

Évaluation des propriétés thermo-hydro-mécaniques des briques en terre compressée (BTC) issues de la carrière de Matourkou, au Burkina Faso

Sayouba KABRE^{1*}, François OUEDRAOGO¹, Bétaboalé NAON¹, Adamah MESSAN²,
Jean Claude BENET³ et François ZOUGMORE¹

¹ Université Ouaga I Pr J.KI ZERBO, UFR / SEA, Département de Physique, Laboratoire de Matériaux et Environnement (L.A.M.E), BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso

² International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Département de génie civil, Laboratoire d'Eco Matériau et Habitats Durables (L.E.M.Ha.D), BP 594 Ouagadougou, Burkina Faso

³ Université de Montpellier CC 048, Laboratoire de Mécanique et Génie civil (L.M.G.C), UMR 5508, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5

* Correspondance, courriel : kabreuniv.ouaga@gmail.com

Résumé

Cet article porte sur la caractérisation thermo-hygro-mécanique des briques en terre compressée (BTC). Une localisation du site d'où est extraite la latérite ainsi qu'une présentation des dispositifs expérimentaux et certains paramètres physiques ont été faite. Avant l'analyse de l'effet de l'eau sur les caractéristiques thermophysiques des briques, une caractérisation minéralogique et géotechnique de la latérite a été proposée. C'est ainsi que les essais de mouillage-séchage, d'absorption d'eau par capillarité et les isothermes de désorption des briques ont été réalisés. Enfin les essais mécaniques proposés ont été porté sur l'effet de l'eau sur les résistances à la compression et à la flexion. Les résultats cette étude ont montré que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique augmentent respectivement 71 %, 38 % et 68 % avec la teneur en eau passe de 0,04 à 11,9 %. Les résultats montrent également que les résistances en compression décroissent avec l'augmentation de la teneur en eau des briques.

Mots-clés : *matériaux locaux, BTC, propriétés mécaniques, paramètres hydro-thermiques.*

Abstract

Evaluation of thermo-hydro-mechanical properties of compressed earth bricks (BTC) from Matourkou quarry in Burkina Faso

This article focuses on the thermo-hygro-mechanical characterization of compressed earth bricks (BTC). A location of the site from which the laterite is extracted as well as a presentation of the experimental devices and certain physical parameters were made. Before analyzing the effect of water on the thermophysical characteristics of bricks, a mineralogical and geotechnical characterization of laterite has been proposed. Thus the tests of wetting-drying, water absorption capillarity and desorption isotherms were carried out. Finally, the proposed mechanical tests were focused on the effect of water on the compressive and flexural strengths. The results of this study showed that the thermal conductivity, the thermal diffusivity and the thermal effusivity respectively increase 71 %, 38 % and 68 % with the water content ranging from 0.04 to 11.9 %. The results also show that compressive strength decreases with increasing water content of the bricks.

Keywords : *local materials, BTC, mechanical properties, hydro-thermal parameters.*

1. Introduction

Le Burkina Faso, pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest, est caractérisé par un climat tropical chaud et sec. Les amplitudes thermiques connaissent de fortes variations saisonnières ainsi que des variations diurnes/nocturnes. Ces variations ont tendance à croître avec les changements climatiques. L'utilisation des matériaux conventionnels tels que le béton, de par leur propriété thermique rend plus perceptible ces variations dans l'habitat. En plus, l'usage des matériaux cimentaires impacte négativement sur l'environnement [1, 2] de même sur l'habitat en terme de confort thermique. Par ailleurs, dans un contexte international marqué par un déséquilibre énergétique et des changements climatiques, la conception de systèmes constructifs écologiques et à faible consommation d'énergie s'impose de plus en plus. Ainsi, de nos jours, les constructions en terre constituent une alternative prometteuse par rapport aux constructions avec des matériaux conventionnels au regard des enjeux économiques et environnementaux. Ce type de constructions est alors conforme aux objectifs en matière de développement durable notamment en raison des propriétés thermo-physiques des composants et de la recyclabilité des matériaux à la fin du cycle de vie de l'habitat [3]. En effet pendant ces dix dernières années, l'utilisation des briques en terre comme matériau de construction durable, a entraîné un important regain d'intérêt. Pour ainsi dire, parmi les œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco, environ 15 % sont construites en terre [4]. A cet effet les travaux antérieurs ont montré que le bois et les briques en terre ont une meilleure performance thermique par rapport aux parpaings de ciment [5].

