



**HAL**  
open science

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

Giada Giuffrida, Laurent Ibos, Abderrahim Boudenne, Hamza Allam

## ► To cite this version:

Giada Giuffrida, Laurent Ibos, Abderrahim Boudenne, Hamza Allam. Comportement thermique des murs en blocs de terre comprimée : comparaison entre simulations et mesures à l'échelle paroi. 32ème Congrès Français de Thermique, Jun 2024, Strasbourg, France. hal-04779842

**HAL Id: hal-04779842**

**<https://hal.science/hal-04779842v1>**

Submitted on 13 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 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>1\*</sup>, Abderrahim BOUDENNE<sup>1</sup>, Hamza ALLAM<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes,  
Université Paris Est-Creteil, Paris, France  
61, avenue du Général de Gaulle  
94010 Créteil Cedex

\*(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.

## 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 sur le 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 [3].

La masse volumique sèche  $\rho_s$  des BTC a été déterminée selon [4], après séchage au four des échantillons jusqu'à poids constant à 70 °C (environ 7% HR) en considérant un état d'équilibre lorsque  $m_{(t, t+24)} < 0.2$  %.

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 [5]). 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 [6, 7]), 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 ( $\rho c_p$ ).

L'isotherme de sorption a été évaluée conformément à [8] : 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 ( $m_{(t, t+24)} < 0.1$  %).

Le coefficient d'absorption d'eau  $A_w$  dû à l'action capillaire est déterminé par immersion partielle selon [3]. 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 comparés au  $\sqrt{t}$  pour calculer  $A_w$ .

La perméabilité à la vapeur d'eau est évaluée selon les méthodes des coupelles humide et sèche [9]. Le protocole expérimental utilisé consiste à sceller les échantillons sur une coupelle dont l'humidité relative est contrôlée par 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  $\mu$ .

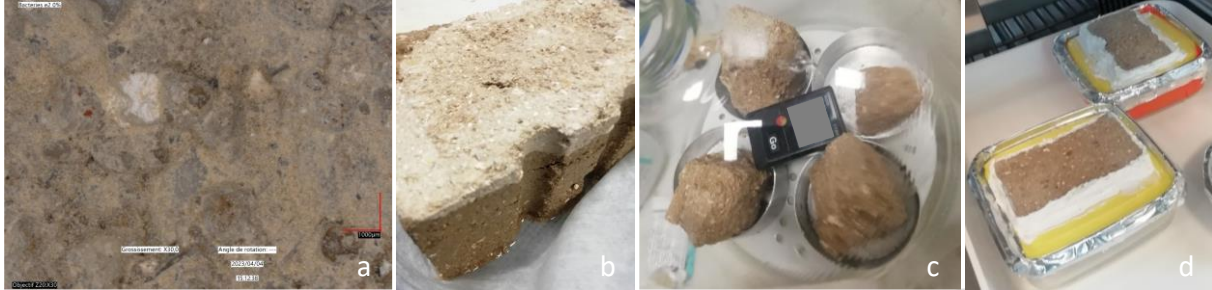


Figure 1 : Observation au microscope (a), essai d'absorption capillaire d'eau (b), de sorption (c) et de perméabilité à la vapeur d'eau (c)

## 2.2. Simulation

Dans cette étude, les propriétés des BTC sont utilisées pour exécuter plusieurs simulations numériques afin d'évaluer le comportement hygrothermique des murs de BTC non isolés. Les murs sont simulés comme si constitués des BTC seulement (sans 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 de simulation accorde une attention particulière à 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 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 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 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 chaude : zone de mesure et zone de garde. La plage de températures admissibles de la chambre chaude va de 20°C à 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 capable d'augmenter et de diminuer ses consignes de température, permettant ainsi le réglage de cycles de température. La plage de températures admissibles de la chambre froide va de -20°C à 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 décrément  $DF$  sont évalués. De plus, dans la même configuration climatique, le mur est testé en condition statique afin d'évaluer sa résistance thermique lorsque la température ambiante chaude est de 25°C, et les températures des chambres froides sont  $T = 5^\circ\text{C}$  et  $T = 10^\circ\text{C}$ . L'évaluation de la résistance thermique s'effectue 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  $\text{W/m}^2$ .

