

# Comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi

Giada GIUFFRIDA<sup>1</sup>, Laurent IBOS<sup>2\*</sup>, Abderrahim BOUDENNE<sup>1</sup>, Hamza ALLAM<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Est-Créteil, CERTES, 61 Av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France

<sup>2</sup> Université Paris Est-Créteil, CERTES, 36 Rue Georges Charpak, 77567 Lieusaint, France

\* (auteur correspondant : [ibos@u-pec.fr](mailto:ibos@u-pec.fr))

**Résumé** - La préoccupation croissante concernant l'impact environnemental de la construction contemporaine a mis l'accent sur la nécessité d'adopter de nouvelles technologies durables avec une énergie intrinsèque plus faible et une production de déchets minimisée, comme celles basées sur l'utilisation de matériaux en terre crue. Comprendre le comportement du matériau terre à différentes échelles est fondamental pour aspirer à son intégration et sa valorisation dans l'architecture de demain. Ce travail rapporte les résultats d'une caractérisation thermophysique de blocs de terre comprimée (BTC) produits avec les terres issues du chantier du Grand Paris. De plus, ces résultats sont utilisés pour simuler le comportement des parois en BTC à l'aide du logiciel de simulation Delphin. Grâce à la simulation, il est possible d'estimer le comportement statique et dynamique des parois en BTC dans un climat de référence. Enfin, les résultats des simulations sont comparés avec des mesures effectuées sur une paroi en BTC grandeur nature. Cette paroi a été testée à l'intérieur d'une boîte chaude gardée dans laquelle ont été reproduites des conditions de température similaires à celles simulées. Finalement, la comparaison entre les deux ensembles de résultats, effectuée en termes de résistance thermique et de paramètres dynamiques (facteur d'atténuation et déphasage), est présentée.

## Nomenclature

*BTC* blocs de terre comprimée

*n* porosité, %

*W80* teneur en eau massique à 80%HR, kg.m<sup>-3</sup>

*A<sub>w</sub>* coefficient d'absorption d'eau, kg.m<sup>-2</sup>s<sup>-1/2</sup>

*c<sub>p</sub>* capacité thermique massique, J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

*TL* déphasage horaire, h

*DF* facteur d'amortissement

*R* résistance thermique, m<sup>2</sup>.K.W<sup>-1</sup>

*T* température, °C

*t* temps, s ou h

*m<sub>(t,t+24)</sub>* variation relative de masse sur 24 heures

*Symboles grecs*

*ρ<sub>s</sub>* masse volumique sèche, kg .m<sup>-3</sup>

*λ<sub>%HR</sub>* conductivité thermique dépendante de la teneur en eau, W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>

*μ* facteur de résistance à la vapeur d'eau

*φ* densité de flux thermique, W.m<sup>-2</sup>

*Indices et exposants*

*se* surface extérieure paroi

*si* surface intérieure paroi

*i* environnement intérieur

*ext* environnement extérieur

## 1. Introduction

L'inquiétude croissante concernant l'impact environnemental du secteur de la construction contemporaine a mis l'accent sur la nécessité d'adopter de nouvelles technologies de construction durables avec une énergie grise inférieure, une efficacité énergétique plus élevée et une production de déchets minimisée. Dans ce contexte, la construction en terre crue est un domaine prometteur basé sur l'utilisation de matériaux peu coûteux, caractérisés par une large disponibilité, une non-toxicité et une excellente recyclabilité [1]. Plusieurs entreprises du secteur de la construction se sont orientées vers la production de matières premières

contemporaines en terre : parmi elles, se distingue l'expérience pionnière de Cycle Terre (Île de France). En effet, elle a basé sa production de produits à base de terre sur l'utilisation des matériaux issus du chantier du Grand Paris [2].