C'est à juste titre que les matériaux de construction en terre tels que les briques en argile cuite, les tuiles et les briques en terre comprimée ont été retenus comme matériaux à grande inertie thermique [6]. Quant aux propriétés mécaniques, certains travaux dans la littérature montrent que les résistances mécaniques (flexion et compression) s'améliorent en fonction du taux et de la nature de stabilisants [3, 7, 9]. [6] ont montré que l'incorporation du ciment dans les briques en terre comprimée entraîne la variation de leurs propriétés thermomécaniques. Cependant la plupart des matériaux poreux, en particulier ceux utilisés dans les constructions en terre sont sensibles à l'eau. Par ailleurs l'accumulation d'eau dans les matériaux de construction, notamment ceux des briques en terre a un impact sur les propriétés d'usage de ces briques. En somme, si certaines propriétés thermomécaniques des briques en terre sont connues en fonction du taux et de la nature de stabilisants, ce n'est le cas pour les propriétés thermomécaniques en fonction de la teneur en eau. En fait, peu d'études approfondies semblent avoir été réalisées sur l'influence de l'eau sur les propriétés thermo-physiques des briques en terre compressée. L'originalité du travail de recherche présenté dans cet article réside donc dans le fait d'associer l'effet de l'eau sur les paramètres thermo-physiques des briques en terre compressée. Ainsi l'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de l'eau sur les propriétés thermo-physiques et mécaniques des briques en terre compressée.

2. Matériel et méthodes

Dans cette partie du travail, il s'agit de préciser les différents outils utilisés et ainsi que le mode opératoire.

2-1. Localisation du site de prélèvement du matériau de base utilisé

Le matériau de base utilisé est extrait d'une carrière située à Bobo Dioulasso plus précisément à côté de la localité de Matourkou avec les coordonnées GPS suivantes : 11°9'21 Latitude Nord et 4°19'46 Longitude Ouest. La carrière est exploitée de façon artisanale par les riverains. C'est une carrière facilement accessible car située à environ 300 m d'une voie bitumée.

2-2. Dispositifs expérimentaux

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément aux normes NF EN ISO 17892 pour le tamisage et pour la sédimentométrie. Quant aux essais des limites d'Atterberg et de la valeur au bleu de méthylène, ils ont été conduits suivant respectivement les normes NF P94-051, NF P94-068 et enfin l'essai Proctor normal suivant la norme NF P94-093. La perméabilité à saturation a été à l'aide d'un perméamètre à charge variable. L'étude minéralogique a été obtenue à l'aide du diffractomètre Brüker D5000 à monochromateur arrière en graphite, fonctionnant sous une tension de 40 kV et une intensité de 50 mA avec la raie $K\alpha_1$ du cuivre, piloté par un ordinateur muni d'un logiciel Diffracplus D quant version 2.2. Le temps d'acquisition est de 60 minutes. Les appareils utilisés pour évaluer les paramètres thermiques, hygrothermiques, mécaniques et minéralogiques sont respectivement, KD2 Pro (**Figure 1a**), l'enceinte climatique (**Figure 1b**), la presse mécanique de capacité 300 kN sous un chargement de 0,25 kN/s dont une vue partielle est présentée sur la **Figure 2a** et diffractomètre Brüker D5000 (**Figure 2b**).

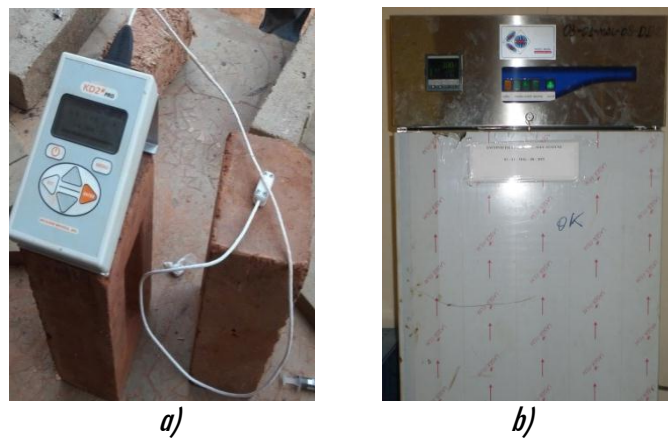


Figure 1 : Photos du dispositif KD2 Pro (a) et de l'enceinte climatique (b)