De plus, le déphasage horaire et le facteur d'amortissement ont été calculés, 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>Type de Capteur</i>	<i>Position</i>
Fluxmetre Captec 22.9 $\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Surface intérieure
Fluxmetre Captec 22.9 $\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Surface extérieure
3 T-HR capteur DKRF400	Surface intérieure
	0.075 m à l'intérieur de la paroi
	Surface extérieure

Tableau 1 : *Propriétés des capteurs utilisés*

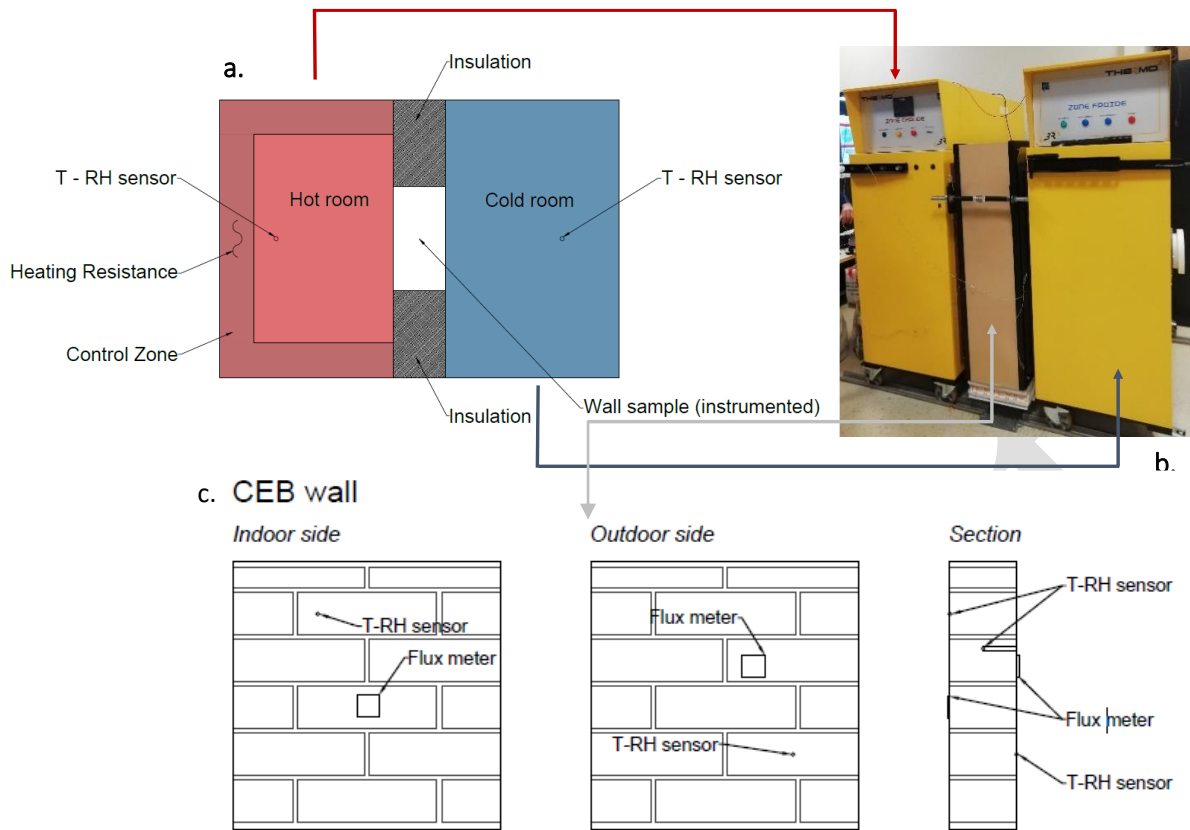


Figure 1 : Schéma du montage expérimental : boîte chaude gardée avec ses parties chaude et froide (a, b), paroi instrumentée (c)

### 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). De plus, la valeur  $W80$  est la teneur en eau massique à la condition d'humidité relative de 80%.

