

Caractérisation multi-échelle des propriétés thermiques et hydriques des matériaux de construction à base de briques en terre crue.

Sara CHEHADE^{1*}, Nicolas DUJARDIN¹, David GIOVANNACCI², Abderrahim BOUDENNE¹

¹Université Paris Est Créteil, CERTES, 61 Av. du Général de Gaulle 94010 France.

²Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 Rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France.

* (auteur correspondant : sara.chehade@u-pec.fr.)

Résumé - Cette étude évalue la capacité des briques de terre compactées (BTC) du nord de la France à maintenir des conditions intérieures confortables, en tenant compte de l'importance du confort intérieur dans le choix de nouveaux matériaux de construction en réponse aux préoccupations environnementales. Pour ce faire, les comportements hydrique et thermique de la terre crue ont été analysés à l'échelle de la brique. À l'échelle du mur, divers scénarios représentant des situations de la vie réelle ont été étudiés. Un mur de dimensions 50 x 50 x 10 cm³ a été construit et placé dans une chambre climatique, simulant deux conditions thermiques extérieures distinctes avec une humidité relative (HR) fixée à 50%. L'environnement intérieur a été maintenu à 20°C et 50% HR. Les résultats soulignent les propriétés thermophysiques avantageuses des BTC par rapport au béton et à d'autres matériaux biosourcés. Une analyse approfondie à l'échelle du mur, comprenant des cycles de température, a révélé un refroidissement plus rapide que le chauffage, avec une stabilisation après 10 heures d'exposition à une température constante de 40°C.

Nomenclature

BTC	Briques de Terre Compactée	<i>Symboles grecs</i>	
a	Absorption capillaire, Kg.m ⁻² .s ^{-1/2}	δ	Perméabilité à la vapeur d'eau, Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹
W_f	Teneur en humidité capillaire, Kg.m ⁻³	λ	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
MBV	Moisture Buffer Value, g.(m ² .%HR) ⁻¹	α	Diffusivité thermique, m ² .s ⁻¹
C_p	Chaleur spécifique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹		

1. Introduction

De nombreuses initiatives ont été mises en place pour atténuer l'impact de la construction sur la consommation d'énergie et l'environnement en général. En parallèle à ces préoccupations environnementales, le confort des occupants et la qualité de l'air intérieur émergent comme des facteurs cruciaux dans la sélection des matériaux de construction. La terre, utilisée comme matériau de construction naturel au même titre que le bois depuis les débuts de l'humanité, semble répondre à toutes les exigences précédemment énoncées. Elle se trouve en abondance et peut être réutilisée ; elle nécessite un minimum d'énergie pour sa transformation et son transport, ce qui en fait une option attrayante. La terre crue présente des propriétés thermiques et hygroscopiques remarquables [1-3], offrant la possibilité de créer un environnement intérieur confortable tout en réduisant la dépendance à la climatisation et au chauffage. Ce travail s'engage à analyser les propriétés thermophysiques de la terre crue en vue d'évaluer sa capacité à assurer une isolation efficace. Pour ce faire, ces propriétés ont été examinées à l'échelle de la brique et de la paroi, permettant ainsi de comprendre la réaction de la terre crue dans des conditions météorologiques sévères et réalistes.

2. Matériels et méthodes

2.1. Matériaux

Les briques de terre cuite utilisées dans cette étude proviennent d'une briqueterie située dans le Nord de la France. Elles sont composées uniquement de la terre compactée. La terre a été intégrée dans un moule métallique manuel de compactage, où les briques de dimension standards ont été compactées. Ces BTC ont une dimension de 22 x 10 x 6 cm³ et possèdent une masse volumique de 1880 kg.m⁻³ avec une porosité de 26%.

