



HAL
open science

**Identification paramétrique des propriétés
thermophysiques d'un mur en brique ancienne :
Approches expérimentale et numérique**

Emilio Sassine, Yassine Cherif, Emmanuel Antczak

► **To cite this version:**

Emilio Sassine, Yassine Cherif, Emmanuel Antczak. Identification paramétrique des propriétés thermophysiques d'un mur en brique ancienne : Approches expérimentale et numérique. XIVème Colloque International Franco-Québécois en énergie, 2019, Quebec, Canada. hal-03209294

HAL Id: hal-03209294

<https://hal.science/hal-03209294>

Submitted on 14 Apr 2022

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.

Identification paramétrique des propriétés thermophysiques d'un mur en brique ancienne : Approche expérimentale et numérique

Emilio **SASSINE**^{1,2}, Yassine **CHERIF**¹, Emmanuel **ANTCZAK**¹

¹ Univ. Artois, IMT Lille Douai, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

² Université Libanaise, Département d'Architecture, Beyrouth, Liban

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'améliorer les connaissances sur la caractérisation thermophysique de l'enveloppe de bâtiment en particulier les murs en brique utilisés dans les constructions anciennes du Nord de l'Europe. Une double démarche à la fois expérimentale et numérique est réalisée pour identifier les propriétés thermophysiques du mur (à savoir la capacité thermique ρC_p et la résistance thermique R). L'optimisation de ces paramètres est basée sur l'algorithme de type Levenberg-Marquardt via l'outil de simulation Comsol multiphysics. La validation de l'algorithme a été réalisée ainsi que son utilisation dans différentes conditions d'ambiances (régime harmonique, et régime aléatoire quelconque).

Mots Clés: mur, brique, thermophysique, expérimentale, numérique, optimisation..

NOMENCLATURE

Symboles

C_p	chaleur spécifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C	capacité thermique surfacique [J.m ⁻² .K ⁻¹]
e	épaisseur [m]
F	flux de chaleur [W.m ⁻²]
P	variable de transformée de la place
R	résistance thermique équivalente [m ² .K.W ⁻¹]
T	température [K]

Lettres grecques

λ	conductivité thermique, [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	densité, [kg.m ⁻³]

Indices / Exposants :

i	surface intérieure
o	surface extérieure
w	mur
exp	valeur mesurée expérimentalement,
num	valeur simulée numériquement

INTRODUCTION

Pour évaluer la performance thermique globale des bâtiments et fournir un outil de décision précieux pour la conception de bâtiments économes en énergie, certains attributs de construction doivent être pris en considération. Ces attributs comprennent le coefficient de transmission thermique U , l'absorptivité des surfaces extérieures, le coefficient d'ombrage (SC) des parois vitrées, le coefficient d'ombrage extérieur des dispositifs d'ombrage, le coefficient gain de chaleur solaire (SHGC)

des parois vitrées, l'orientation du bâtiment, et le ratio des fenêtres par rapport aux murs (WWR) [1].

De nombreuses formulations de transfert de chaleur utilisent l'état d'équilibre des modèles de réseau thermique qui ne nécessitent que les conductivités thermiques efficaces ou bien les valeurs associées de U et R de la paroi. Cette approche est toujours adoptée dans de nombreuses études de recherche en utilisant soit des dispositifs expérimentaux de laboratoire ou bien des mesures in situ. Le thermo-fluxmètre est utilisé dans des conditions de laboratoire en régime permanent pour déterminer la conductivité thermique des matériaux de construction [2]. La norme ISO 9869 nécessite un