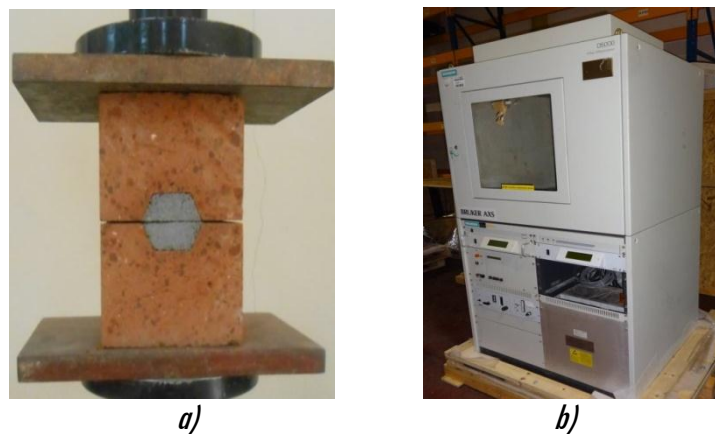


Figure 2 : Photos de la presse (a) et du diffractomètre brüker D5000 (b)

2-3. Paramètres physiques et thermo-hydro-mécaniques des BTC

Les paramètres physiques déterminés sont la masse volumique apparente ρ et la porosité accessible à l'eau n conformément à la norme ISO 5017. Ils ont été obtenus à l'aide des **Formules respectives (1), (2)** par le biais d'une pesée hydrostatique :

$$\rho = \frac{m_{sec}}{m_a - m_w} \rho_w \quad (1)$$

$$n = \frac{m_a - m_{sec}}{m_a - m_w} \quad (2)$$

avec m_{sec} la masse de l'échantillon sec, m_a la masse de l'échantillon saturé mesuré dans l'air et m_w celle de l'échantillon saturé mesuré sous l'eau et ρ_w la masse volumique de l'eau.

Les propriétés thermo-hydriques ont été déterminées à l'aide de l'appareil KD2 Pro. Ce dispositif utilise le modèle résolution de l'équation de transfert de chaleur par la méthode de propagation de source de chaleur linéaire en régime transitoire dans un milieu semi-infini, équation publiée dans les normes IEEI [8]. Avant le début des mesures, les briques ont d'abord été saturées dans de l'eau distillée à $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse des échantillons (environ 28 jours après immersion. Ensuite, après chaque mesure, les briques sont placées dans un four à micro-onde à 105°C pour enfin évaluer leur teneur en eau. Les grandeurs mesurées sont :

- La conductivité thermique λ qui représente l'aptitude du matériau à transmettre un flux de chaleur sous l'effet d'un gradient de température ;
- La diffusivité thermique a , elle caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle est donnée par **l'Équation (3)**.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (3)$$

La chaleur massique C qui est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un (01) degré Celcius (1°C) la température de l'unité de masse du matériau. L'effusivité thermique E qui caractérise la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau s'élève. Elle est donnée par **l'Équation (4)**.

$$E = \sqrt{\lambda \rho C} \quad (4)$$

L'isotherme de désorption des échantillons est obtenue en imposant à des échantillons, préalablement saturés, des humidités relatives suivantes : 0 %, 15 %, 55 %, 80 %, 85 % et 90 % à 20°C . Ensuite un suivi journalier de la masse permet de suivre la variation de masse de l'échantillon. Enfin une évaluation donc de la quantité d'eau perdue par l'échantillon est réalisée. Les échantillons ont d'abord été saturés à 20°C . Cette expérience a été réalisée à l'aide de l'enceinte climatique **Figure 1b**. Les résistances à la compression R_c (MPa) et à la flexion R_f (MPa) ont été déterminées conformément à la norme XP P13-901 par les **Équations (5) et (6)** [3, 7].

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (5)$$

$$R_f = \frac{3}{2} \frac{L - 100}{le^2} F \quad (6)$$

avec F (en N) la force maximale d'écrasement, S (en mm^2) la surface d'appuis, L , l , e (en mm) représentent respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de la brique.

3. Résultats et discussion

Nous choisissons ici de présenter de manière synthétique les valeurs numériques moyennes obtenues lors des différents essais. Une interprétation des différents résultats est également proposée dans la suite.

3-1. Propriétés minéralogiques et géotechniques du matériau de base.

La composition minéralogique de la latérite est donnée par la **Figure 3**. Il a été obtenu à l'aide du diffractomètre Brüker D5000.

