\delta) - \frac{\pi D^2}{4} L$.

Or, le nombre total de fibres N (et donc d'interfaces) dans le matériau peut être déduit du volume total de fibres et du volume d'une fibre.

$$N = \frac{V_f}{v_f} = 4 \frac{\rho_m \alpha_f V_m}{\pi D^2 L} \quad (10)$$

Soit le volume total d'interface :

$$\frac{V_i}{V_m} = \frac{N v_i}{V_m} = \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f \left[\left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)^2 \left(1 + \frac{2\delta}{L}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

Intégrons à présent ce résultat dans l'équation 9 :

$$n_T = \frac{n_m + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f \left[(n_f - n_i) + n_i \left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)^2 \left(1 + \frac{2\delta}{L}\right) \right]}{1 + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f \left(1 + \frac{2\delta}{D}\right)^2 \left(1 + \frac{2\delta}{L}\right)} \quad (12)$$

Dans le cas où il n'y a pas de zone d'interface, c'est à dire lorsque l'épaisseur de la zone d'interface $\delta=0$, on retrouve le modèle linéaire dans lequel les caractéristiques géométriques des fibres n'interviennent pas :

$$n_T = \frac{n_m + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f n_f}{1 + \frac{\rho_m}{\rho_f} \alpha_f} \quad (13)$$

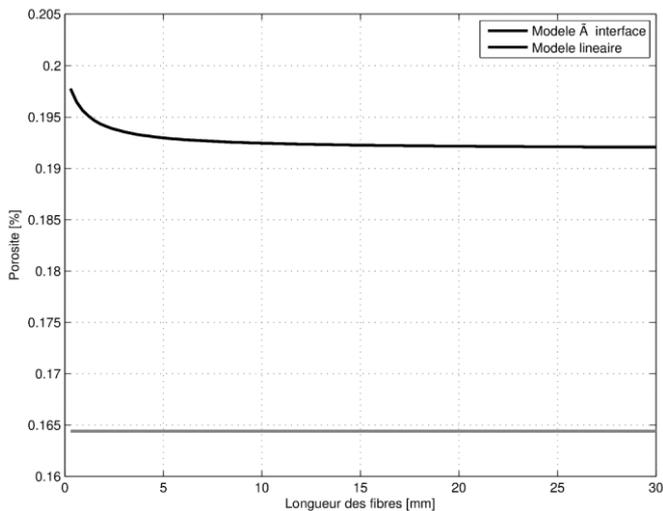


Figure 3. Évolution de la porosité en fonction de la longueur des fibres

Cette relation fait intervenir différents paramètres relatifs au mélange et à la zone d'interface entre les fibres et la matrice. Elle montre que la prise en compte d'une zone d'interface permet de modéliser l'influence de la longueur des fibres sur la porosité du matériau composite.

Pour montrer l'évolution de la porosité en fonction de la longueur des fibres et de leur concentration, on a représenté sur la Figure 3 l'évolution de la porosité pour une configuration donnée pour le modèle à interface et le modèle linéaire : seul le modèle à interface permet de traduire l'évolution de la porosité en fonction de la longueur des fibres

et de la concentration en fibres. Le modèle linéaire simple donne une valeur constante de la porosité.

Ce modèle montre que la porosité du matériau décroît avec la longueur des fibres et que l'ajout de fibres dans la matrice entraîne un brusque saut de porosité.

3. RESULTATS

3.1 Module de Weibull des fibres de kénaf

La Figure 4 représente l'évolution de $\ln[\ln(1/P_S)]$ en fonction de $\ln(\sigma)$ pour les différentes longueurs de jauge. Les courbes montrent une évolution linéaire conforme à la théorie de Weibull, ce qui permet de déterminer le module de Weibull m pour les trois longueurs de jauge. Les modules de Weibull pour la longueur 5 mm, 10 mm et 20 mm valent respectivement 10.7, 7.7 et 3.6. Le module de Weibull diminue donc avec l'augmentation de la longueur de jauge.

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 et des fibres de diss. 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.