2.2. Caractérisations des propriétés thermo-hydriques

2.2.1. Propriétés hydriques

Les propriétés hygroscopiques ont été caractérisées dans le but de comprendre le comportement de la brique lorsqu'elle est soumise à des variations d'humidité environnante, ainsi que sa capacité à réguler le milieu intérieur par l'échange de vapeur d'eau. À cette fin, l'absorption capillaire a été analysée conformément à la norme NF EN 15801[4], fournissant des informations sur la capacité de la brique à absorber l'eau lorsque sa surface entre en contact avec celle-ci. La MBV (Moisture Buffer Value), mesurée selon la norme du protocole du NORDTEST [5], indique le potentiel de la brique à stocker et évacuer l'humidité en réponse à des niveaux d'humidité variables. La perméabilité à la vapeur d'eau évalue la capacité d'un matériau à transférer l'humidité lorsqu'il est exposé à un gradient d'humidité, mesurée par le test de la coupelle selon la norme NF EN ISO 12572 [6]. L'isotherme de sorption/désorption nous renseigne sur la capacité de la brique à adsorber/désorber la vapeur d'eau lorsqu'elle est soumise à une humidité donnée. L'appareil utilisé est un Vsorp de chez ProUmid.

2.2.2. Propriétés thermophysiques

Le Hot Disk a été utilisé pour évaluer la conductivité, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique de la brique (Figure 1), conformément à la norme NF EN ISO 22007-2 [7]. Le dispositif utilisé pour cette méthode était le TPS 2500 S de Thermoconcept, qui dispose d'une sonde plate (sonde 5501) qui est insérée entre deux échantillons identiques. Cette sonde agit comme une source de chaleur, augmentant la température de l'échantillon tout en enregistrant l'augmentation de la température au cours du temps. Plusieurs mesures ont été effectuées pour différentes orientations et tailles d'échantillons. Les propriétés thermophysiques des briques sèches et humides ont été évaluées.

En outre, pour évaluer l'impact de l'humidité et de la température sur la terre, les propriétés thermophysiques ont été mesurées dans diverses conditions. Un échantillon de 11 x 10 x 6 cm³ a été placé dans une chambre climatique connectée au Hot Disk. La conductivité et la diffusivité thermique ainsi que la chaleur spécifique ont été mesurées à différents niveaux d'humidité relative (10%, 50% et 80% HR) et pour des températures allant de 10°C à 40°C (à des intervalles de 10°C) à chaque niveau d'humidité.

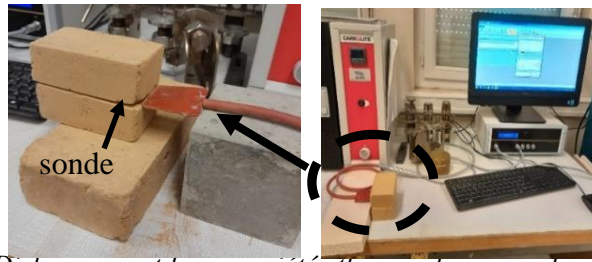


Figure 1 : Hot Disk mesurant les propriétés thermophysiques des briques retaillées

2.3. Étude expérimentale à l'échelle de la paroi

2.3.1. Construction du mur

Un mur de dimensions $50 \times 50 \times 10 \text{ cm}^3$ a été construit en utilisant des BTC et du mortier de terre provenant de la même briqueterie (Figure 2(a)). Avant de commencer les expériences, le mur a subi une période de séchage de deux mois en laboratoire pendant l'été. Des capteurs de température et d'humidité (MSR 145B, TH industrie) ont été placés à différentes profondeurs dans le mur, un sur chaque face et trois dans l'épaisseur du mur ; plus précisément, à 2,5 cm, 5 cm et 7,5 cm de la face extérieure, positionnés dans la zone centrale.

2.3.2. Dispositif expérimental

Une paroi a été construite et installée dans un environnement bi-climatique. Ce dispositif a permis d'exposer les deux faces du mur à des conditions hygrothermiques distinctes, représentant respectivement l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Le système bi-climatique utilisé dans l'étude comprend une chambre climatique (Mettler ICH 260) dont la porte est retirée et remplacée par un cadre métallique conçu sur mesure pour soutenir le mur et le relier à la chambre. L'ensemble du dispositif est installé dans une pièce à température contrôlée (fixée à 20°C) et à hygrométrie ambiante. La chambre climatique est utilisée pour simuler l'environnement extérieur en soumettant la face extérieure du mur à des cycles de température dynamiques, tandis que la face intérieure est exposée à température constante et humidité ambiante pour représenter l'environnement intérieur d'un bâtiment. Les surfaces latérales du mur ont été isolées avec 4 cm de polystyrène expansé pour éviter les fuites thermiques et assurer un transfert hygrothermique unidirectionnel (Figure 2(b)).

