

Caractérisation mécanique et thermo-physique de l'adobe utilisé dans la voûte nubienne

**Karim TOUSSAKOE¹, Emmanuel OUEDRAOGO^{1,2*}, Kossi B IMBGA^{1,3}, Adamah MESSAN⁴
et Florent Peléga KIENO¹**

¹ *Université Joseph KI-ZERBO, Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquée, Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

² *Université de Ouahigouya, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologies, 01 BP 346 Ouahigouya 01, Burkina Faso*

³ *Université Norbert ZONGO, Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Technologies, Laboratoire de Recherche en Energétique et Météorologie de l'Espace, BP 376 Koudougou, Burkina Faso*

⁴ *Institut d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Laboratoire Eco-Matériaux de Construction, 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso*

(Reçu le 24 Août 2021 ; Accepté le 27 Septembre 2021)

* Correspondance, courriel : ouedem7@gmail.com

Résumé

Le but de cette étude est de faire une caractérisation géotechnique du matériau terre crue d'une part et d'autre part une caractérisation mécanique et thermo-physique adobe utilisé dans la voute nubienne. Notre étude a consisté à déterminer dans un premier temps les caractéristiques géotechniques des terres utilisées pour la confection de l'adobe et de la petite brique. Cette connaissance des caractéristiques géotechniques, nous a permis d'identifier le type de sol correspondant aux terres étudiées. Ensuite, nous avons déterminé les propriétés thermo-physique et mécanique des blocs confectionnés. Les propriétés thermo-physiques de l'adobe (brique A) et de la petite brique (brique B) ont été déterminées par les dispositifs Plan chaud et KD2 Pro et la résistance mécanique par la méthode de la compression simple. Elles montrent que le matériau adobe utilisé contribue à atténuer la température et à obtenir le confort thermique dans la voute nubienne. La connaissance de ces propriétés est nécessaire également pour la modélisation du comportement thermique d'un habitat en adobe. Ce qui permettra d'expliquer le comportement thermique de l'habitat en adobe. La technique voute nubienne pourra être une alternative à la forte consommation énergétique dans le bâtiment en général et en particulier dans l'habitat.

Mots-clés : *terre crue, matériau, caractérisation, propriétés géotechniques, propriétés thermo-physiques.*

Abstract

Mechanical and thermo-physical characterization of the adobe used in the Nubian vault

The aim of this study is to make firstly a geotechnical characterization of the raw earth material and secondly a mechanical and thermo-physical characterization of the adobe used in the Nubian vault. Our study consists

to determine the geotechnical characteristics of the earths used in the adobe and the small brick processing. This knowledge of the geotechnical characteristics, allowed us to identify the type of soil corresponding to the lands studied. Then, we determined the thermo-physical and mechanical properties of the made blocks. The thermo-physical properties of the adobe (brick A) and the small brick (brick B) were determined by the Hot Plan and KD2 Pro devices and the mechanical resistance by the simple compression method. The results show that the adobe material used contributes to attenuate the temperature and to obtain the thermal comfort in the Nubian vault. The knowledge of these properties is also necessary for the modeling of the thermal behavior of an adobe habitat. This will allow to explain the thermal behavior of the adobe habitat. The Nubian vault technique could be an alternative to the high energy consumption in building in general and in particular in the habitat.

Keywords : *raw earth, material, thermo-physical properties, geotechnical properties, characterization.*

1. Introduction

La part importante de l'énergie consommée pour les besoins de fonctionnement des bâtiments couplée à l'augmentation sans cesse croissante du prix de l'énergie, a amené les chercheurs à s'intéresser aux problèmes de la thermique du bâtiment [1]. Ainsi, l'être humain passe la plupart de son temps, que ce soit au travail ou en famille ou ailleurs, dans un enclos couvert. Cet abri doit lui fournir une ambiance de bien-être, une certaine aisance de vivre : le confort surtout thermique [2]. Dans la dynamique de la recherche du confort thermique dans le bâtiment et en particulier dans l'habitat, des études sur les environnements intérieur et extérieur du bâtiment et les équipements électroménagers ont été menées. Il ressort de ces travaux une absence de politique de gestion et de maintenance des équipements énergétiques, une faible qualification générale du personnel de maintenance et un caractère "énergétivore" de la plupart des bâtiments. Ce caractère énergétivore est lié aux problèmes de conceptions architecturale et fonctionnelle de ces bâtiments. Les enveloppes du bâtiment qui séparent l'environnement intérieur des environnements extérieurs, et en particulier les façades des bâtiments, jouent un rôle important en matière d'économie d'énergie dans les bâtiments [3]. Les architectes et les ingénieurs devraient donc prendre en compte dès la conception des bâtiments, les impacts ultimes de la physique de ces bâtiments sur la performance énergétique globale et les conditions de confort intérieur. Aussi, la consommation d'énergie peut être considérablement réduite en adoptant des stratégies d'efficacité énergétique dans de tels bâtiments [4].