Afin d'adapter les performances des éléments de construction en terre crue aux besoins énergétiques élevés déterminés par la réglementation en vigueur, il existe un besoin croissant de travaux de recherche axés non seulement sur l'évaluation des performances des matériaux, mais également sur leur comportement à l'échelle de la paroi et du bâtiment. En ce sens, l'étude des performances hygrothermiques des murs en terre crue pour les systèmes de murs extérieurs semble fondamentale, tant par la simulation thermique que par des mesures in-situ. Ce travail présente la caractérisation physique, thermique et hydrique des blocs de terre comprimée (BTC) actuellement commercialisés par la société partenaire Cycle Terre. Les BTC étudiés constituent la stratigraphie de la paroi de base étudiée au moyen de mesures à l'échelle paroi (dans une Boîte Chaude Gardée). De plus, les propriétés des matériaux sont utilisées pour exécuter une simulation thermique dynamique à l'échelle du mur à l'aide du logiciel Delphin.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matériel

Les BTC étudiés sont composés d'au moins 65 % de terre crue et 35 % de sable de région parisienne. La caractérisation du matériau proposée concerne les propriétés suivantes : masse volumique sèche, conductivité thermique dépendante de la teneur en eau, capacité thermique, isothermes de sorption, coefficient d'absorption d'eau et perméabilité à la vapeur d'eau. Ce sont toutes des propriétés hygrothermiques fondamentales pour décrire le comportement des matériaux poreux à différentes échelles. En effet, le transfert de chaleur est couplé à un transport de masse à l'intérieur du matériau, ce dernier étant régi par la seule diffusion de vapeur à très faible humidité, par un mélange de gaz et d'eau dans le domaine hygroscopique, et par transport de liquide au-dessus de 95 % d'humidité relative.

La masse volumique sèche  $\rho_s$  des BTC a été déterminée selon [3], après séchage au four des échantillons jusqu'à poids constant à 70 °C (environ 7% HR) en considérant un état d'équilibre lorsque deux mesures, prises à 24 heures d'intervalle, diffèrent de moins de 0.2%, soit  $m_{(t, t+24)} < 0.2 \%$ .

La porosité  $n$  des BTC a été déterminée par estimation de la porosité totale à partir de la masse volumique théorique (réelle) et de la masse volumique expérimentale des BTC. La valeur théorique est celle des particules sans vides et sans pores d'air (mesurée par la méthode du pycnomètre [4]). L'estimation de la porosité totale est définie par :

$$n(\%) = \left(1 - \frac{\rho_{exp}}{\rho_{theor}}\right) * 100 \quad (1)$$

La conductivité thermique dépendante de la teneur en eau ( $\lambda_{\%HR}$ ) a été évaluée après conditionnement d'échantillons de 2 cm d'épaisseur et laissés dans une chambre climatique à une température constante de  $T = 20$  °C, tandis que l'humidité relative était successivement augmentée (comme dans [5, 6]), jusqu'à stabilisation de la masse ( $m_{(t, t+24)} < 0,1 \%$ ). Les échantillons ont été scellés puis caractérisés avec un appareil de type Hot Disk pour déterminer leurs propriétés thermiques. Pour rappel, cette méthode fait partie de la famille des méthodes à sondes thermiques fonctionnant en régime transitoire. Les sondes se présentent sous la forme de disques minces et souples qui servent à la fois au chauffage de l'échantillon et à la mesure de l'élévation de température. La sonde est placée entre deux échantillons identiques, lisses et plats, afin d'éviter tout contact avec l'air. Cette procédure permet de mesurer la conductivité thermique et la capacité thermique volumique ( $\rho c_p$ ).

L'isotherme de sorption a été déterminé conformément à [7] : l'étape de sorption consiste à mettre successivement un échantillon préalablement séché dans plusieurs environnements à

humidité relative et température constantes. Dans ce cas, la température choisie est de 20°C et les humidités relatives sont : 25%, 40%, 60%, 80%, 95%. L'échantillon est périodiquement pesé et reste dans un environnement donné jusqu'à ce que sa masse soit constante ( $m_{(t, t+24)} < 0.1 \%$ ). Dans le cas des simulations sur le logiciel Delphin, nous avons utilisé la valeur de la teneur en eau massique à la condition d'humidité relative de 80% (W80).