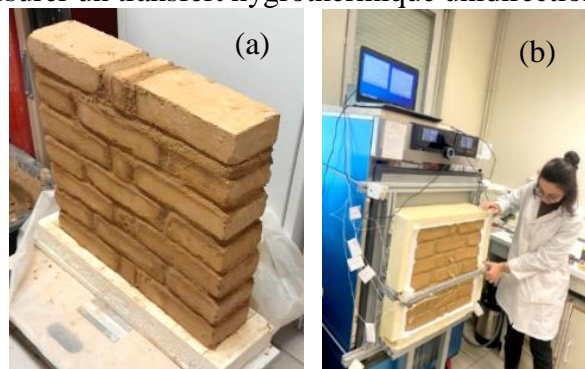


Figure 2 : Dispositif expérimental ; (a) préparation de mur de terre crue ; (b) installation du mur dans la chambre climatique

2.3.3. Scénarios thermiques

Le mur placé dans la chambre bi-climatique a été soumis à différents scénarios. L'environnement intérieur est resté constant à 20°C et 50% HR. Quant aux conditions extérieures, l'humidité relative était de 50% HR et la température a suivi divers scénarios. Dans le premier scénario, une simulation jour/nuit d'une canicule a été réalisée, la température étant maintenue à 40°C pendant 12 heures pour représenter la journée, puis à 20°C pendant 12 heures pour simuler la nuit. Le second scénario prévoyait un chauffage continu à 40°C jusqu'à l'obtention d'un état d'équilibre (Figure 3).

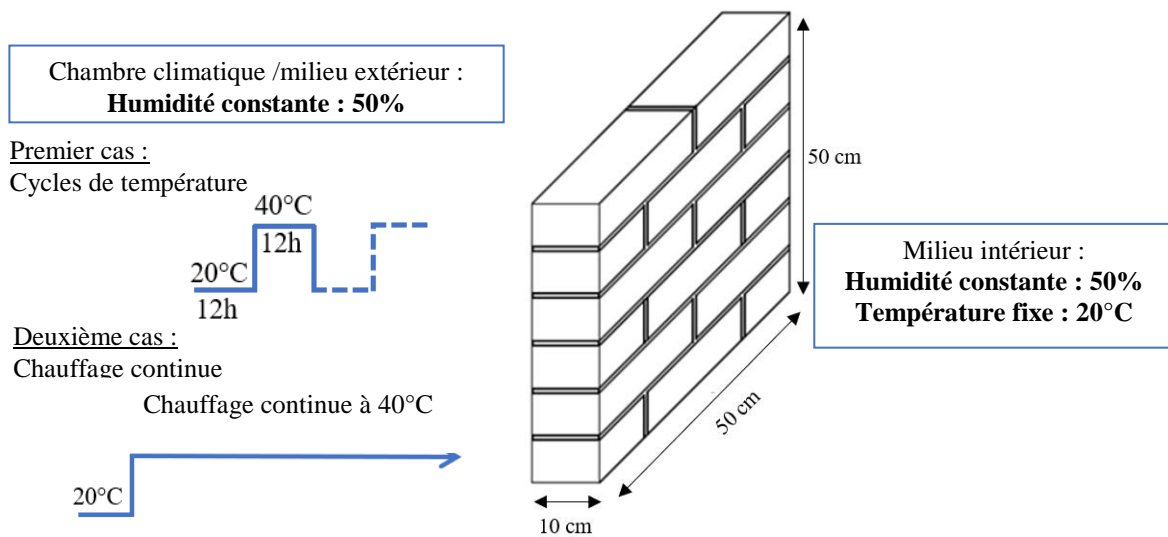


Figure 3 : Scénarios appliqués au mur

3. Résultats et discussion

3.1. Propriétés hydriques de la brique

Le tableau 1 présente les propriétés hydriques de la brique comparées à celles de la littérature. Ses propriétés hydriques semblent similaires à celles d'autres matériaux en terre crue.