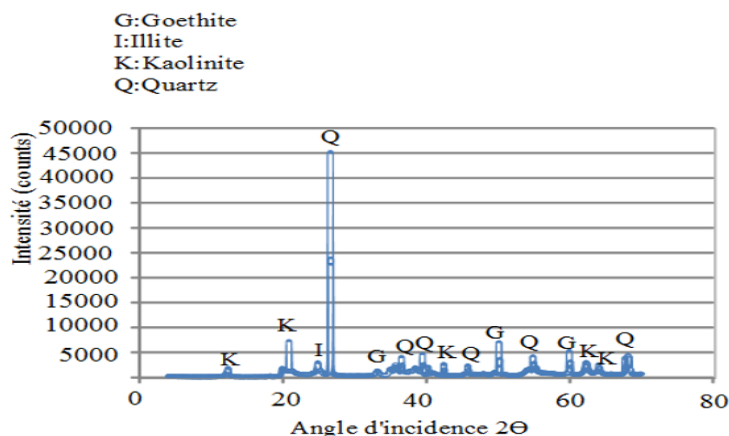


Figure 3 : Diffractogramme du matériau de base

Le diffractogramme du matériau de base est représenté sur la **Figure 3**. Il montre que le matériau est constitué essentiellement du quartz, de la goéthite, de la kaolinite et de l'illite. Nous remarquons une proportion de quartz très importante dans le matériau. Ces phases minérales sont celles qui sont présentes le plus souvent dans les latérites [9]. L'absence des smectites et la faible proportion des illites montrent que l'argile présente dans l'échantillon n'est pas gonflante. La composition minéralogique du matériau pourrait avoir un effet sur les propriétés physiques, thermiques et mécaniques des briques, notamment sur leur densité, porosité, leur conductivité thermique et leur résistance en compression [10]. Les propriétés géotechniques du matériau de base déterminées suivant le protocole expérimental du paragraphe (1.2) sont consignées dans le **Tableau 1**. Egalement, la composition chimique obtenue par la fluorescence aux rayons X est donnée par le **Tableau 2**.

Tableau 1 : Propriétés géotechniques du matériau de base

Propriétés géotechniques	Valeurs numériques
Distributions de la taille des particules (%)	
argile (%) < 2µm	06,2
limon (%) 2µm -80µm	22,5
sable (%) 80µm -2mm	34,1
gravier (%) >2mm	37,2
Plasticité du matériau de base	
Limite de liquidité (W _L) (%)	49
Limite de plasticité (W _P) (%)	24,9
Indice de plasticité (I _P) (%)	24,1
Essai au bleu de méthylène	

Valeur au Bleu de méthylène (g/100g)	1,06
Essai Proctor normal	
Teneur en eau optimale (w_{opt}) (%)	19
Densité sèche maximale (γ_d) (g/cm ³)	1,67
Essai au pycnomètre	
Poids spécifique (kN/m ³)	26,7
Essai de perméabilité	
Perméabilité à saturation K_s (cm/s)	$4,5 \cdot 10^{-5}$

La courbe granulométrique de la latérite utilisée est représentée sur la **Figure 4**. L'analyse de la courbe granulométrique de la terre utilisée montre qu'elle est composée approximativement de 34,1 % de sable, 22,5 % de limon, 37,2 % de gravier et 6,2 % d'argile. Au regard de ces résultats on peut donc conclure que l'échantillon est relativement moins riche en fraction fine et est donc approprié pour la formulation des BTC. En plus sa courbe granulométrique est inscrite dans la zone granulaire recommandée par la norme CRATERre-Eag sur les matériaux utilisables pour les BTC. [3, 11, 12]. En outre, la classification des sols selon leur nature, basée sur la répartition des tailles des particules, de l'indice de plasticité et de la valeur du bleu de méthylène, l'échantillon est de la classe A2 [2].

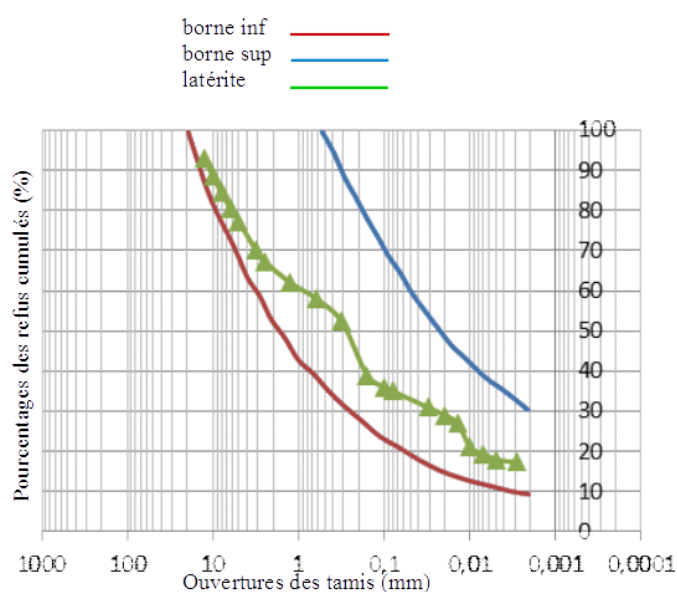


Figure 4 : Courbe granulométrique de la terre utilisée avec les limites supérieures et inférieures du fuseau granulaire

La composition minéralogique du matériau étudié est présentée dans le **Tableau 2**. Le matériau étudié est composé principalement d'oxyde de silice, d'alumine et de fer. Partant des quantités de silice et d'alumine, de la perte au feu et de la valeur au bleu de méthylène de l'échantillon, nous pouvons conclure qu'il est relativement riche en kaolinite avec des quantités appréciables de minerais de quartz [9].