Le coefficient d'absorption d'eau  $A_w$  dû à l'action capillaire est déterminé par immersion partielle selon [8]. Les échantillons, préalablement séchés au four sont immergés dans un niveau d'eau de 5 mm et laissés à tremper pendant une période de temps spécifique ; après des intervalles de temps préétablis, les échantillons sont retirés de l'eau et pesés. Les résultats sont exprimés sous forme de rapport entre la variation de masse et la surface de base, puis tracés en fonction de la racine carrée du temps pour calculer  $A_w$ .

Le facteur de résistance à la vapeur d'eau  $\mu$  est évalué selon les méthodes dites des coupelles humide et sèche [9]. Le protocole expérimental utilisé consiste à sceller les échantillons sur une coupelle dont l'humidité relative est contrôlée grâce à une solution saline saturée. Ces coupelles sont ensuite placées dans une enceinte climatique (à température et humidité relative contrôlées), de manière à ce que le matériau testé se situe entre deux environnements de pressions partielles de vapeur d'eau différentes. Ce gradient de pression partielle entre la partie intérieure de la coupelle et l'extérieur (la chambre climatique) permet un transport de vapeur d'eau à travers l'échantillon, ce qui permet d'en évaluer la perméabilité et le facteur de résistance à la vapeur d'eau  $\mu$ .



Figure 1 : Observation au microscope (a), essai d'absorption capillaire d'eau (b), de sorption (c) et de perméabilité à la vapeur d'eau (d)

## 2.2. Simulation

Dans cette étude, les propriétés des BTC déterminées expérimentalement sont utilisées pour exécuter plusieurs simulations numériques afin d'évaluer le comportement hygrothermique des murs de BTC non isolés. Les murs sont simulés comme s'ils étaient constitués des BTC seulement (sans joints en mortier), au moyen du logiciel Delphin 6.1.2. Ce logiciel permet la résolution numérique d'équations d'équilibre dans un volume de contrôle fini pour décrire le transfert combiné de chaleur et de masse à l'intérieur du mur. Pour chaque matériau étudié, le logiciel requiert plusieurs propriétés hygrothermiques pour décrire les fonctions suivantes : transfert de chaleur et stockage de chaleur, stockage d'humidité, transport de vapeur et transport d'eau liquide. Cette étude a été réalisée pour le climat de référence de Paris (France) classé Cfb (climat marin de la côte ouest), sur trois années consécutives, avec des conditions initiales  $T = 25^\circ\text{C}$  et  $\text{HR} = 60\%$ .

Les objectifs cibles de cette étude sont l'estimation de la résistance thermique, dépendant de l'humidité, dont la fluctuation pourrait entraîner une augmentation des pertes thermiques à travers l'enveloppe, en la calculant sur la base des valeurs de conductivité thermique dépendant de l'humidité évaluées par simulation pour le matériau BTC [10]. L'étude par simulation permet également l'estimation de l'inertie de la paroi à travers des paramètres dynamiques tels que le déphasage horaire et le facteur d'amortissement. Le déphasage horaire ( $TL$ ) est le temps

nécessaire pour que la « vague » de chaleur (cycle de température journalier) diffuse d'un côté à l'autre d'un mur. Il est calculé par l'équation suivante :

$$TL = t_{T_{si,max}} - t_{T_{se,max}} \quad (2)$$

Le facteur d'amortissement ( $DF$ ) est le rapport de l'amplitude de la variation de température sur la surface intérieure et extérieure du mur et il est calculé grâce à l'équation suivante :

$$DF = \frac{T_{si,max} - T_{si,min}}{T_{se,max} - T_{se,min}} \quad (3)$$

### 2.3. Mesures sur paroi

La paroi BTC (60 x 60 x 15 cm) a été construite à l'intérieur d'un cadre d'essai isolant (mousse de polyuréthane). Des joints de fines couches de mortier de terre (0.5 cm d'épaisseur) ont été réalisés entre les BTC. Ce mortier de terre est fourni par le fabricant et est réalisé avec le même mélange de terre et de sable que les BTC, humidifié avec une quantité d'eau suffisante pour l'amener à un état visqueux. Pour ce mortier de terre, le fabricant déclare une densité apparente variant entre 1750 kg.m<sup>-3</sup> et 1950 kg.m<sup>-3</sup>, une conductivité thermique maximale de 0.8 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> et une capacité thermique massique comprise entre 800 et 900 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [11].