En raison des préoccupations environnementales et des coûts énergétiques élevés de ces dernières années, l'efficacité énergétique dans les bâtiments a suscité un regain d'intérêt. Une étude menée récemment en Malaisie indique que les bâtiments résidentiels consomment environ 19 % de l'énergie totale consommée dans les secteurs malaisiens. L'une des stratégies les plus potentielles appliquées à l'enveloppe du bâtiment dans les régions tropicales chaudes et humides est la méthode de conception passive et s'applique à l'enveloppe du bâtiment dans ces régions. L'utilisation des systèmes mécaniques qui refroidissent les environnements comme les climatiseurs pour réduire la température de l'air intérieur, peut augmenter la dépense énergétique du bâtiment d'environ 50 % [5]. Les travaux de Dabe et al [6] ont mis en évidence le rôle très important du profil du bâtiment dans le contrôle de la pénétration directe de la lumière du jour dans l'espace intérieur d'un bâtiment. Cette étude a montré qu'une pénétration excessive peut provoquer chez les occupants de l'inconfort visuel et thermique dans la région de Nagpur en Inde centrale, qui a un climat chaud et sec. Certaines études montrent que des économies pourraient être réalisées dans le secteur des bâtiments si la conception architecturale et le choix des matériaux de construction prenaient en compte le comportement thermique des bâtiments afin de minimiser les besoins de climatisation et d'éclairage. Le mélange argile-paille réduit les besoins en climatisation par rapport au mur en argile de l'ordre de 8 % [7]. Concernant la

toiture, l'étude a permis de montrer qu'une isolation de 1,5 cm d'épaisseur (situation courante) occasionne des économies de l'ordre de 8,3 % (bois blanc) à 12,1 % (panneau isolant) sur les charges de climatisation. Les résultats de Compaore et al [8] montrent que les matériaux locaux de construction représentent une bonne alternative pour la recherche d'efficacité énergétique dans les bâtiments. Aussi, Les températures de l'air à l'intérieur des habitats dont les murs sont faits de matériaux locaux (matériaux en terre) sont inférieures à celles des habitats modernes (blocs de ciment) [9]. Ce matériau terre permettant d'obtenir de faibles températures dans les locaux est l'un des matériaux le plus utilisé dans la construction de l'habitat en zone rurale et péri-urbaine dans les pays en développement en général et au Burkina Faso en particulier. Cet engouement s'explique par le fait que la terre est une matière première naturelle disponible et sa transformation en matériau de construction se fait sans grande dépense d'énergie. Aussi, la disponibilité du matériau et son coût moins élevé favorisent son accessibilité. La recherche d'économies d'énergie passe notamment par une meilleure connaissance puis une optimisation des caractéristiques thermo-physiques des matériaux constitutifs des parois des bâtiments [10]. Il est important de déterminer en particulier la conductivité thermique apparente de tels matériaux lorsque ceux-ci sont soumis à des gradients de température. C'est ainsi que la détermination des valeurs moyennes des propriétés thermo-physiques des matériaux locaux isolants a été faite [11]. Les données de ces propriétés thermo-physiques ont permis d'évaluer les températures internes et les charges de climatisation des différents locaux.

Aussi, en étudiant les caractéristiques des blocs latéritiques pour une meilleure utilisation en Afrique, les propriétés mécaniques de ces blocs ont été déterminées [12]. Les résultats ont montré une bonne résistance de ces matériaux et ces blocs conféraient aussi une bonne solidité aux édifices. C'est dans la même vision de caractérisation de matériaux, qu'une étude expérimentale des propriétés thermiques et mécaniques des blocs de terre compressée (BTC) stabilisés avec sciure de bois a été [13]. Les résultats de cette étude ont montré une amélioration des différentes propriétés BTC après stabilisation. Les propriétés thermo-physiques des matériaux locaux comme la latérite stabilisée à 4 % de gousse de néré, à la chaux et au ciment ont été déterminé [14]. Il a montré qu'une bonne connaissance des propriétés des matériaux de construction permettait un meilleur choix de ces matériaux pour la réalisation de l'enveloppe du bâtiment. C'est dans cette optique, que les terres extraites du site de construction d'une voûte nubienne feront l'objet de notre travail. Le site est situé à Cassou, un village situé sur l'axe Koudougou-Ouagadougou à environ sept (07) km de la ville de Koudougou. La terre est moulée d'une manière artisanale pour donner l'adobe qui est une brique de terre crue, non stabilisée et séchée à l'air libre. Notre étude a consisté d'abord à caractériser le matériau terre (caractérisation granulométrique et détermination des limites d'Atterberg), ensuite, à confectionner les adobes et enfin, à déterminer leurs propriétés thermo-physique et mécanique.

2. Méthodologie

2-1. Caractérisation géotechnique de la terre

La terre est un matériau de construction qui a une mauvaise presse et, construire dans nos milieux en terre est synonyme de pauvreté. Mais la terre ne peut être employée en construction que si elle offre une bonne cohésion. Celle-ci est principalement due à la présence des particules fines (argiles) jouant le rôle de liant naturel. La brique de terre est un matériau durable et de qualité certaine quand elle est produite dans des conditions requises. Pour son utilisation, il est nécessaire, d'abord, de déterminer les limites d'Atterberg et la granulométrie. Les propriétés naturelles de la terre crue peuvent être modifiées en appliquant certaines techniques de la stabilisation qui peuvent être mécaniques, physiques, chimiques. L'analyse granulométrique permet de déterminer la quantité respective de ces différents éléments constituant le sol.