Tableau 1 : Propriétés hydriques de la brique de terre en comparaison à la littérature.

Matériaux	Absorption capillaire a ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$)	Teneur en humidité capillaire W_f (kg.m^{-3})	MBV ($\text{g.m}^{-2}.\text{(%HR)}^{-1}$)	Perméabilité à la vapeur d'eau $\delta \times 10^{-11}$ ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)	Teneur en eau (%)
Ce travail	0,17	135	3,26	1,3	4,4
Belarabi et al. [8] (Torchis)	-	-	1,4	1,08	5,1
L.Soudani [9] (pisé)	0,28	-	-	-	3,8
L.Laou [10] (brique de terre crue)	0,092	-	2,74	1,2	3,4

3.2. Caractérisations des propriétés thermophysiques à l'échelle de la brique

Le tableau 2 présente les résultats des propriétés thermiques obtenus sur une brique dans des conditions ambiantes. En comparaison avec Khoudija *et al.* [11], la valeur de la chaleur spécifique est de $1168,83 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des briques en terre, ce qui est légèrement plus élevé que celle obtenue pour notre brique ($800 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Ben Mansour *et al.* [12] ont rapporté une chaleur spécifique de $520 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une diffusivité thermique de $0,9 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$ (contre $0,7 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$ dans cette étude) pour des briques en terre de masse volumique similaire.

La conductivité thermique de la BTC ($1,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) semble légèrement plus élevée que les valeurs rapportées d'autres méthodes de constructions de terre crue. Cagnon *et al.* [13] ont établi une corrélation entre la conductivité thermique et la densité ; pour les briques de terre, la conductivité thermique était de $0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une densité de 1900 kg.m^{-3} , ce qui est nettement inférieur aux valeurs obtenues dans cette étude. Ben Mansour *et al.* [12] ont démontré une relation entre la densité, la porosité, la pression de compression des BTC et leurs propriétés thermophysiques. Les résultats indiquent qu'une diminution de la densité apparente entraîne une réduction de la conductivité thermique pour les briques de terre compactées, ce qui donne une conductivité thermique de $0,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une BTC de densité de 1800 kg.m^{-3} . Brambilla *et al.* [14] ont rapporté une conductivité thermique de $0,79$ pour une BTC de densité de 1900 kg.m^{-3} . Selon Hany *et al.* [15], les BTC avec 10% de ciment à 1995 kg.m^{-3} présentent une conductivité thermique de $1,262 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La valeur de conductivité thermique obtenue ($1,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) dans cette étude semble être en accord avec celles de la littérature pour le même mode de construction en terre crue. Pour Laurent [16], une relation linéaire entre la densité et la conductivité thermique de la terre crue a été démontrée et est en corrélation avec nos résultats. De plus, ces valeurs de conductivité thermique sont inférieures à celles des matériaux de construction conventionnels tels que le ciment et le béton, qui se situent autour de $1,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [16-17].

Tableau 2 : Les propriétés thermique de la brique à température ambiante et 50% HR.

Conductivité thermique $\lambda \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$	Diffusivité thermique $\alpha \text{ (mm}^2.\text{s}^{-1}\text{)}$	Chaleur spécifique $C_p \text{ (J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$
$1,15 \pm 0,03$	$0,70 \pm 0,04$	800 ± 40

Une brique de $11 \times 10 \times 6 \text{ cm}^3$ a été soumise à des variations d'humidité relative et de température dans une chambre climatique tout en étant connectée au Hot Disk pour les mesures de conductivité thermique. La réponse de la brique aux variations de la teneur en humidité et de la température est illustrée à la Figure 4. La conductivité thermique de la BTC augmente avec l'augmentation de l'humidité relative. Cependant, aucun changement notable n'est observé avec les augmentations de température. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes de Collet *et al.* [18] et Laurent [16], qui mettent en évidence une corrélation linéaire entre l'évolution de la conductivité thermique et la teneur en eau ; ce qui est observé dans la réponse du BTC aux variations de HR dans la Figure 4(b), où la conductivité thermique semble augmenter avec l'augmentation de l'humidité pour toutes les températures. En outre, cette augmentation reste relativement modérée et se situe dans la marge documentée dans la littérature existante.