3.2 Porosité accessible à l'eau

La Figure 6 présente l'évolution de la porosité accessible à l'eau pour les différentes formulations de BTC. Les courbes présentées permettent donc de comprendre l'effet du taux de fibres et de leur longueur sur l'évolution de la porosité. Cet effet pourra être corrélé à l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux dans les sections suivantes.

On remarque que la porosité accessible à l'eau est fortement influencée par la longueur des fibres et par leur concentration dans le matériau et que l'un comme l'autre paramètre entraîne une augmentation de la porosité par rapport à la porosité du matériau de référence constitué de terre crue uniquement. En effet, la porosité de cette dernière formulation est de 15,5 % et toutes les autres formulations ont une porosité supérieure.

L'ajout des fibres entraîne une augmentation importante de la porosité dès les faibles teneurs en fibres. En effet, on remarque une augmentation comprise entre 2,3 % et 3,5 % de la porosité pour les différentes formulations. Il semblerait de plus que des fibres plus courtes entraînent une augmentation plus importante de la porosité puisque comme l'indiquent les graphes, les courbes d'évolution de la porosité en fonction de la longueur des fibres sont décroissantes. Ceci peut être observé quelle que soit la concentration en fibres.

De plus, l'augmentation de porosité est d'autant plus importante que la concentration en fibres est importante. Les courbes correspondant aux différents teneurs en fibres sont ordonnées de la concentration la plus faible (courbe la plus basse) à la concentration la plus forte. Par conséquent, on peut en déduire que l'augmentation de la porosité du fait de l'ajout des fibres résulte de la porosité des composants de base (terre et fibres), mais peut également être due à des effets géométriques à l'interface entre les fibres et la matrice. En

effet, cette interface peut présenter une porosité plus forte de la matrice sur une distance plus ou moins grande à la surface de la fibre.

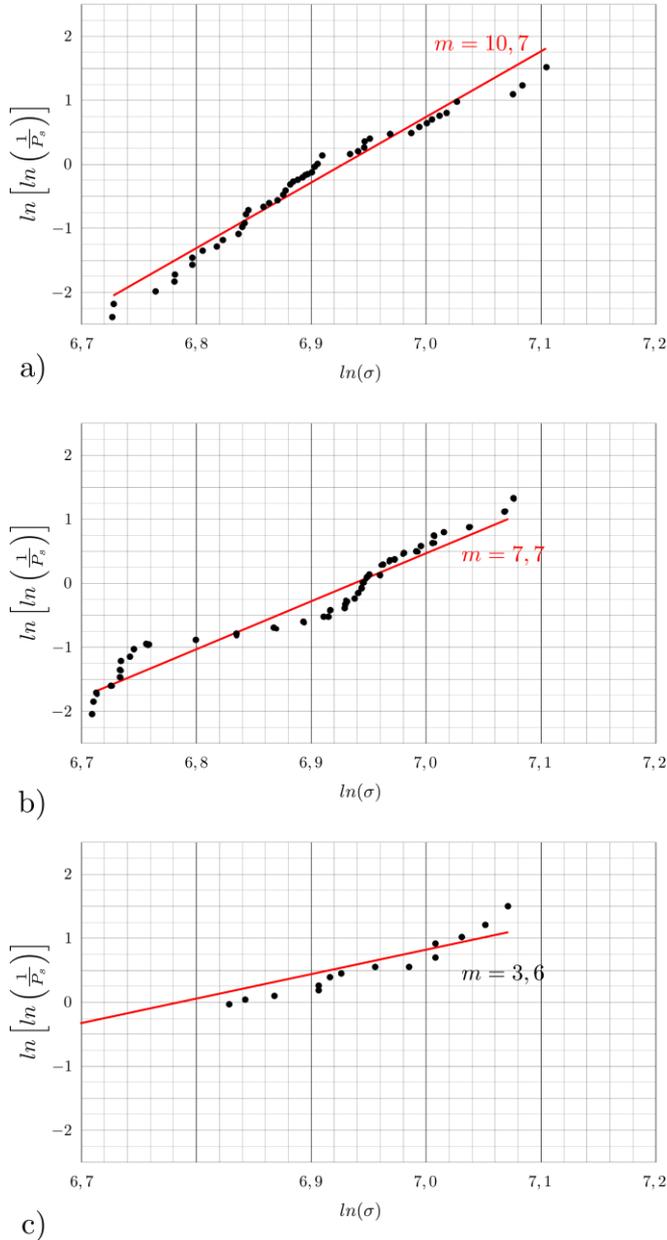


Figure 4. Représentation de $\ln(\sigma)$ en fonction de $\ln(\ln(\frac{1}{P_s}))$ pour différentes longueurs de jauge des fibres de Kénaif et détermination du module de Weibull - a) $l=5$ mm ; b) $l=10$ mm ; c) $l=20$ mm