La paroi a été testée à l'intérieur d'un équipement Thermo3, une enceinte bi-climatique de la société 3R. Cet équipement est une boîte chaude gardée, composée de deux chambres distinctes, une chambre froide et une chambre chaude, qui sont isolées thermiquement des influences extérieures par une isolation en polystyrène (côté « froid ») et une zone de garde (côté « chaud »).

Lors d'un test, la différence de température entre les deux chambres crée un flux de chaleur unidirectionnel qui traverse la paroi à tester. Dans la chambre « chaude », la température est régulée par deux résistances chauffantes (200 W par zone) alimentées en basse tension (48 VDC), situées dans la zone de mesure et dans la zone de garde. La plage de température admissible de la chambre chaude est comprise entre 20°C et 50°C. La chambre froide est équipée d'un groupe frigorifique de 450 W, avec un échangeur froid relié à la zone froide et un échangeur chaud relié à l'extérieur. La chambre froide est programmable afin d'augmenter et de diminuer automatiquement sa consigne de température, permettant ainsi la génération de cycles de température. La plage de température admissible de la chambre froide est comprise entre -20°C et +30°C.

Le mur en BTC a été soumis à deux types d'essais, simulant des conditions hivernales [6]. Les murs sont testés en conditions dynamiques en utilisant l'option Thermo3 « Cycle journalier ». Cette option permet le réglage d'une température constante dans la chambre chaude et d'un cycle sinusoïdal (entièrement décrit par une valeur de température maximale et minimale et une période) sur la chambre froide.

Dans ce test, une température constante de 25°C est maintenue dans la chambre chaude, tandis que les températures de la chambre froide varient entre 5°C et 10°C sur une période de 24 heures. Afin de quantifier la masse thermique des assemblages de murs, les paramètres dynamiques de déphasage horaire  $TL$  et de facteur de décrement  $DF$  sont évalués.

En complément, le mur a été testé en conditions statiques afin d'évaluer sa résistance thermique pour une température ambiante chaude est de 25°C, et deux valeurs de température ambiante côté froid : 5°C et 10°C. L'évaluation de la résistance thermique s'effectue dans ce cas grâce à la formule suivante :

$$R = \frac{T_{s,chaude} - T_{s,froide}}{\varphi} \quad (4)$$

où  $T_{s,chaude}$  est la température de surface du côté chaud du mur,  $T_{s,froide}$  est la température de surface du côté froid du mur,  $\varphi$  est la densité de flux thermique mesurée en W.m<sup>-2</sup>. Cette formule peut être utilisée lorsque le régime permanent est atteint.

De plus, le déphasage horaire et le facteur d'amortissement ont été calculés à partir des données expérimentales, comme expliqué dans le paragraphe 2.2. Les positions et les types de capteurs utilisés sont reportés dans le tableau 1 et la figure 1.

<i>Types de Capteur</i>	<i>Position</i>
Fluxmètre Captec 22.9 $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Surface intérieure
Fluxmètre Captec 22.9 $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	Surface extérieure
3 capteurs Température - Humidité Relative type DKRF400	Surface intérieure
	0.075 m à l'intérieur de la paroi
	Surface extérieure