capteur de flux de chaleur et deux thermocouples pour déterminer la résistance thermique des murs à l'aide de mesures in situ. Une certaine amélioration a été proposée par Rasooli et al. [3] qui a suggéré d'utiliser un capteur de flux de chaleur supplémentaire, opposée au premier pour réduire la durée des mesures et améliorer la précision des résultats. Cet article examine l'utilisation de la méthode inverse pour l'identification paramétrique des propriétés thermophysiques d'un mur expérimental de briques (à savoir la conductivité thermique équivalente λ et la capacité thermique équivalente ρC_p), en comparant et en minimisant la différence entre les résultats issus des essais expérimentaux et ceux qui résultent du modèle numérique. La paroi en brique a été particulièrement choisie car elle constitue l'une des particularités architecturales des maisons anciennes (avant 1948) du Nord de l'Europe. D'un point de vue littérature, de nombreux travaux ont étudié la performance thermique [4-6] et l'isolation potentielle de ces parois [7]. Walker et al. [8] ont étudié le comportement thermique et les transferts d'humidité dans le cas de l'isolation thermique appliquée à l'intérieur sur des murs en briques historiques en utilisant des sondes de température et d'humidité. Plusieurs études ont également évalué les performances thermiques des briques de construction. Les résultats montrent que les propriétés thermiques des briques présentent des variations importantes au sein d'une même zone géographique. Cela peut être clairement observé dans les travaux de Touré et al. [9] qui ont étudié les briques de terre stabilisée sous pression (CSEB) produites par huit briqueteries au Sénégal et ont constaté que la conductivité thermique varie entre 0.66 et 0.85 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et que la capacité thermique varie entre 939 et 1170 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Certaines études ont étudié l'effet de modifier la composition de la brique sur ses performances thermiques telles que le travail de Kazmi et al. [10] qui a évalué les briques écologiques incorporant des boues de déchets de verre et Raefat et al. [11] qui a démontré l'intérêt de substituer les briques de terre cuites par des briques de liège granulaire.

Démarche expérimentale

Le mur expérimental étudié est un mur de briques massives semblables aux murs des vieilles maisons du Nord de la France ; il a une épaisseur totale de 34 cm. Les blocs de briques de pleines de dimensions (6 cm x 11 cm x 22 cm) sont reliés par des joints de mortier [4-7].

La paroi est soumise à une ambiance contrôlée de 1m³ environ, sur une face, régulée par un radiateur alimenté par un fluide à température contrôlée variant dans une plage allant de 5 °C à 60 °C.

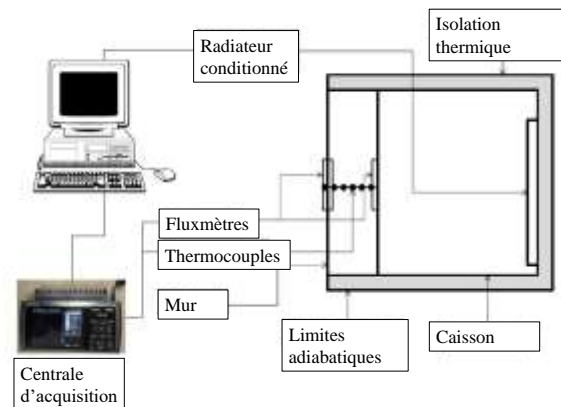


Figure 1 : montage expérimental.

La figure 1 illustre le dispositif expérimental (mur et caisson thermique), ainsi qu'une vue en coupe transversale schématique du dispositif et de ses composants principaux.

Deux thermocouples (type T) fournissent les températures de surfaces intérieure et extérieure de la paroi et deux fluxmètres mesurent le flux traversant la paroi au niveau de sa surface intérieure et extérieure. Tous les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition de données.

Hypothèses : paroi homogène, transfert de chaleur unidirectionnel

Le mur en maçonnerie constitué de blocs de briques et les joints de mortier sont supposés former une paroi homogène ayant une conductivité thermique équivalente λ et une capacité calorifique équivalente ρC_p [9].

Les surfaces latérales de la paroi ont été isolées par 20 cm de laine de roche, ce qui permet de supposer un transfert de chaleur unidirectionnel. Le caisson thermique a également été isolé pour réduire les pertes de chaleur.

Le problème se réduit donc à un transfert de chaleur unidirectionnel à travers une paroi homogène équivalente ayant des propriétés thermiques équivalentes λ et ρC_p .