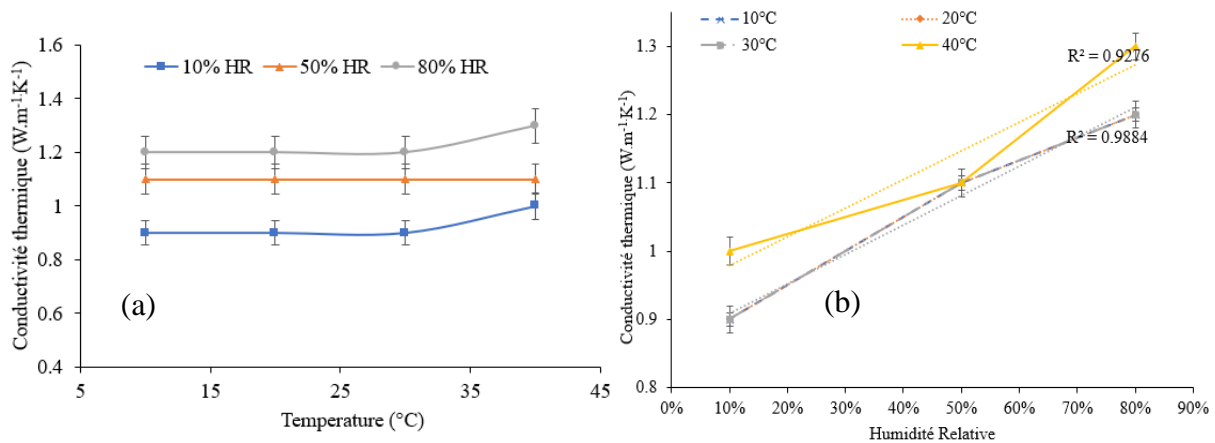


Figure 4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la variation de la température et de l'humidité relative.

3.3. Réponse thermique de la paroi soumise aux cycles de température

Le mur était soumis à plusieurs scénarios visant à comprendre sa réaction à des cycles de température variables. Le premier cas a simulé une canicule avec des fluctuations de température de 40°C pendant 12 heures (représentant la journée) à 20°C pendant les 12 heures suivantes (représentant la nuit). Ce cycle a été répété pendant 7 jours pour évaluer sa cohérence. La figure 5 illustre l'évolution de la température en fonction du temps à différents endroits du mur pendant 3 cycles. La répétitivité de ce cycle au cours des 3 jours est évidente. À une température extérieure de 40°C, la température la plus élevée enregistrée sur la face extérieure du mur a atteint 34,86°C. Un gradient de température est observable entre les capteurs placés sur les faces externes et internes du mur, indiquant une différence de 9,81°C. Pendant la phase de refroidissement, tous les capteurs à différentes profondeurs ont enregistré des températures autour de 20°C. Au contraire, pendant la phase de chauffage, des variations perceptibles ont été observées entre les différentes positions du mur. Cet écart suggère des réponses différentes du mur aux phases de chauffage et de refroidissement, ce qui signifie que le processus de refroidissement est plus rapide que la phase de chauffage.