Le modèle présenté dans la section 2.6 permet de représenter l'effet de la concentration en fibres et de la longueur des fibres. Le modèle permet d'obtenir des courbes de même allure que les courbes expérimentales et on peut donc utiliser le modèle pour déterminer les paramètres représentatifs du mélange que sont l'épaisseur d'interface δ et la porosité d'interface n_i . Pour cela, on a adapté le modèle à interface aux données expérimentales obtenues pour chaque concentration en fibres. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. On peut voir que les paramètres évoluent en fonction de la concentration en fibres et que notamment la porosité de l'interface est d'autant plus faible que la concentration en fibres est grande. Pour la plus faible concentration en fibres, la porosité de l'interface est proche de 1 dénotant un fort

décompactage de la matrice à l'interface. Les données montrent également que l'épaisseur de l'interface est grande pour la plus faible concentration et diminue lorsque la concentration en fibres augmente pour atteindre une valeur de 3,2 mm. Le modèle semble donc montrer que les fibres influencent fortement le compactage du milieu et que la perturbation de la compacité du fait de la présence des fibres se propage très loin des fibres en comparaison de leur diamètre. Cependant le modèle est sensible au diamètre moyen des fibres D et nous avons observé que la phase de malaxage de la terre et des faisceaux de fibre entraîne une séparation des fibres d'autant plus efficace que le malaxage est long. Le diamètre des faisceaux de fibre diminue donc au cours du malaxage et il est alors difficile de connaître *a posteriori* le diamètre moyen réel des fibres, qui est un des paramètres du modèle. Les résultats présentés ont été obtenus avec un diamètre de fibre $D=200\mu\text{m}$ (diamètre moyen observé au MEB).

Tableau 1. paramètres du modèle à interface obtenus à partir des données expérimentales

α_f	δ	n_i
[%]	[μm]	[%]
0,5	5,2	93
1,0	3,3	90
1,5	3,2	77

3.3 Propriétés mécaniques

La Figure 7 présente la variation de la résistance à la compression simple des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs en fibres. La valeur correspondant à une longueur de fibre de 0 mm correspond en réalité à la formulation de référence ne contenant que de la terre.

La résistance à la compression des BTC diminue avec l'ajout des fibres de 5, 10 et 20 mm quel que soit le taux considéré. On note une légère augmentation de la résistance à la compression simple de 8,5 ; 4,94 et 3,02 % respectivement pour une teneur en fibres de 0,5 ; 1 et 1,5 % de longueur 30 mm. Ce comportement à la compression simple des BTC vis-à-vis des fibres est corrélé à la porosité de ces composites. Les résultats de porosité à l'eau ont montré en effet dans la section précédente que ce paramètre évolue en fonction de la concentration en fibres et de leur longueur. 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 est 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 [7] qui a étudié l'effet de l'ajout de 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. Ceci 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 aux valeurs obtenues par [7] ce qui traduit l'amélioration de la résistance mécanique du fait du compactage.