2-1-1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. L'étude de la granulométrie permet d'avoir une idée sur le degré d'évolution du matériau. C'est l'analyse granulométrique par tamisage qui a été réalisée. Pour des grains dont les diamètres sont supérieurs à 80 μm , on effectue le tamisage en utilisant les tamis à maille carrée. Pour les grains dont les diamètres sont inférieurs à 0,08 mm, c'est la sédimentométrie est utilisée. Elle est basée sur la loi de Stokes exprimant la relation entre la vitesse de sédimentation d'une particule solide dans un liquide (eau) et les diamètres de cette particule.

2-1-2. Principe de l'analyse

L'analyse granulométrique par tamisage, s'applique aux particules de sol de diamètre supérieur à 0,08 mm et s'effectue dans une colonne de tamis normalisés [15]. Les tamis utilisés pour nos travaux sont des tamis à mailles carrées ayant des diamètres variant de 0.08 mm à 10 mm. L'opération se fait par tamisage après avoir éliminé à l'eau les impuretés ou charges ($< 80 \mu\text{m}$). Avant de passer au tamisage, il faut humidifier le matériau, le rincer et le faire sécher. Les pourcentages ainsi obtenus peuvent être représentés sous forme d'un graphique appelé courbe granulométrique. A partir de cette courbe, un certain nombre d'indicateurs permettent de caractériser la distribution granulométrique du matériau. La **Photo 1** nous présente des différents tamis du dispositif expérimental de la granulométrie par tamisage.



Photo 1 : Dispositif expérimental de la granulométrie par tamisage

2-1-3. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité, W_l), et le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité, W_p). Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type de sol présents dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon. Il est exprimé par l'**Equation** ci-dessous :

$$I_p = w_p - w_l \quad (1)$$

Avec, I_p : indice de plasticité ; W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme NF P 94-051 [16, 17]. La connaissance de ces limites permet aussi de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol.

2-1-3-1. Limite de liquidité

Pour déterminer la limite de liquidité, nous avons prélevé environ 1000 g de chaque échantillon de matériau lavé au tamis de 0,4 mm, puis conservé en 24h dans l'eau. Ensuite, l'étaler sur une plaque de plâtre pour un léger séchage, et l'homogénéiser à l'aide d'une spatule sur une surface lisse et moins absorbante avant de le placer dans l'appareil de Casagrande. Après homogénéisation de la pâte, elle est répartie dans la coupelle de manière symétrique et partagée en deux à l'aide de l'outil à rainurer. La manivelle est tournée à une vitesse de deux chocs par seconde jusqu'à ce que la rainure se ferme sur une longueur de 12 à 13 mm après N coups compris entre 15 et 35. Avec le même matériau, nous effectuons 5 essais successifs, ce qui provoque la diminution progressive de la teneur en eau. A chaque essai, la teneur en eau est notée. Puis, on trace la courbe $W_l = f(N)$. Dans ces conditions, on détermine la teneur en eau par la **Formule** ci-dessous :

$$W_l = \left(\frac{P_{eau}}{P_{Echsec}} \right) * 100, \text{ avec } P_{eau} = m_1 - m_2 \text{ et } P_{Echsec} = m_2 - P_{tare} \quad (2)$$

Avec, W_l : limite de liquidité ; P_{eau} : masse de l'eau ; P_{Echsec} : masse de l'échantillon sec ; m_1 : masse de l'échantillon humide ; m_2 : masse de l'échantillon sec après séchage à l'étuve ; P_{tare} : masse de la tare.

Aussi, pour les mêmes intervalles de N , l'**Equation** ci-dessous permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou de deux mesures seulement. La limite de liquidité (W_l) et la teneur en eau occasionnent la fermeture de la rainure sur 1cm après 25 chocs.

$$W_l = \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121} \quad (3)$$

Avec, N : nombre de coups.

2-1-3-2. Limite de plasticité

On forme une boulette à partir de la pâte préparée de l'échantillon, ensuite on roule la boulette sur une surface plane et lisse à la main de façon à obtenir un rouleau. Ce rouleau est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm et doit avoir une longueur de 10 cm et ne doit pas être creux. La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se fissure lorsque son diamètre atteint 3 mm. Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2 % de la valeur moyenne.