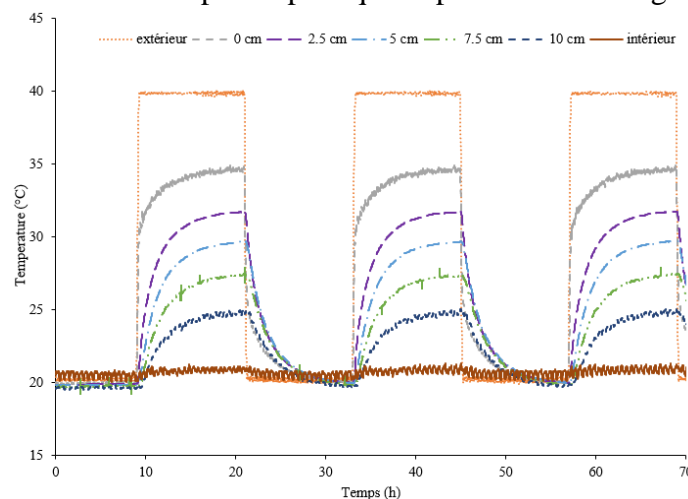


Figure 5 : Réponse de la paroi pour des variations cycliques de température entre 40°C et 20°C.

3.4. Comportement de la paroi sous un chauffage continu à 40°C

Dans le deuxième scénario de cette étude, la température extérieure a été maintenue constante à 40°C jusqu'à ce qu'elle atteigne un état stable. La figure 6 illustre le comportement de la

température du mur pour différentes profondeurs en fonction de la variation du temps. Il a fallu environ 10 heures pour que le mur atteigne la stabilité thermique, avec une température maximale de 36,6°C sur la face extérieure et de 26°C sur la face intérieure.

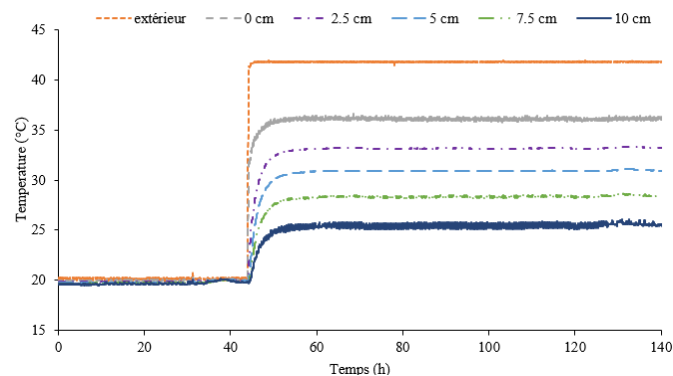


Figure 6 : Evolution de la température au cours du temps dans l'épaisseur du mur

La figure 7 présente l'évolution de la température au cours du temps à différentes profondeurs du mur. La surface extérieure a réagi rapidement au chauffage, montrant une augmentation initiale de 12 degrés au cours de la première heure. Cependant, le taux d'augmentation de la température diminue au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans le mur. Comme indiqué, la paroi atteint sa température maximale de 36°C après 12 heures de chauffage continu.

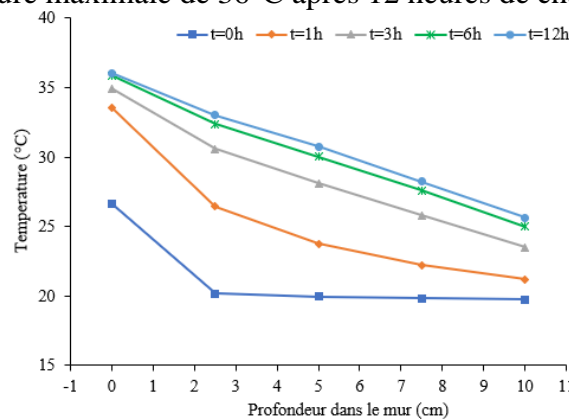


Figure 7 : Profils de température à travers le mur à différents moments du chauffage

4. Conclusion

Cette étude porte sur l'analyse de la conductivité thermique et des propriétés thermiques d'une (BTC) ainsi que sur le comportement thermique d'un mur construit à l'aide de BTC et de mortier de terre. Les propriétés hydriques révèlent que la brique est capable de réguler l'humidité de l'environnement intérieur grâce à sa capacité à absorber et désorber l'eau. Les résultats démontrent qu'à une température de 20°C et une humidité relative de 50%, la conductivité thermique mesurée ($1,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est en accord avec les valeurs de la littérature. De plus, l'augmentation de l'humidité relative entraîne également une augmentation de la conductivité thermique du BTC, alors que les variations de température n'ont pas produit de modifications significatives.