Tableau 2 : Composition chimique élémentaire de la latérite utilisée dans la fabrication des BTC

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	MnO	TiO ₂	PF
%	56,77	21,32	10,00	0,53	tr	0,09	tr	0,27	0,06	1,09	11,02

tr : traces ; PF : Perte au feu.

3-2. Propriétés physiques, thermo-hydrauliques et mécaniques

Nous donnons dans les paragraphes suivants les résultats des analyses physiques, thermo-hydrauliques, hygrothermiques et mécaniques des BTC effectuées.

3-2-1. Les paramètres physiques

Les paramètres physiques déterminés sont consignés dans le **Tableau 3**. La porosité accessible à l'eau trouvée est inférieure à la valeur 44 obtenue à la suite des expériences réalisées par [10]. L'écart pourrait être dû aux compositions minéralogique et granulométrique de notre matériau de base. Cependant la masse volumique apparente trouvée figure dans la plage 1700 à 1900 kg/m³ des valeurs des BTC [11, 12].

Tableau 3 : Valeurs numériques des paramètres physiques déterminés

Grandeurs physiques	Valeur
Masse volumique sèche (kg/m ³)	1814,35 ± 26,5
Porosité accessible à l'eau (%)	32,80 ± 0,1

3-2-2. Les paramètres thermo-hydro-physiques

Les **Figures 5, 6 et 7** représentent les évolutions de la diffusivité, de la conductivité thermique, thermique et de l'effusivité thermique des BTC en fonction de la teneur en eau.