2-2. Caractérisation des propriétés thermo-physiques et mécaniques des adobes

2-2-1. Caractérisation thermo-physique

La méthode de caractérisation utilisée est celle du plan chaud, un dispositif similaire a été utilisé dans le Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC) de l'Institut international de l'eau et de l'environnement (2iE). Selon les travaux de Imbga et al [18], on applique un échelon de flux de chaleur constant à la résistance chauffante et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ au centre de cette même résistance dans ou sur

laquelle a été placé un thermocouple. Les échantillons sont considérés comme des milieux semi-infinis et le transfert au centre de l'échantillon, unidirectionnel. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. La modélisation par la méthode des quadripôles et l'application de la méthode de Sthest, pour un milieu semi-infini, la différence de température $T_0(t) - T_0(0)$ peut se calculer à l'aide de l'**Equation** ci-dessous :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\phi_0}{2} \left[R_{con} - \frac{m_c}{2(ES)^2} \right] + \frac{\phi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (4)$$

Avec, t : temps ; $T_0(t)$: température à l'instant t ; $T_0(0)$: température à l'instant initial ; ϕ_0 : flux à l'instant initial ; $R_{con} (W.m^2.K^{-1})$: résistance de contact ; $m_c (J.K^{-1})$: capacité calorifique du thermocouple ; $E (J/m^2.K.s^{1/2})$: effusivité du matériau ; $S (cm^2)$: valeur moyenne de la section.

En régime permanent, la différence de température ne varie pas entre les différentes faces.

On peut alors estimer la conductivité thermique (λ) par la **Formule** ci-dessous :

$$\lambda = \frac{\phi_0 e}{S \Delta T} \quad (5)$$

Avec, $\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$: conductivité thermique ; $\phi_0 (W.m^2)$: densité de flux à l'instant initial ; $e (m)$: épaisseur de l'échantillon ; $S (m^2)$: section ; $\Delta T (K)$: différence de température.

On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de l'effusivité thermique et de la capacité thermique. Pour l'étude expérimentale des propriétés thermo-physiques d'un bois tropical et d'un panneau isolant formulé avec des intrants locaux, la méthode du plan chaud a été utilisée [19]. Il s'est agi plus spécifiquement de la détermination par cette méthode de l'effusivité thermique, de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la capacité calorifique de ces matériaux. Pour les mesures, on prépare deux échantillons du matériau de dimension respectives $6*4*3$ cm et $6*4*1$ cm. Ensuite, on place chaque échantillon entre les thermocouples. Enfin, on lance l'acquisition et on récupère les valeurs des résultats, après traitement dans un fichier Excel. Aussi, les caractéristiques thermo-physiques telles que la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (α) et la chaleur spécifique volumique (C) ont été mesurées en utilisant KD2-Pro, une sonde à double aiguille développée par la Société Decagon [12]. Ce dispositif utilise le modèle proposé par Craslaw et Jaeger [12] pour résoudre 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 IEEE [12]. Les avantages de ce type de méthode se situent essentiellement au niveau de la simplicité de l'appareillage, de la rapidité de mesures et de la possibilité d'opérer in situ dans les conditions hygrothermiques quelconques. Les **Photos 2** et **3**, montrent respectivement les photos de KD2-Pro et du dispositif de l'acquisition de la méthode du plan chaud.



Photo 2 : *Dispositif KD2-Pro*



Photo 3 : *Dispositif expérimental du plan chaud symétrique*

2-2-2. Caractérisation mécanique

Le but de cet essai est de déterminer la résistance nominale en compression simple des briques adobes. La **Photo 4** donne l'illustration du dispositif de l'essai.



Photo 4 : *Dispositif expérimental de l'essai de compression*

Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de terre à une compression simple jusqu'à la rupture. Le mode opératoire consiste à couper d'une manière habile les blocs en deux. Ces blocs sont ensuite superposés et collés par un joint fin de mortier humidifié légèrement. Puis, on laisse l'éprouvette sécher pendant 2 à 3 jours à température ambiante. Une membrane de néoprène graissée est placée enfin sur une plaque en téflon et on dispose le tout sur le plateau inférieur de la presse. L'éprouvette est soumise à une charge monotonement croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est déterminée par **l'Equation** ci-dessous :

$$R_c = \frac{F}{S} \tag{6}$$

Avec, R_c (MPa) : résistance à la compression de l'éprouvette ; S (m^2) : section ; F (kN) : charge maximale supportée par l'éprouvette.

3. Résultats et discussions

3-1. Caractéristiques géotechniques de la terre

Le **Tableau 1** présente les limites d'Atterberg, les résultats de la granulométrie. La terre utilisée pour l'adobe sera notée la terre A et celle utilisée pour les petites briques, la terre B.

Tableau 1 : limites d'Atterberg

Caractéristiques géotechniques	Terre A	Terre B
Limite de plasticité Wp	14,00	28,70
Limite de liquidité Wl	29,50	41,30
Indice de plasticité Ip	15,50	19,50
Indice de cohérence du sol	1,60	1,90
Limite de retrait	11,400	16,10

Les limites d'Atterberg permettent d'avoir une idée du degré de plasticité d'un sol et de son argilosité. Il ressort du **Tableau 1** que la terre B est plus plastique que la terre A. L'examen superficiel montre que les terres diffèrent par la couleur, les dimensions des granulats et leur état. Les valeurs obtenues par la granulométrie par tamisage permettent de tracer la **Figure 1** qui représente la courbe granulométrique.