Conditions aux limites des profils de température

Deux types de conditions aux limites ont été étudiés : le cas harmonique et le cas du profil de température aléatoire.

Le profil de température du fluide frigorigène circulant à travers le radiateur est prédéfini par un ensemble de valeurs générées par le programme LabVIEW. Ceci génère dans la zone de chauffage une température T_i , sur la face interne de la paroi une température T_{wi} , et sur la face extérieure de la paroi, une température T_{wo} . Ces valeurs ont été utilisées comme conditions aux limites dans le modèle numérique.

F_i et F_o sont respectivement les flux de chaleur intérieur et extérieur au niveau des parois intérieure et extérieure.

Dans l'étude expérimentale (Fig. 2), l'intérieur du caisson thermique représente l'environnement extérieur, qui varie de façon aléatoire, et l'ambiance du laboratoire (en dehors du caisson) représente l'ambiance intérieure où la température varie légèrement environ autour de 22°C comme représenté sur les figures 3 et 4.

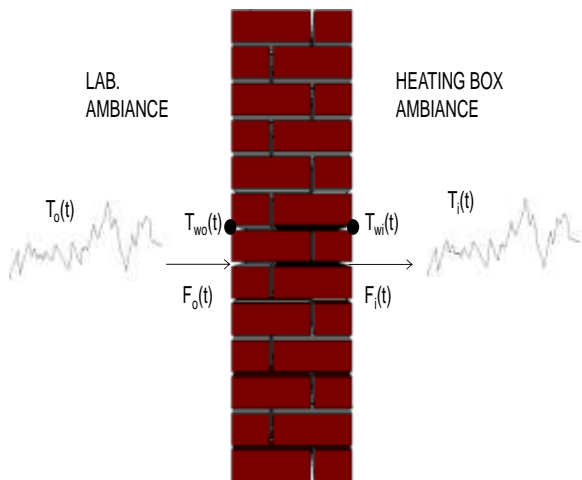


Figure 1- Conditions aux limites du mur

Le dispositif de chauffage impose dans le caisson une température $T_i(t)$ qui sollicite la surface intérieure de la paroi pour atteindre une température $T_{wi}(t)$ par un transfert de chaleur convectif, cette chaleur traverse la paroi par conduction et, en complément des sollicitations ambiantes, la surface externe de la paroi est à une température $T_{wo}(t)$. La température de l'air ambiant dans le laboratoire a une valeur $T_o(t)$. Les quatre profils de températures $T_i(t)$, $T_{wi}(t)$, $T_{wo}(t)$ et $T_o(t)$ sont représentés sur les figures 3-4 pour les deux cas étudiés.

Dans le cas sinusoïdal (signal 1), le profil de température du fluide caloporteur a une forme sinusoïdale de période 24 heures, une température moyenne de 40 °C et une amplitude de 20 °C, les données de température et de flux de chaleur ont été enregistrées à un intervalle de temps régulier de 10 minutes grâce à une centrale d'acquisition de données (Fig. 3).

Pour le profil de température aléatoire, deux profils de température différents ont été générés et les données de température et de flux de chaleur ont été enregistrées à des intervalles de temps réguliers (10 mn pour le signal 2) comme représenté sur la Fig. 4.