Tableau 1 : *Propriétés des capteurs utilisés*

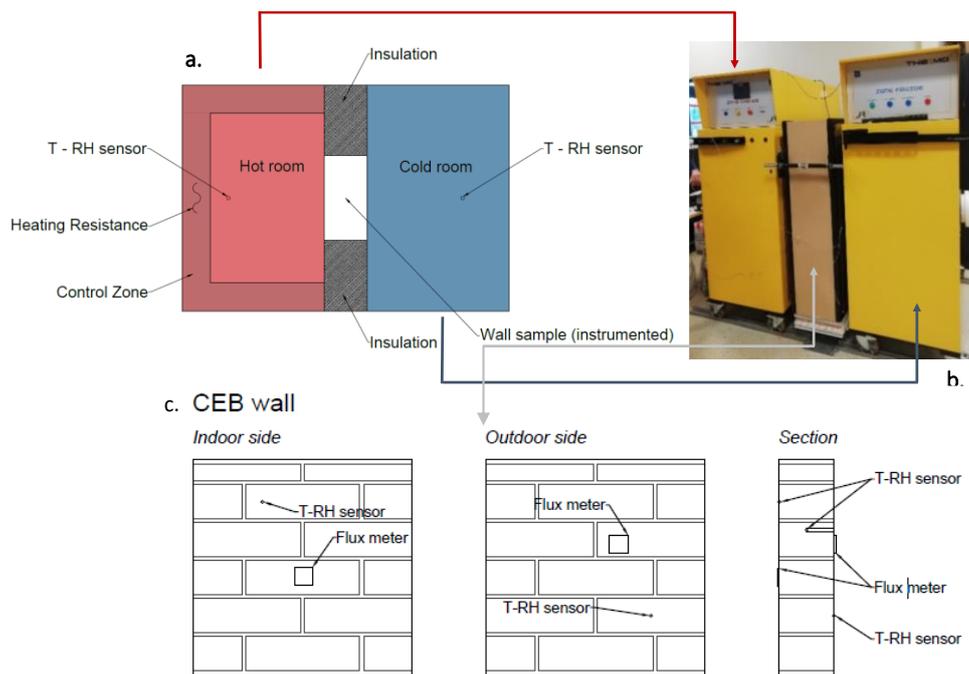


Figure 1 : *Schéma du montage expérimental : boîte chaude gardée avec ses parties chaude et froide (a, b), paroi instrumentée (c)*

<i>Propriétés</i>	<i>Unités</i>	<i>BTC</i>	<i>Valeurs de la littérature</i>
$\rho_s$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1800	1600 – 2760 [12]
$n$	%	24.5	30 [6]
$A_w$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1/2}$	0.14	
$\lambda_{25\%HR}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.91\pm 0.01$	
$\lambda_{40\%HR}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.93\pm 0.02$	
$\lambda_{60\%HR}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.94\pm 0.01$	0.62 – 1.48 [12, 16]
$\lambda_{80\%HR}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$0.96\pm 0.03$	
$c_p$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$816\pm 31$	808 – 1000 [13 - 15]
W80	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	39.71	
$\mu$ (coupelle sèche)	-	8.87	7 – 14 [17]
$\mu$ (coupelle humide)	-	4.92	3 – 7 [17]

Tableau 2 : *Propriétés des BTC*

### 3. Résultats

Les résultats de la caractérisation du matériau BTC sont présentés dans le tableau 2. Les valeurs de conductivités thermiques présentées sont une moyenne entre celles déterminées dans les deux directions de coupe du BTC (respectivement parallèles et perpendiculaires au côté long du BTC).

Les résultats de la simulation thermique sont présentés dans la figure 2. A partir des résultats de simulation, on obtient une valeur de  $TL$  égale à 4.33 heures et une valeur  $DF$  égale à 0.327. Les résultats du cycle dynamique expérimental réalisé dans la boîte chaude gardée sont présentés dans la figure 3. A partir des mesures, il est possible de calculer on obtient une valeur de  $TL$  égale à 3.78 heures et une valeur de  $DF$  égale à 0.369.