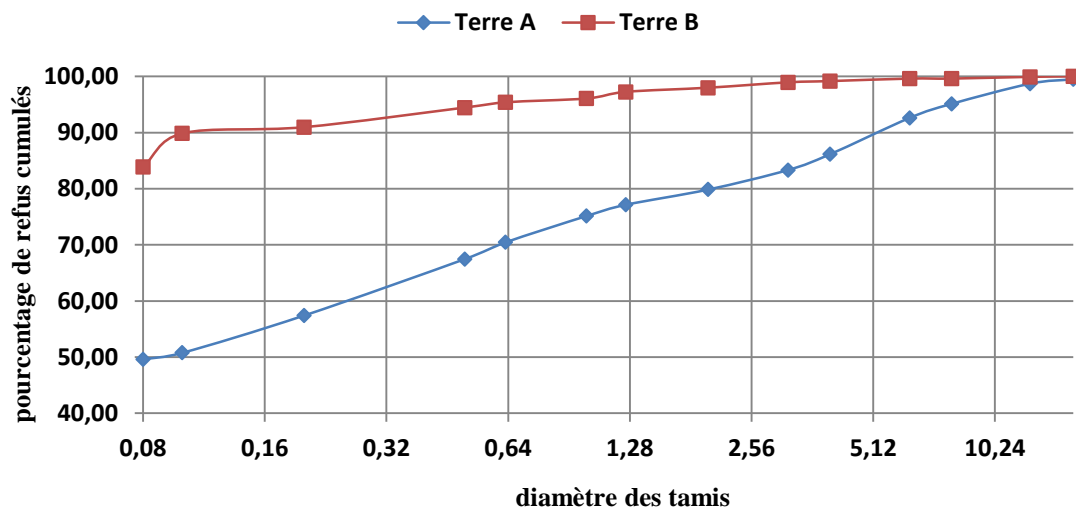


Figure 1 : Courbe granulométrique

Ces résultats serviront à faire une classification globale des terres. La terre B ne contient pas de graviers par contre la terre A en possède. Elle a une granulométrie moyenne, et contient un grand pourcentage de limons et d'argile. Nous observons que la terre A est plus fine que la terre B. Quant à la terre A, elle possède un pourcentage de sable important. Le diamètre maximal de ses granulats est nettement supérieur par rapport à la terre B. L'étude de Osomba [20] montre que la présence de gros granulats favorise l'infiltration de l'air qui est un bon isolant. Donc l'adobe de la terre A sera plus isolant que celui de la terre B. Les fractions de graviers, sables et limons se caractérisent par leur stabilité en présence de l'eau. L'argile confère donc aux produits finis sa cohésion et agit comme liant entre les éléments plus grossiers qui constituent le squelette.

Selon les caractéristiques de base de la classification des laboratoires des ponts et chaussées (LPC)/Unified Soil Classification System (USCS), la terre A appartient à la famille des sols grossiers (grenus) de type sable argileux (Sa) et la terre B à celle des sols fins de type argile peu plastique (Ap). Nous pouvons dire que les terres A et B sont utilisables pour la fabrication d'adobes de bonne qualité.

3-2. Caractéristiques thermophysique et mécanique des briques

3-2-1. Caractéristiques thermophysiques

La diffusivité thermique et l'effusivité thermique sont respectivement exprimées par les *Equations 7* et *8* :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * c} \tag{7}$$

$$E = \sqrt{\lambda * \rho * c} \tag{8}$$

Avec, α ($m^2.s$) : diffusivité thermique ; λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) : conductivité thermique ; ρ (kg/m^3) : masse volumique ; c ($kJ.m^{-1}.K^{-1}$) : chaleur spécifique massique ; E ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$) : effusivité thermique.

Les températures moyennes de mesure ont varié de à 29°C à 31°C. Les résultats de mesure avec les dispositifs du plan chaud et de KD2-Pro sont regroupés dans le *Tableau 2*.

Tableau 2 : Valeurs des propriétés thermophysiques

Propriétés Thermo-physiques	Plan chaud		KD2-Pro	
	Brique A	Brique B	Brique A	Brique B
Masse volumique ($kg.m^{-3}$)	1715 ± 0,01	1695 ± 0,01	1715 ± 8,55	1695 ± 8,40
Capacité thermique massique ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)	2093,02 ± 0,01	1251,46 ± 0,01	1900 ± 9,50	1195,5 ± 5,97
Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,62 ± 0,08	0,63 ± 0,03	0,60 ± 0,03	0,53 ± 0,03
Effusivité thermique ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$)	1493,99 ± 0,04	1161,12 ± 0,02	1358,5 ± 2,72	1249,75 ± 2,5
Diffusivité thermique ($m^2.s$) x 10 ⁷	1,72 ± 0,07	2,94 ± 0,4	1,85 ± 0,09	2,64 ± 0,13