Un mur a été construit et placé dans une chambre bi-climatique permettant des variations de température et d'humidité sur les deux faces du mur afin d'étudier l'impact des variations thermiques sur le transfert de chaleur. Alors que la face intérieure a conservé une température constante de 20°C et une humidité relative de 50%, la face extérieure a connu deux cycles de température distincts. Dans le premier scénario, imitant une canicule, alternant entre le jour et la nuit, le mur a présenté des réponses différentes pendant les phases de chauffage et de

refroidissement, indiquant un processus de refroidissement plus rapide que le chauffage. Pendant la phase de chauffage continu à 40°C, le mur a mis environ 10 heures pour atteindre la stabilité thermique. Enfin, une étude numérique sera très prochainement entreprise afin de valider le modèle de transfert thermique à travers la paroi pour estimer dans un deuxième temps le comportement statique et dynamique de ce type de construction pour différents climats

Références

- [1] F. McGregor, A. Heath, E. Fodde, et A. Shea, « Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks », *Build. Environ.*, vol. 75, p. 11- 18, mai 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.01.009.
- [2] G. Minke, « Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture », *Birkhäuser Basel*, janv. 2005, Consulté le: 11 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/en/68778205/Building_with_Earth_Design_and_Technology_of_a_Sustainable_Architecture
- [3] P. Taylor, R. J. Fuller, et M. B. Luther, « Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building », *Energy Build.*, vol. 40, n° 5, p. 793- 800, janv. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.05.013.
- [4] « NF EN 15801 Conservation of cultural property - Test methods - Determination of water absorption by capillarity ».
- [5] Rode, Carsten; Peuhkuri, Ruut Hannele; Hansen, Kurt Kielsgaard; Time, Berit; Svennberg, Kaisa; et Arfvidsson, Jesper; Ojanen, Tuomo, « NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials ». 2005.
- [6] « NF EN ISO 12572 Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method ».
- [7] « NF EN ISO 22007-2 Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method ».
- [8] Y. E. Belarbi *et al.*, « Experimental Characterization of Raw Earth Properties for Modeling Their Hygrothermal Behavior », *Buildings*, vol. 12, n° 5, Art. n° 5, mai 2022, doi: 10.3390/buildings12050648.
- [9] C. Lucile, « Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material », phdthesis, Université de Lyon, 2016. Consulté le: 11 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01585348>
- [10] L. Laou, « Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation », phdthesis, Université de Limoges, 2017. Consulté le: 26 janvier 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses-hal-science.ezproxy.u-pec.fr/tel-02459154>
- [11] D. Khoudja, B. Taallah, O. Izemmouren, S. Aggoun, O. Herihiri, et A. Guettala, « Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste », *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, p. 121824, févr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121824.
- [12] M. B. Mansour, A. Jelidi, A. S. Cherif, et S. B. Jabrallah, « Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB) », *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, p. 44- 51, févr. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024.
- [13] H. Cagnon, J. E. Aubert, M. Coutand, et C. Magniont, « Hygrothermal properties of earth bricks », *Energy Build.*, vol. 80, p. 208- 217, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- [14] A. Brambilla et T. Jusselme, « Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype », *Energy Build.*, vol. 156, p. 281- 292, déc. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.070.
- [15] E. Hany, N. Fouad, M. Abdel-Wahab, et E. Sadek, « Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement », *Constr. Build. Mater.*, vol. 281, p. 122535, avr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122535.
- [16] J.-P. Laurent, « Propriétés thermiques du matériau terre », *Cah. CSTB*, vol. Cahier 2156, p. 17 pages, janv. 1987.

- [17] M. Y. J. Liu, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, et K. H. Mo, « Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete », *Energy Build.*, vol. 72, p. 238- 245, avr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.029.
- [18] F. Collet et S. Pretot, « Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content », *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, p. 612- 619, août 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039.