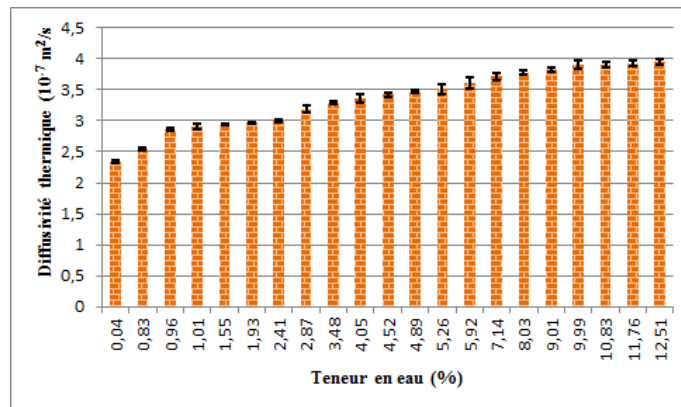


Figure 5 : Diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau

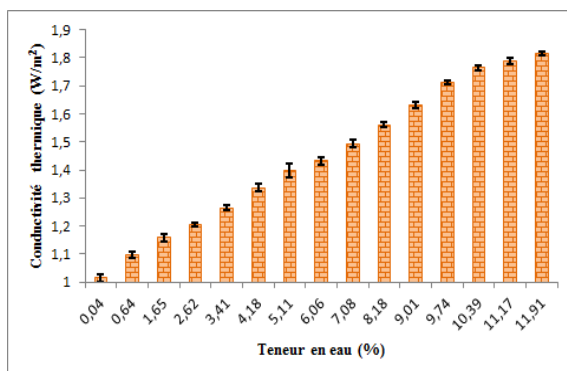


Figure 6 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

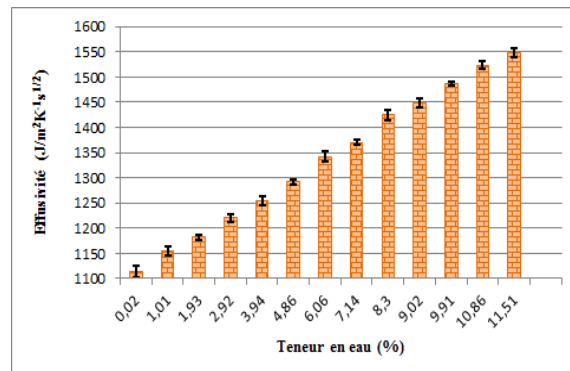


Figure 7 : Effusivité thermique en fonction de la teneur en eau

Nous observons que les courbes croissent avec la teneur en eau (**Figures 5 à 7**). Toutefois, nous remarquons que, la conductivité thermique et l'effusivité thermique varient quasi linéairement avec la teneur en eau (**Figures 6 et 7**). Par ailleurs si l'état hydrique de nos échantillons passe de l'état sec à l'état humide (11,91 %), la conductivité thermique augmente en moyenne de 71 %. Le taux d'augmentation de la conductivité thermique est en deçà de la valeur obtenue par [13] pour les briques de terre stabilisée à 10 % de ciment. L'effusivité a un taux d'augmentation de 38 % pour une variation de teneur en eau de 0,02 % à 11,51 %. Quant à la diffusivité thermique, elle a subi une augmentation de 68 % pour une variation de teneur en eau de 0,046 % à 12,51 %. Ces résultats sont en accord avec ceux de travaux de recherche antérieurs [13, 14]. Nous en déduisons que lorsque les briques deviennent humides, les surfaces exposées au soleil auront tendance à s'échauffer rapidement d'une part propager le flux de chaleur beaucoup plus vite. [15] sont parvenus relativement à la même conclusion pour des teneurs en eau comprises entre 0 et 3 %. De façon générale, l'eau aura un effet sur les propriétés thermiques des briques en terre compressée, notamment sur le caractère inertiel du matériau.

- *Essai de mouillage séchage*

L'essai comporte au total 12 cycles conformément à la norme ASTM D 559-57 [16]. Au cours des douze (12) cycles de mouillage-séchage, les BTC ont perdu en moyenne 0,37 % de leurs masses avec un écart type de 0,04 %. Cette valeur est inférieure aux limites recommandées par Fitzmaurice pour des pertes maximales de masse pour les constructions avec des BTC [17, 18]. De façon générale, ces BTC ont une qualité moyenne et pourront résister à des intempéries d'intensité modérée.

- *Absorption d'eau par capillarité*

La **Figure 8** représente la courbe de l'absorption d'eau par capillarité des échantillons de BTC. La droite de régression linéaire a pour équation $y = 0,22x + 0,11$. Le coefficient 0,11 caractérise d'après [19] l'absorption d'eau des pores ouverts en surface juste après le contact de la surface de la brique avec la nappe d'eau. La sorptivité moyenne obtenue est de $0,22 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$. Elle a été déduite à partir de la pente de la droite de régression linéaire. La valeur de l'absorption d'eau des pores ouverts en surface du matériau est faible par rapport à celle trouvée par [2] pour les adobes stabilisés au ciment. Nous concluons que notre matériau a un faible taux de pores ouverts en surface et un coefficient d'absorption moyen comparativement aux valeurs de la littérature.

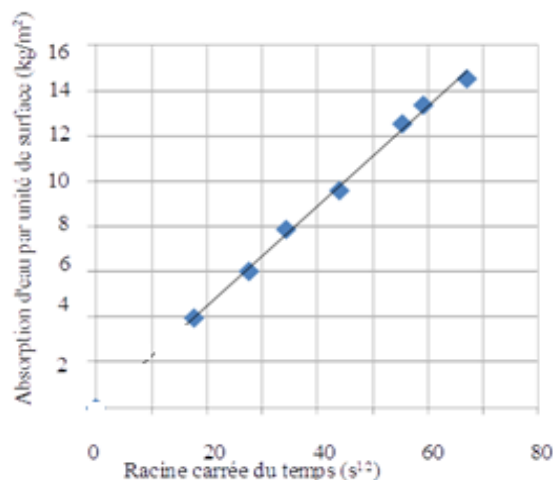


Figure 8 : *Absorption d'eau par capillaire de l'échantillon*

- *Isotherme de désorption*

Nous illustrons sur la **Figure 9**, l'isotherme de désorption de nos BTC. Elle représente la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative. Elle a été ajustée avec le modèle GAB (Guggenheim - Anderson - Boer).

Car ce modèle est adapté pour ce type de matériau et sa plage en humidité relative (*HR*) va jusqu'à 95 % [19, 20]. Le modèle GAB est donné par la forme générale de l'Équation (7).

$$X = \frac{X_{12} H R C K}{(1 - H R K)(1 + H R C K - H R K)} \tag{7}$$

avec, *K*, *C* et *X*₁₂ des paramètres du modèle. *X* représente la teneur en eau de l'échantillon en équilibre. Dans notre cas l'approximation a donné 0,9815, 2,1459 et 0,0884 comme valeurs respectives des paramètres *K*, *C* et *X*₁₂. L'analyse de la **Figure 9** montre que le matériau comporte de fines particules. Nous obtenons une fonction non linéaire. Pour une plage de l'humidité relative comprise entre 0 et 60 %, la courbe est quasi linéaire et non linéaire à partir de 60 %. Au regard des résultats présentés, nos échantillons de BTC auront une capacité de rétention d'eau modérée [23]. Selon la classification des isothermes, donnée par UIPAC, l'isotherme de notre échantillon est de type III [24]. La quasi linéarité du début de la courbe peut être interprétée comme une faible interaction de la matrice solide de la brique avec les molécules gazeuses. Le phénomène de désorption est moins rapide pour les humidités relatives comprises entre 0 et 60 % : le matériau alors présente une propriété intéressante pour la régulation de l'humidité dans l'habitat.