Les valeurs obtenues avec les deux (02) appareils sont sensiblement les mêmes. Cependant la faible différence observée peut s'expliquer par le fait que les mesures ne sont pas réalisées dans les mêmes périodes et conditions. En comparant les incertitudes, on constate que les résultats obtenus par le plan chaud sont plus précis que ceux obtenus par le KD2-Pro. Cela est peut-être dû aux résistances de contact des sondes. D'un point de vue strictement thermique, quatre propriétés intrinsèques caractérisent un matériau : la conductivité thermique, la capacité calorifique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. Parmi ces dernières, deux seulement sont indépendantes. La connaissance donc de deux d'entre elles permet la détermination des deux autres [21]. La diffusivité thermique et l'effusivité thermique ont été déterminées à partir de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique. Les conductivités thermiques obtenues pour les briques A et B sont respectivement de 0,62 $W.m^{-2}$ et 0,63 $W.m^{-2}$. Elles sont proches des

valeurs des conductivités thermiques des blocs de terre stabilisée au ciment et au papier qui varient de 0,490 à 0,671 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ mesurées par Ouédraogo et al [22]. Les briques A et B sont des matériaux isolants car les valeurs de leurs conductivités sont relativement faibles. Cela permettra de ralentir le transfert de chaleur donc le flux thermique dans les matériaux. Ces faibles valeurs sont dues aux porosités élevées des blocs car ils ne sont pas comprimés et les pores contiennent plus d'air qui est plus isolant. La capacité thermique massique de la brique A (2 093, 02 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) est plus élevée que celle de la brique B (1 251,46 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$). La brique A aura donc une plus grande capacité de stockage de la chaleur que la brique B. Les valeurs de la diffusivité thermique sont respectivement de $1,72\cdot 10^{-7} \text{m}^2\cdot\text{s}$ pour la brique A et de $2,94\cdot 10^{-7} \text{m}^2\cdot\text{s}$ pour la brique B. Ces faibles valeurs sont dues au caractère isolant des deux matériaux. Nous pouvons dire que le flux de chaleur mettra du temps à traverser les parois construites avec ces briques, surtout avec la brique A. La diffusivité est une grandeur qui traduit la capacité du matériau à transmettre la chaleur. Quant aux valeurs de l'effusivité thermique, elle est de 1493,99 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour la brique A et de 1161,12 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour la brique B. Comme les valeurs d'effusivité sont élevées, les briques A et B absorbent rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface. A partir des valeurs des propriétés thermo-physiques, nous recommandons l'utilisation de la terre A pour la confection des adobes car ses briques ont les meilleures caractéristiques thermiques. Les valeurs des propriétés thermo-physiques des matériaux adobe A et B permettront de faire une modélisation des transferts thermiques et de prédire le comportement thermique de l'habitat. Les propriétés thermiques sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou de plusieurs types de transfert thermique. La mesure de ces propriétés est donc indissociable de la connaissance de la nature du matériau et de la mesure de la température [23].

3-2-2. Caractéristiques mécaniques

Pour la caractérisation mécanique, nous nous sommes intéressés plus à la résistance mécanique car c'est la propriété mécanique la plus sollicitée dans le domaine de la construction. Le **Tableau 3** nous donne les valeurs des résistances mécaniques de deux types de briques.

Tableau 3 : Résistance mécanique

	Brique A	Brique B
Résistance mécanique (MPa)	0,95 ± 0,04	0,78 ± 0,03

Les valeurs de résistance mécanique des briques A et B à l'état sec sont faibles. Cela entraîne une faible durabilité du matériau surtout en présence de l'eau. Cependant, elles présentent des avantages avec les valeurs des propriétés thermiques et physiques obtenues. Aussi, la stabilisation de ce matériau permet d'améliorer les propriétés mécaniques. Nous notons que les valeurs trouvées sont sensiblement proches de celles de la littérature. Par exemple, une valeur de résistance en compression de 0,7 MPa et 0,78 MPa pour les briques en terre crue stabilisées au ciment (6 %) mélangé à 0 % et à 2 % de la canne à sucre a été obtenue [24]. Avec les briques en terre crue stabilisées à la chaux (de 0 à 10 %), des valeurs de résistance en compression variant de 0,6 à 1,3 MPa ont été obtenues [25]. Au regard de ces résultats, les résultats obtenus sont donc acceptables. Ainsi, l'adobe et la petite brique étudiées sont utilisables pour la construction. Le confort thermique dépend des caractéristiques thermiques des matériaux qui composent l'enveloppe du bâtiment. Cependant, pour la résistance de l'enveloppe ces matériaux doivent avoir de bonnes résistances mécaniques. Ce qui prouve que le choix du matériau doit être fait à partir de la connaissance des propriétés thermophysique et mécanique. Ainsi, l'ambiance thermique est influencée par une multitude de paramètres auxquels les individus sont plus ou moins sensibles selon le contexte [26].

3-3. Comportement thermique

Les mesures de températures ont été réalisées avec un midi LOGGER GL220 avec des thermocouples de type J. Les mesures des températures intérieure et extérieure ont été réalisées pour les journées du 17 Janvier 2018 et du 04 avril 2017. Ces mesures ont permis d'obtenir les **Figures 2** et **3** représentant respectivement l'évolution des températures intérieure et extérieure des journées du 17 janvier 2018 et 04 avril 2017.