Propriété	Unité	BTC
$\rho_s$	$\text{kg.m}^{-3}$	1800
$n$	%	24.5
$A_w$	$\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$	0.14
$\lambda_{25\%HR}$	$\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$	$0.91 \pm 0.01$
$\lambda_{40\%HR}$	$\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$	$0.93 \pm 0.02$
$\lambda_{60\%HR}$	$\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$	$0.94 \pm 0.01$
$\lambda_{80\%HR}$	$\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$	$0.96 \pm 0.03$
$c_p$	$\text{J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$	$816 \pm 31$
$W80$	$\text{Kg.m}^{-3}$	39.71
$\mu$ (coupelle sèche)	-	8.87
$\mu$ (coupelle humide)	-	4.92

Tableau 2 : Propriétés des BTC

Les résultats de la simulation thermique sont présentés dans la figure 2. A partir des résultats de simulation, il est possible de calculer un  $TL$  de 4.33 heures et un  $DF$  de 0.327.

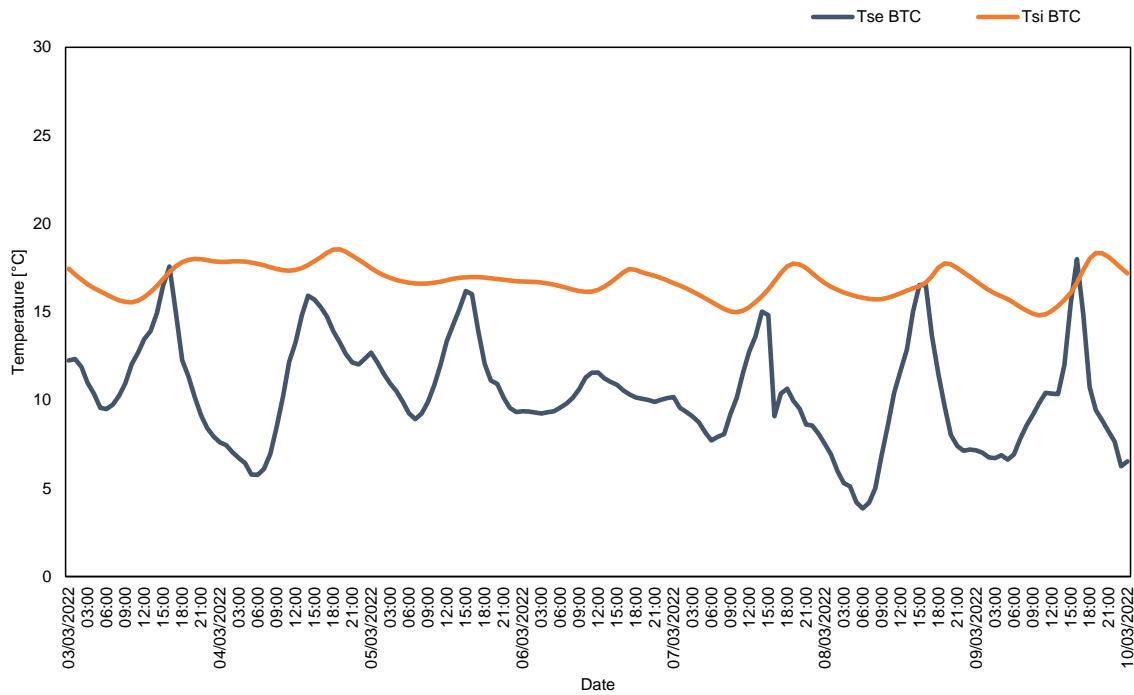


Figure 2 : Résultats des simulations pour la semaine d'hiver considérée

Les résultats du cycle dynamique réalisé dans la boîte chaude gardée sont présentés dans la figure 3. A partir des résultats de mesure, il est possible de calculer un  $TL$  de 3.78 heures et un  $DF$  de 0.369.