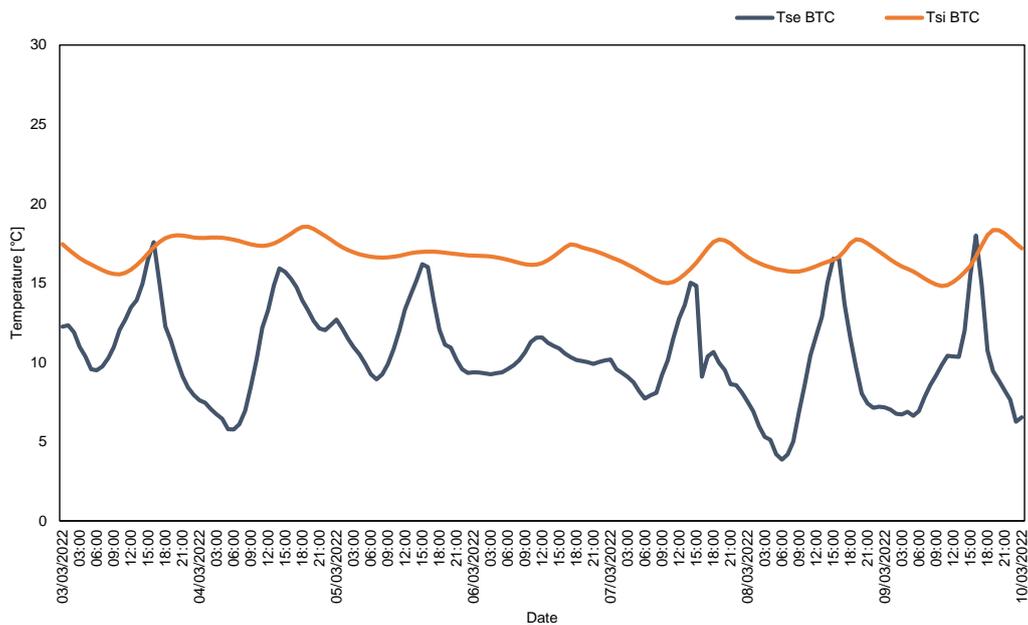


Figure 2 : Résultats des simulations pour la semaine d'hiver considérée

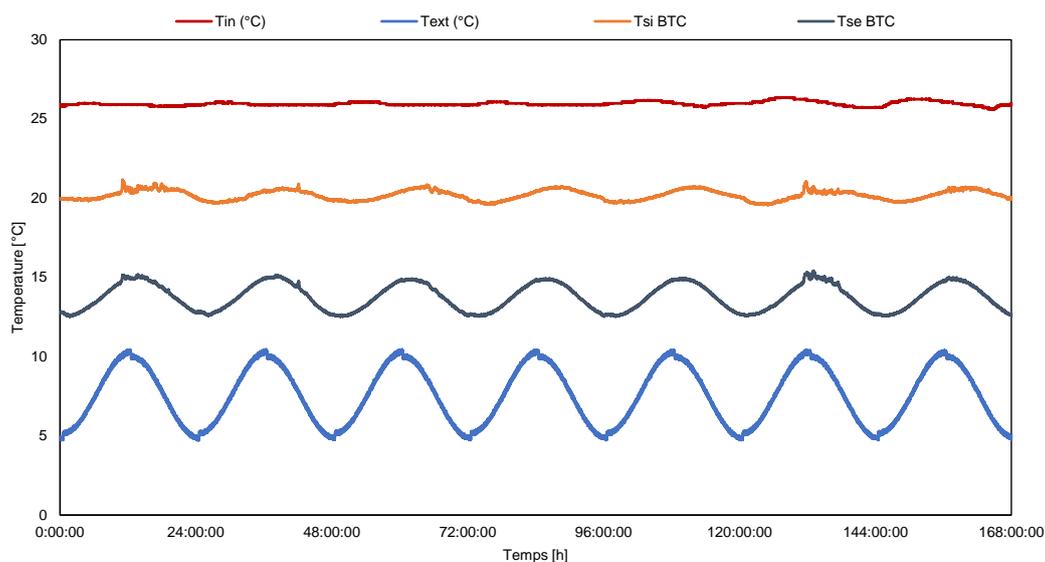


Figure 3 : Mesures dynamiques sur la paroi : variations sinusoïdales simulant une semaine d'hiver