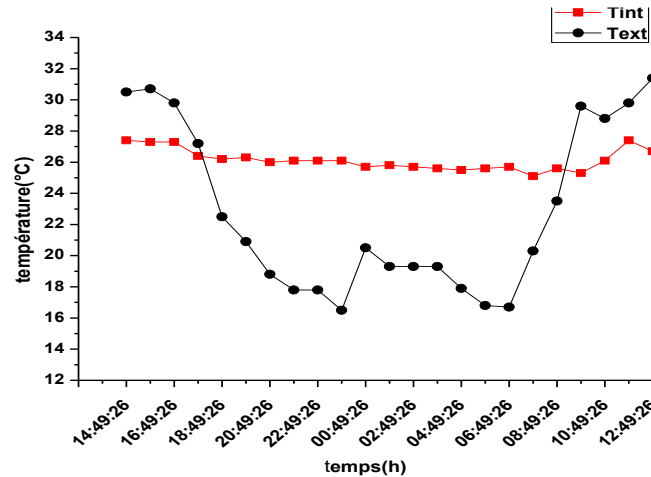


Figure 2 : Profil journalier des températures extérieure et intérieure

On note que la température intérieure minimale est de 25 °C et la température maximale 30,5 °C. Aussi, la température intérieure est pratiquement constante (27°C) entre 17 h et 09 h et passe à 30,5 °C entre 09 h et 17 h. Nous notons que les températures intérieures sont supérieures aux températures extérieures dans la plage de 20 h à 13 h, cela est dû à la forte inertie des parois. Cette grande inertie permet de justifier le fort amortissement des amplitudes thermiques internes.

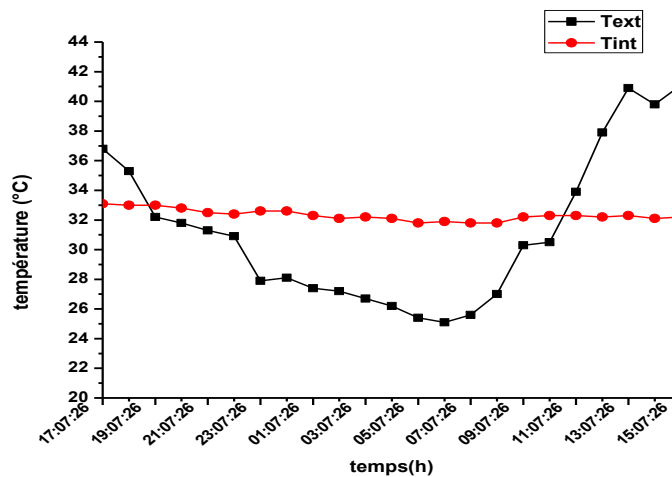


Figure 3 : Profil journalier des températures extérieure et intérieure

La température intérieure varie peu car elle va de 32,5 °C à 33 °C tandis la température extérieure a une variation très remarquable qui va de 26 °C à 42 °C. On note une forte atténuation des variations de la température à l'intérieur. Cela est dû à la forte épaisseur des parois donc à l'inertie.

4. Conclusion

Connaître les propriétés d'une terre destinée à la fabrication des briques est nécessaire car ce sont ces différentes propriétés qui déterminent le comportement de la brique. Les travaux effectués sur le terrain ont consisté au prélèvement des terres A et B et à la confection des adobes. Les limites d'Atterberg et la granulométrie de ces sols ont été déterminées. Ces résultats obtenus ont permis de faire la classification de ces terres. Les essais montrent que la terre A est composée de graviers, sables, limons et d'argiles et la terre B, de sables, de limons et d'argiles. La caractérisation géotechnique des terres A et B a montré qu'ils sont tous deux des sols fins peu plastiques. Les valeurs des propriétés thermophysiques déterminées montrent que l'utilisation de ces matériaux permettra de minimiser les apports thermiques dans les bâtiments. Pour le choix d'un matériau, en plus des propriétés thermophysique, il faut également tenir compte de sa résistance mécanique. Les valeurs des résistances mécaniques montrent des valeurs relativement faibles (0,78 MPa et 0,95 MPa) car les adobes A et B ne sont pas stabilisées. Cependant, ces briques sont de bonne qualité et peuvent donc être utilisées pour la construction. L'habitat voute nubienne permet d'atténuer la température et d'obtenir un confort thermique comme le prouvent les valeurs de la diffusivité et de l'effusivité des adobes qui composent son enveloppe. Ce confort thermique acceptable dans la voute nubienne est confirmé par les mesures de température intérieure. Ces mesures indiquent que la température intérieure varie de 32,5°C à 33°C pour la journée du 04 avril 2017 et de 27°C à 30,5°C pour la journée du 18 janvier 2018. Nous pouvons dire que l'utilisation de ces adobes contribuera à améliorer le confort thermique dans l'habitat et à valoriser les matériaux locaux.

Remerciements

Nous remercions l'ISP de l'université d'Uppsala, en Suède, pour son soutien au projet BUF01.