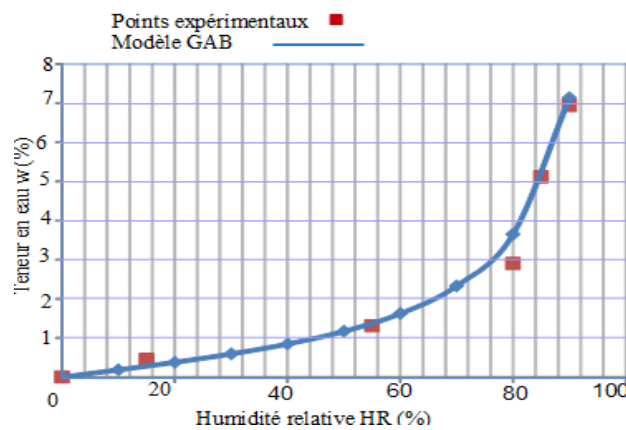


Figure 9 : Isotherme de désorption du matériau

3-2-3. Les paramètres hydro-mécaniques

Nous représentons les résistances à la compression et à la flexion des briques en fonction de la teneur en eau sur la **Figure 10**. Nous remarquons que les échantillons dont les teneurs en eau varient de 0,75 à 1,5 % ont leurs résistances en compression supérieures ou égales à 6 MPa. Ces valeurs sont largement au-dessus de la norme admissible pour le matériau terre [23]. La même allure est observée au niveau de la résistance à la flexion des briques. Toute fois ces valeurs restent faibles par rapport à celles de compression.

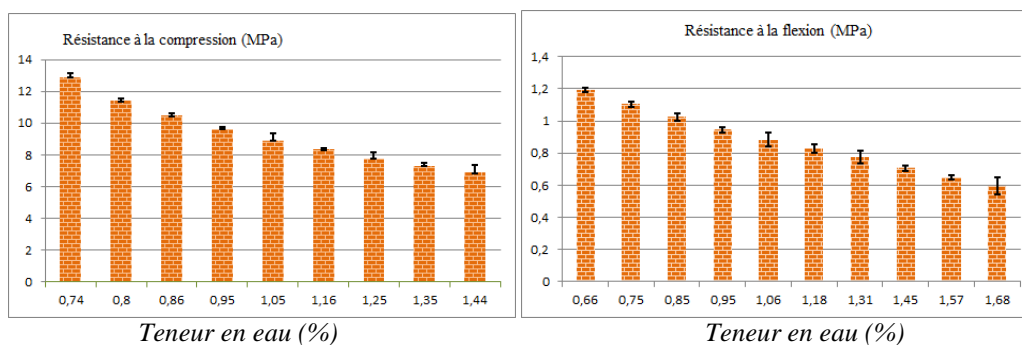


Figure 10 : Résistances à la compression et à la flexion en fonction de la teneur en eau

4. Conclusion

Les résultats présentés dans cet article découlent d'une caractérisation géotechnique et minéralogique d'une latérite utilisée pour la formulation des briques en terre compressée d'une part et la détermination des propriétés physiques et thermo-hydro-mécaniques de ces briques en terre compressée d'autre part. Les résultats géotechniques et minéralogiques la latérite étudiée montrent qu'elle est utilisable pour la formulation des BTC sans aucun minimum de correction. Les propriétés mécaniques BTC trouvées sont en accord avec celles de la littérature. Les propriétés thermo-hydriques analysées montrent la conductivité thermique augmente en moyenne de 71 %. L'effusivité a un taux d'augmentation de 38 % pour une variation de teneur en eau de 0,02 % à 11,51 %. Quant à la diffusivité thermique, elle a subi une de 68 % pour une variation de teneur en eau de 0,046 % à 12,51 %.

Remerciements

Au cours de la réalisation de ce projet, l'entreprise ZI Matériau et le Laboratoire d'Eco Matériau et Construction nous ont accompagnés avec les dispositifs nécessaires. Nous tenons à remercier vivement leurs responsables.