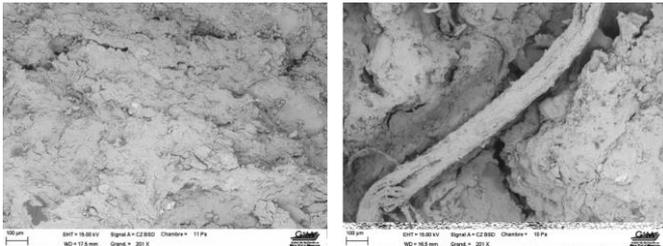


Figure 5. Images MEB de la terre seule (à gauche) et d'une fibre (à droite) montrant le déchaussement de la fibre et de la matrice après l'essai de flexion

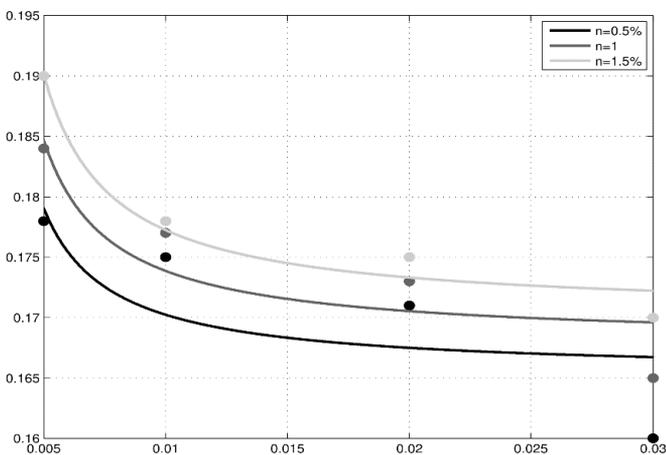


Figure 6. Évolution de la porosité accessible à l'eau des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs en fibres

En ce qui concerne la résistance à la flexion des BTC, les résultats, présentés sur la Figure 8, montrent également une évolution des propriétés en fonction de la longueur et de la concentration en fibres. L'ajout de fibres entraîne dans un premier temps une diminution de la résistance à la flexion quelles que soient la concentration ou la longueur puis après passage par une valeur minimale pour une longueur de fibre de 20mm, la résistance à la flexion augmente. La même tendance est observée pour la concentration de 1,5 %, mais avec une valeur minimale obtenue pour des fibres de 10mm de longueur. On peut attribuer ce comportement au fait que l'ajout des fibres entraîne dans un premier temps une augmentation de la porosité qui tend à diminuer la résistance à la flexion, mais le fait d'ajouter des fibres de plus grande longueur diminue ensuite la porosité et augmente la surface de contact entre la fibre et la matrice et améliore donc les propriétés mécaniques en flexion. En effet, les fibres présentent une résistance à la traction plus élevée que la matrice et permettent donc de renforcer le matériau. Outre l'augmentation de la résistance à la flexion du matériau, on note également un changement d'un comportement fragile à un comportement ductile. La terre seule présente un comportement fragile avec rupture nette et perte de résistance

dès la force maximale atteinte, alors que l'ajout des fibres entraîne une reprise des efforts de traction par celles-ci et un maintien du matériau au-delà du pic de contrainte.

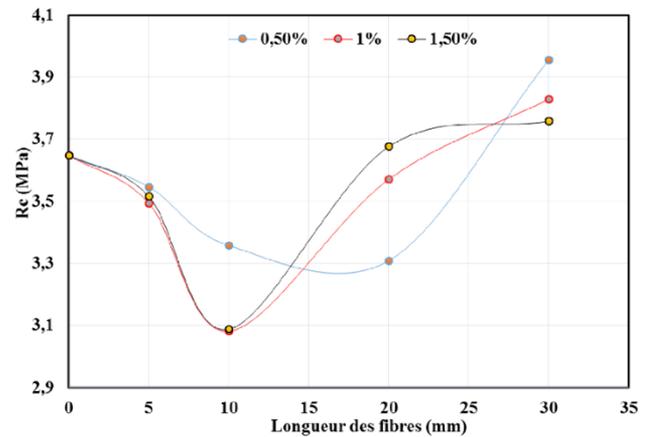


Figure 7. Évolution de la résistance à la compression des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs en fibres

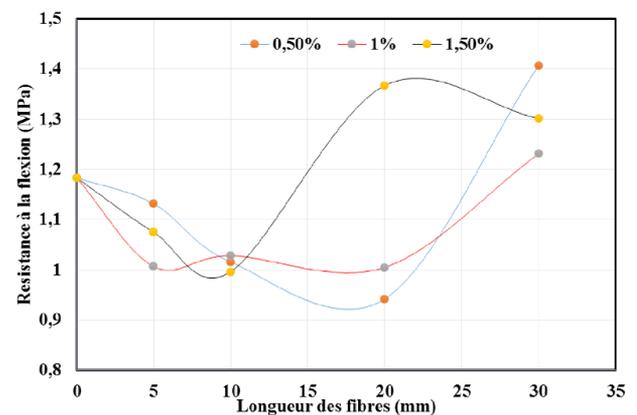


Figure 8. Évolution de la résistance à la flexion des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs en fibres