Il est à noter que les simulations sur Delphin sont basées sur des fichiers climatiques réels de la ville de Paris. De ce fait, la sollicitation thermique diffère de la sollicitation thermique de

l'essai en boîte chaude gardée. De plus, la boîte chaude gardée utilisée ne permet pas le contrôle de l'humidité relative, mais uniquement sa mesure. Toutefois, les valeurs maximales des températures de surfaces extérieures sont identiques, ce qui nous permet de comparer, de façon qualitative, les résultats obtenus par la simulation et par la mesure en boîte chaude gardée. On observe ainsi que les valeurs simulées et calculées de  $TL$  diffèrent de 0.55 heure, et les valeurs de  $DF$  seulement de 0.042 (soit environ 12%). A noter que dans des études précédentes, pour des murs BTC de 10 cm [6], 14 cm [18] et 25 cm [19], des valeurs de  $TL$  comprises entre 1.43 h [6] et 5 h [18] ont été reportées, ainsi que des valeurs de  $DF$  égales à 0.40 [6], 0.11 [18] et 0.50 [19].

En ce qui concerne la valeur de résistance thermique  $R$  calculée sur la base des valeurs de conductivité thermique obtenues à partir de la simulation, dans la semaine de référence (03/03/2022-10/03/2022), une valeur de  $0.164 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  a été obtenue. D'après les mesures obtenues par la méthode de la boîte chaude gardée, lorsque la température extérieure est de  $5^\circ\text{C}$  la valeur de la résistance thermique est égale à  $0.154 \pm 0.013 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Lorsque la température extérieure est de  $10^\circ\text{C}$ , la résistance mesurée est de  $0.146 \pm 0.015 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Les valeurs obtenues par simulation sont différentes de celles obtenues expérimentalement, mais, en considérant une valeur de  $R$  moyenne de  $0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  pour les mesures expérimentales, la différence par rapport à la valeur obtenue par simulation ( $0.014 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ) peut être considérée comme acceptable, d'autant plus que l'effet des joints entre les BTC n'est pas pris en compte dans les simulations et que la présence de ces joints a tendance à diminuer la résistance globale de la paroi.

Afin de mieux raccorder les résultats des simulations aux mesures, il faudra, dans les travaux à venir, utiliser les mêmes contraintes thermiques et hygrométriques, tant dans la simulation que dans la mesure en boîte chaude gardée. Par ailleurs, il faudra également tenir compte de l'effet des joints de mortier séparant les BTC dans les simulations.

## 4. Conclusion

Ce travail a permis de présenter les résultats de la caractérisation thermique et hydrique de blocs de terre comprimée à l'échelle du matériau et de la paroi. La caractérisation du matériau a concerné la détermination de la masse volumique sèche, de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau, de la chaleur spécifique, des isothermes de sorption, du coefficient d'absorption d'eau et de la perméabilité à la vapeur d'eau.

Une fois cette caractérisation obtenue, ces propriétés ont été intégrées dans le logiciel de simulation thermo-hygrométrique Delphin, pour étudier le comportement d'un mur de BTC de 15 cm d'épaisseur, sous le climat de Paris (CfB). Parallèlement, des tests ont été réalisés sur un mur de 15 cm d'épaisseur de BTC dans une boîte chaude gardée, afin de déterminer expérimentalement la résistance thermique du mur en conditions hivernales (pour  $T_e = 5^\circ\text{C}$  et  $T_e = 10^\circ\text{C}$ ) et d'estimer ses propriétés inertielles.