Références

- [1] - H. BENOUALI, A. BRARA, M. MAHDAD, F. MOKHTARI, Caractérisation thermo-physique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée, communication, 29^e Rencontres Universitaires de Génie Civil de Tlemcen en Algérie, (2011)
- [2] - K. DAO, M. OUEDRAOGO, Y. MILLOGO, J-E. AUBERT, M. GOMINA, Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement, *construction and building materials*, 158 (2018) 84 - 96
- [3] - L. LAOU, L. ULMET, S. YOTTE, M. TAKARLI, P. MAILLARD, S. ROSSIGNOL, Etude des conditions hygrothermiques sur la fissuration d'une paroi en brique de terre crue, bois et mortier minéral, 34^{èmes} Rencontres de l'AUGC, Université de Liège, Belgique, (25 au 27 mai 2016)
- [4] - M. SAIDI, A. S. CHERIF, E. SEDIKI, B. ZEGHMATI, Unité Analyse Numérique du Comportement Thermo-hydrrique de Briques de Terre Stabilisée au Ciment, 5^{ème} Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2017) Proceeding of Engineering and Technology-PET, Vol. 31, 1 - 6 p.
- [5] - A. KEMAJOU, A. TSEUYEP, N.E. EGBEWATT : « Le confort thermique en climat tropical humide vers un réaménagement des normes ergonomiques », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°3 (2012) 427
- [6] - S. O. SORÉ, A. MESSAN, E. PRUD'HOMME, G. ESCADEILLAS, F. TSOBNANG, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, *construction and building materials*, 165 (2018) 333 - 345
- [7] - E. OUEDRAOGO, O. COULIBALY, A. OUEDRAOGO, A. MESSAN, Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment, *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2 (2015) 68 - 76
- [8] - Y. MILLOGO, M. HAJJAJI, R. OUEDRAOGO, Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 2386 - 2392
- [9] - A. AMMARIA, K. BOUASSRIAB, M. CHERRAJA, H. BOUABIDA, S. CHARIF D'OUAZZANEC, Combined effect of mineralogy and granular texture on the technico-economic optimum of the adobe and compressed earth blocks, *Case Studies in Construction Materials*, 7 (2017) 240 - 248
- [10] - P. DOAT, A. HAYS, H. HOUBEN, S. MATUK, F. VITOUX, *Construction en terre*, manuel, CRATerre, (2006)

- [11] - H. HOUBEN, V. RIGASSI, P. GAMIER, Blocs de terre comprimée équipements de production, manuel, CD I&CRATerre, Bruxelles 2^e Edition, ISBN 2-906901-12-1, (1996)
- [12] - H. EZBAKHE, S. BOUSAD, A. EL BAKKOUR, T. AJZOUZ et A. EL BOUARDI, Etude Thermique de la Terre Stabilisée au Ciment Utilisée en Construction au Nord du Maroc, *Revue Energie Renouvelables*, Journées de thermique, (2011) 69 - 72
- [13] - H. BAL, Y. JANNOT, S. GAYE, A. DEGIOVANNI, Etude expérimentale des propriétés thermiques des briques de terre avec ajout des déchets de mil par une méthode plan chaud centré asymétrique, 16^{ème} Journée Internationale de Thermique, à Marrakech (Maroc), 13 au 15 Novembre 2013
- [14] - J. E. AUBERT, Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées, Rapport final du projet TERCRUSO, (avril 2013)
- [15] - Active Standard Test Methods (ASTM) for *Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*, Designation D 559 - 03
- [16] - K. A. HEATHCOTE, an investigation into the erodibility of earth Wall units, University of Technology Sydney, (2002)
- [17] - R. V. B. VENKATARAMA, Durability tests CEB: Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction », *Woodhead Publishing Limited*, (2012)
- [18] - M. RABEHI, S. GUETTALA, B. MEZGHICHE, La porosité ouverte du béton d'enrobage: corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption initiale, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (2012)
- [19] - E. KOUASSI KAKOU, C. AKMEL DJÉDJRO, V. ABOUO N'GUESSAN, isotherme d'adsorption d'eau des feves de cacao (*Theobroma cacao* L.) marchand, *European Scientific Journal April 2015 edition*, Vol. 11, N°12 ISSN: 1857 - 7881 (Print) e - ISSN 1857 - 7431
- [20] - A. LOUIS, A. EVRARD, B. BIOT, De l'expérimentation à la modélisation des propriétés hygrothermiques de parois isolées en paille, Rapport, 31^{èmes} Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013, Belgique
- [21] - Q. WU, Isothermes de désorption de matériaux cimentaires : étude d'un protocole accéléré et estimation du VER, Thèse de doctorat option génie civil, Université Lille1, (2014)
- [22] - J. CID-FALCETO, F. R. MAZARRÓN, I. CAÑASET, Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 738 - 745