Les mesures de résistance à la compression et à la flexion montrent donc qu'il existe un réel intérêt à l'incorporation de fibres de kénaf dans des matrices en terre crue, afin d'améliorer leur résistance mécanique et de leur conférer un comportement ductile. Cependant, il existe une longueur minimale en dessous de laquelle l'ajout des fibres est préjudiciable à la résistance du matériau du fait de l'augmentation de porosité occasionnée par cet ajout. Lors de l'ajout des fibres, il existe donc une compétition entre l'augmentation de la porosité (préjudiciable à la tenue mécanique), l'augmentation de la surface de contact fibre/matrice et la reprise d'efforts par les fibres du fait de leur forte résistance à la traction.

3.4 Conductivité thermique

La Figure 9 présente l'évolution de la conductivité thermique des composites à base de terre crue pour les différentes formulations étudiées.

La matrice en terre crue a une conductivité thermique de $1,7W/m.K$. La terre crue mise en œuvre sous la forme de briques de terre compressées n'est donc pas un matériau isolant et présente des propriétés thermiques plus élevées que

celle du béton par exemple. L'ajout de fibres a pour effet de diminuer la conductivité thermique du matériau. On obtient des valeurs pouvant descendre jusqu'à environ $1,2 \text{ W/m.K}$, soit une diminution de la conductivité thermique de près de 30 %. En effet, les fibres ont une conductivité thermique plus faible que celle de la matrice ce qui entraîne cette diminution. De plus, on a vu plus haut que l'ajout des fibres augmente dans un premier temps la porosité du matériau, qui de ce fait devient plus isolant. L'effet de l'ajout des fibres est d'ailleurs d'autant plus important que la concentration en fibres est importante. Cependant, pour les grandes longueurs de fibres, on constate une diminution de la conductivité thermique alors même que la porosité diminue. En effet, la conductivité thermique d'un matériau composite ne peut être déterminée à partir d'une simple loi de mélange se basant sur une pondération des conductivités thermiques des composants par leurs concentrations car les chemins de transfert de la chaleur dans le matériau influencent également la conductivité thermique. Par conséquent, on peut en déduire que des fibres plus longues constituent des chemins résistants au transfert de la chaleur plus longs, entraînant cette diminution.

Malgré la forte diminution de conductivité thermique grâce à l'ajout de fibres, il n'est pas possible d'obtenir des valeurs très faibles car la compression du matériau pour la réalisation des BTC entraîne une faible porosité. Or, il est généralement admis qu'il existe, pour un matériau donné, une corrélation entre la conductivité thermique et la masse volumique du matériau, et donc sa porosité. L'obtention de bonnes propriétés thermiques (matériau isolant) avec des matériaux de forte compacité est donc difficile.

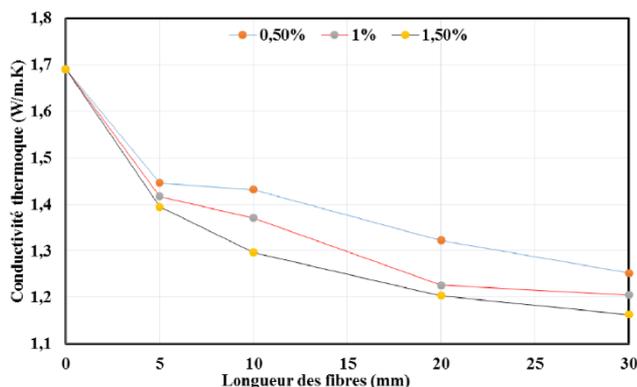


Figure 9. Évolution de la conductivité thermique des BTC en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs en fibres

4. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les résultats de l'incorporation de fibres de kénaf sur la porosité accessible à l'eau, les résistances à la flexion et à la compression et la conductivité thermique de matériaux composites à base de terre crue compressée du Bénin (limon sableux). Les matériaux sont préparés par compression jusqu'à 5 MPa , permettant d'obtenir des briques de terre compressée de forte masse volumique. La contrainte de compression optimale a été déterminée à partir d'un essai Proctor statique non drainé reproduisant les conditions de mise en œuvre des BTC. Les matériaux testés ont été confectionnés à différents teneurs en

fibres et la longueur des fibres a été modifiée d'une formulation à l'autre.