Les résultats obtenus à partir de la simulation et des mesures sur parois ont ensuite été utilisés pour déterminer les paramètres dynamiques des parois : facteur d'amortissement  $DF$ , déphasage horaire  $TL$  et résistance thermique  $R$ . A partir des résultats de simulation on retrouve une valeur de  $TL$  égale à 4.33 heures et une valeur de  $DF$  égale à 0.327. La résistance thermique calculée à partir de la conductivité thermique obtenue par simulation est de  $0.164 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . A partir des mesures dans la boîte chaude gardée on obtient une valeur de  $TL$  égale à 3.78 heures et une valeur de  $DF$  égale à 0.369, alors que la valeur de  $R$  moyennée pour les deux conditions de températures extérieures est égale à  $0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Bien que présentant des valeurs légèrement différentes, du fait des conditions aux limites différentes pour les simulations et les mesures sur paroi, ces premiers résultats peuvent servir de base au développement de méthodes de calcul plus fines et à la calibration de simulations thermiques dynamiques à l'échelle du bâtiment.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'entreprise Cycle Terre (Sevran, Seine-Saint-Denis) pour l'intérêt porté à cette recherche.

## Références

- [1] G. Giuffrida, R. Caponetto, F. Nocera, Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review. *Sustainability* 11 (2019), 5342.
- [2] Guide de conception et de construction. Fabriquer la ville bas carbone avec Cycle Terre, 01 (2021).
- [3] NF EN ISO 15148:2003. Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of water absorption coefficient by partial immersion.
- [4] NF EN ISO 17892-3, Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 3 : détermination de la masse volumique des particules solides
- [5] A.W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, H. Kallel, Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls. *J. Build. Eng.* 28 (2020), 101017.
- [6] G. Giuffrida, V. Costanzo, F. Nocera, M. Cuomo, R. Caponetto. Natural and recycled stabilizers for rammed earth material optimization. In: Littlewood J, Howlett RJ editors. *Sustainability in Energy and Buildings 2022*, (2023) 1–11.
- [7] NF EN ISO 12751:2021, Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of hygroscopic sorption properties.
- [8] XP P 13 901:2022, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception
- [9] NF EN ISO 12572: 2016. Hygrothermal performance of building materials and product. Determination of water vapour transmission properties. Cup method.
- [10] G. Giuffrida, L. Ibos, A. Boudenne, H. Allam, Exploring the integration of bio-based thermal insulations in compressed earth blocks walls, *Constr. Build. Mater.* 418 (2024), 135412
- [11] Fiche technique Mortier de pose terre crue – Mortier MP : [https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/04/FT\\_MP\\_201108.pdf](https://www.cycle-terre.eu/wp-content/uploads/2021/04/FT_MP_201108.pdf)
- [12] C. Turco, A.C. Paula Junior, E.R. Teixeira, R. Mateus, Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review. *Constr. Build. Mater.* 309 (2021), 125140.
- [13] M. Lamrani, M. Mansour, N. Laaroussi, M. Khalfaoui, Thermal study of clay bricks reinforced by three ecological materials in south of morocco. *Energy Procedia*, 5th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2018) 156 (2019), 273–277.
- [14] J.E. Oti, J.M. Kinuthia, J. Bai, Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials & Design* 31 (2010), 104–112.
- [15] P. Poullain, N. Leklou, A. Laibi, M. Gomina, Properties of Compressed Earth Blocks Made of Traditional Materials from Benin. *RCMA* 29 (2019), 233–241.
- [16] M.B. Mansour, A. Jelidi, A.S. Cherif, S.B. Jabrallah, Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Constr. Build. Mater.* 104 (2016), 44–51.
- [17] H. Cagnon, J.E. Aubert, M. Coutand, C. Magniont, Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy Build.* 80 (2014) 208–217.
- [18] N.A.G. Mohamed, A. Moustafa, E.A. Darwish, Structural, acoustical, and thermal evaluation of an experimental house built with reinforced/hollow interlocking compressed stabilized earth brick-masonry. *J. Build. Eng.* 86 (2024), 108790.
- [19] C. Hema, A. Messan, A. Lawane, D. Soro, P. Nshimiyimana, G. Van Moeseke, Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation. *J. Build. Eng.* 38 (2021), 102148.