Références

- [1] - H. BENOUALI, A. BRARA, M. MAHDAD, F. MOKHTARI, Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée ; XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, (2011)
- [2] - A. HALIDI, confort thermique d'une habitation bioclimatique à antananarivo, thèse, université d'Antananarivo, (2015)
- [3] - EDWARD HALAWA, AMIRHOSEIN GHAFARIANHOSEINI, ALI GHAFARIANHOSEINI, JEREMY TROMBLEY, NORHASLINA HASSAN, MIRZA BAIG, SAFIAH YUSMAH YUSOFF, MUHAMMAD AZZAM ISMAIL, A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates : Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 3, (2018) 2147 - 2161
- [4] - SEYEDEHZAHRA MIRRAHIMI, MOHD FARID MOHAMED, LIM CHIN HAW, NIK LUKMAN NIKIBRAHIM, WARDAH FATIMAH MOHAMMAD YUSOFF, ARDALAN AFLAKI, The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 53, (2016) 1508 - 1519
- [5] - LOYDE V. DE ABREU-HARBICH, VICTOR L. A. CHAVES, MARIA CAROLINA G. O. BRANDSTETTER, Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate. *Building and Environment*, Volume 135, (2018) 257 - 268

- [6] - TRUPTI J. DABE, VINAYAK S. ADANE, The impact of building profiles on the performance of daylight and indoor temperatures in low-rise residential building for the hot and dry climatic zones. *Building and Environment*, Volume 140, (2018) 173 - 183
- [7] - DAVID Y. K. TOGUYENI, OUSMANE COULIBALY, ABDOULAYE OUEDRAOGO, JEAN KOULIDIATI, YVAN DUTILC, DANIEL ROUSSE, Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw. *Energy and Buildings*, 50 (2012) 74 - 80
- [8] - A. COMPAORE, B. OUEDRAOGO, H. GUENGANE, E. MALBILA, D. J. BATHIEBO, Role of Local Building Materials on the Energy Behaviour of Habitats in Ouagadougou. *IRA International Journal of Applied Sciences* (ISSN 2455-4499), 8(2), (2017) 63 - 72
- [9] - ABDOULAYE COMPAORE, BOUREIMA DIANDA, GILBERT NANA, D. JOSEPH BATHIEBO, BELKACEM ZEGHMATI, XAVIER CHESNEAU AND STÉPHANE ABIDE, Modeling of Heat Transfer in a Habitat Built in Local Materials in Dry Tropical Climate. *Physical Science International Journal*, 7(1) (2018) 1 - 11
- [10] - KOSSI B. IMBGA, EMMANUEL OUEDRAOGO, VINCENT SAMBOU, FLORENT P. KIENO, ABDOULAYE OUEDRAOGO and DIENDONNÉ JOSEPH BATHIEBO, New Materials for Thermal Insulation in Rural Construction. *Current Journal of Applied Science and Technology* 29(4) (2018) 1 - 10
- [11] - D. TOGUYENI, O. COULIBALY, A. OUEDRAGO, J. KOULIDIATI, Y. DUTIL, D. R. ROUSSE, Etude de l'influence de matériaux locaux isolants de toiture sur les charges de climatisation d'une maison individuelle en argile-paille, CIFEM1 (2012)
- [12] - A. LAWANE, A. PANTET, R. VINAI - J. H. THOMASSIN, Caractérisation des matériaux latéritiques pour une meilleure utilisation en Afrique, 20ème Congrès Français de Mécanique Besançon, 29 août au 2 septembre (2011)
- [13] - D. BORO, P. F. KIENO AND E. OUEDRAOGO, Experimental Study of the Thermal and Mechanical Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sawdust According to the Rates for the Thermal Insulation of a Building, *International Journal of Construction Engineering and Management* (2017)
- [14] - K. B. IMBGA, Confort thermique et efficacité énergétique dans un habitat en zone sahélienne, Thèse, Université Joseph KI-ZERBO, (2017)
- [15] - Y. JANNOT, Théorie et pratique de la métrologie thermique, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), (2011)
- [16] - YOUNOUSSA MILLOGO, Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route), Thèse, Université de Ouagadougou, (2008)
- [17] - Agence Française de Normalisation (AFNOR), Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons, Définitions - Spécifications - Méthodes d'essai - Conditions de réception, XP P13-901 (2001) 10
- [18] - K B. IMBGA and al., Study of the Thermal and Mechanical Performance of Laterite Blocks Mixed with Insulation of Buildings, *Physical Science International Journal*, 11(2) (2016) 1 - 10
- [19] - D. Y. K. TOGUYENI, J. D. BATHIEBO et J. KOULIDIATI, Etude expérimentale, par la méthode du plan chaud, des propriétés thermophysiques d'un bois tropical et d'un panneau isolant formulé avec des intrants locaux, *Soc. Ouest-Afr. Chim.* 032, (2011) 18 - 26
- [20] - D. W. OSOMBA, Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo), Thèse, Université de Kinshasa, (2012)
- [21] - M. TLIJANI, Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier, Université Paris Est - Créteil, (2016)
- [22] - E. OUEDRAOGO et al., Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment, *Journal of materials and engineering structures* (2015)

- [23] - F. LE FRIOUS, Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques, Laboratoire National de Métrologie et d'Essai, LNE/DRST, (2010)
- [24] - S. A. LIMA and al., Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash, *Elsevier*, (2012)
- [25] - I. ALAM, A. NASEER et A. A. SHAH, Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas, *Elsevier* (2015)
- [26] - F. LAVOYE et F. THELLIER, Le confort thermique dans les bâtiments, PRISME, HAL Id: hal-02180957, (2019)