Les mesures de porosité accessible à l'eau réalisées sur les différentes formulations ont permis de montrer qu'il existe un lien direct entre la porosité et la composition du matériau et que cette porosité diminue avec la longueur des fibres alors qu'elle augmente lorsque la concentration en fibres augmente. Le modèle de prédiction de la porosité présenté ici et tenant compte de l'existence d'une interface poreuse entre les fibres et la matrice en terre compressée montre qu'il est possible de reproduire le comportement observé expérimentalement. La détermination des paramètres du modèle pour les différentes formulations montre que l'interface entre les fibres et la matrice présente une porosité plus élevée que la matrice et que la perturbation du compactage du matériau par les fibres s'étend très loin de celles-ci (plusieurs fois le diamètre de fibre). Cependant, le modèle présenté ici fait intervenir le diamètre des fibres qui est difficile à déterminer puisque la phase de malaxage a tendance à séparer les fibres initialement regroupées en faisceaux. Cette séparation est d'autant plus importante que le temps de malaxage est long.

De plus, les mesures des propriétés mécaniques des BTC ont montré que le comportement mécanique est fortement influencé par la présence des fibres et que le comportement des BTC résulte d'un effet combiné de la diminution de porosité provoquée par l'ajout de fibres et du renforcement du matériau provoqué par la reprise des efforts de traction par des fibres présentant une forte résistance à la traction. Les résultats montrent qu'il existe une longueur de fibre optimale au-delà de laquelle l'ajout des fibres présente un intérêt. En deçà de cette longueur c'est l'augmentation de porosité du matériau qui dicte le comportement mécanique, ce qui entraîne une dégradation des propriétés mécaniques aussi bien en flexion qu'en compression. Cependant, malgré la dégradation des résistances en compression et en flexion en deçà de la longueur optimale, on constate le passage d'un comportement fragile du matériau non fibré à un comportement ductile, ce qui présente un intérêt pour la construction.

Par ailleurs les mesures de conductivité thermique du matériau ont montré l'influence de la quantité et de la longueur des fibres sur l'évolution de cette propriété du matériau. Les résultats montrent une nette diminution de la conductivité thermique avec l'ajout des fibres, qui est principalement due à deux effets : l'ajout d'un matériau de faible conductivité thermique et la diminution de la porosité du fait de l'incorporation des fibres par rapport au matériau non fibré.

Par conséquent, les diverses propriétés mesurées sur les BTC montrent une forte influence de la porosité du matériau, elle-même dictée par la concentration en fibres et par la longueur des fibres.

RÉFÉRENCES

- [1] Avrami, E.C., Guillaud, H., Hardy, M., (2008). Terra literature review: An overview of research in earthen architecture conservation. Getty Conservation Institute.
- [2] Mileto, C., Vegas, F., Cristini, V. (2012). Rammed Earth Conservation. CRC Press, Boca Raton.
- [3] Zami, M., Lee, A.J. (2010). Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – state-of-the-art review. *Journal of Building Appraisal*, 5(3): 259-271. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.32>

- [4] Hall, M.R., Casey, S. (2012). Hygrothermal behaviour and occupant comfort in modern earth buildings. *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, 17-40. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.1.17>
- [5] Quagliarini, E., Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3): 309-314. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.012>
- [6] Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L., Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122: 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
- [7] Millogo, Y., Aubert, J.E., Hamard, E., Morel, J.C. (2015). How properties of kenaf fibers from burkina faso contribute to the reinforcement of earth blocks. *Materials*, 8(5): 2332-2345. <https://doi.org/10.3390/ma8052332>