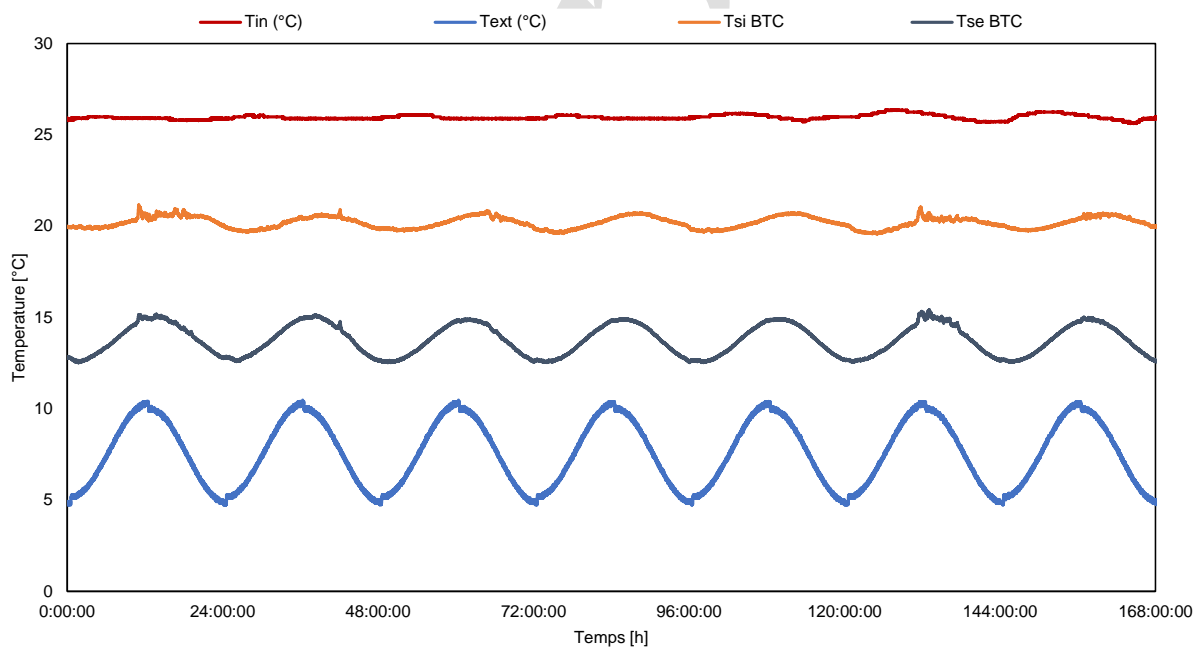


Figure 3 : Mesures dynamiques sur la paroi : variations sinusoidales simulant une semaine d'hiver

Il est à noter que les simulations sur Delphin sont basées sur des fichiers climatiques réels de la ville de Paris, du coup la sollicitation thermique est différente par rapport à 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. Cependant, les valeurs maximales des températures de surfaces extérieures sont les mêmes, 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 simulée et calculée de  $TL$  diffèrent de 0.55 heure, et les valeurs de  $DF$  seulement de 0.042 (soit environ 12%).

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  $0.164 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  a été obtenue.

D'après les mesures de la boîte chaude gardée, lorsque la température extérieure est de  $5^\circ\text{C}$  la valeur de la résistance thermique est égale à  $0.154 \pm 0.013 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ . Lorsque la température extérieure est de  $10^\circ\text{C}$ , la résistance mesurée est de  $0.146 \pm 0.015 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ . Les valeurs obtenues par simulation sont différentes de celles obtenues expérimentalement, mais, en considérant une valeur de  $R$  moyenne de  $0.15 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  pour les mesures expérimentales, la différence par rapport à la valeur obtenue par simulation ( $0.014 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ ) 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 peut avoir tendance à diminuer la résistance globale de la paroi.

Afin de mieux raccorder les résultats des simulations et des mesures, il faudra, dans les travaux futurs, 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 hygrique 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  $0.164 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ . 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  $0.15 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ .

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



## 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] XP P 13 901:2022, Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception
- [5] 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
- [6] A.W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, H. Kallel, Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls. *J. Build. Eng.* 28 (2020), 101017.
- [7] 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.
- [8] NF EN ISO 12751:2021, Hygrothermal performance of building materials and products: Determination of hygroscopic sorption properties.
- [9] NF EN ISO 12572: 2016. Hygrothermal performance of building materials and product. Determination of water vapour transmission properties. Cup method.
- [10] A. Urso, V. Costanzo, F. Nocera, G. Evola, Moisture-Related Risks in Wood-Based Retrofit Solutions in a Mediterranean Climate: Design Recommendations, *Sustainability*, 14 (2022), 14706.

## Remerciements

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