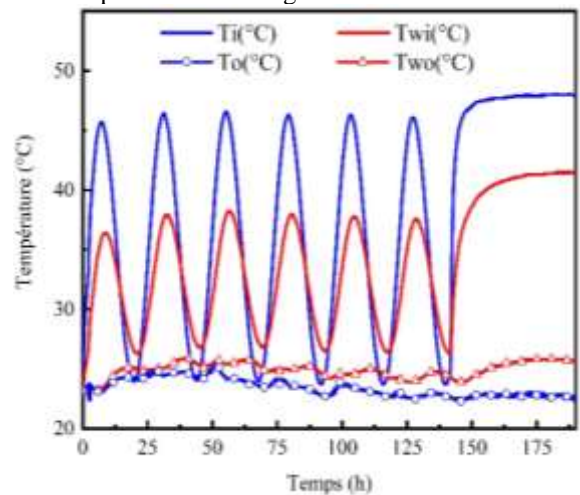


Figure 2- Conditions aux limites de température pour le signal harmonique 1

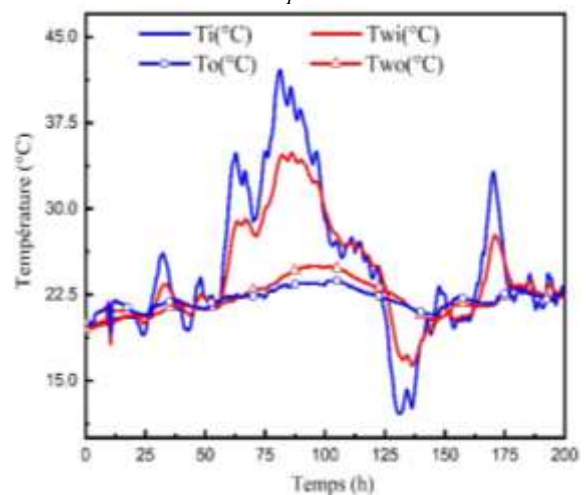


Figure 3- Conditions aux limites de température pour le signal aléatoire 2

FORMULATION PHYSIQUE DU PROBLÈME

Selon la norme EN ISO 13786, l'équation de transmission en termes de la variable de Laplace p , et reliant les températures et les flux de chaleur sur les deux

côtés d'une paroi homogène peut être exprimée sous forme des fonctions hyperboliques comme suit:

$$\begin{bmatrix} T_{wo} \\ F_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\sqrt{pRC}) & \sqrt{\frac{R}{pC}}sh(\sqrt{pRC}) \\ \sqrt{\frac{pC}{R}}sh(\sqrt{pRC}) & ch(\sqrt{pRC}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{wi} \\ F_i \end{bmatrix}$$

Où, R est la résistance thermique de la couche considérée et C sa capacité thermique surfacique.

En prenant en considération les coefficients d'échanges convectifs h_i sur la face intérieure de la paroi et h_o sur la face extérieure de la paroi, la matrice de transfert globale reliant $[T_o, F_o]$ à $[T_i, F_i]$ devient:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/h_o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} ch(\sqrt{pRC}) & \sqrt{\frac{R}{pC}}sh(\sqrt{pRC}) \\ \sqrt{\frac{pC}{R}}sh(\sqrt{pRC}) & ch(\sqrt{pRC}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1/h_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dans les problèmes de transfert de chaleur directs, les paramètres R et C sont connus et les deux conditions aux limites (températures et/ou flux de chaleur) sont les inconnues à déterminer.

Description de la méthode d'optimisation (méthode inverse)

Trois paramètres physiques ont été optimisés dans deux calculs d'optimisation différents en utilisant l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LMA). Dans un premier temps, les propriétés thermiques paroi (λ et ρC_p) ont été optimisées, et ensuite le coefficient d'échange de chaleur par convection interne h_i a été optimisé séparément.

L'algorithme LMA est normalement utilisé pour résoudre des problèmes de moindres carrés non-linéaires. Il a été choisi pour son temps de simulation rapide et sa fiabilité.

a- Méthodologie pour λ et ρC_p

Trois paramètres ont été ciblés en utilisant la méthode inverse. Dans un premier temps, les propriétés thermiques spécifiques à la paroi expérimentée ont été déterminés en utilisant comme conditions aux limites les températures des surfaces intérieure (T_{wi}) et extérieure (T_{wo}) de la paroi et en minimisant la différence entre le flux de chaleur mesuré sur la face interne de la paroi F_{i_exp} et le flux de chaleur obtenu numériquement sur la même face F_{i_num} pour la fonction objectif F_i . Dans ce cas, deux variables de contrôle ont été optimisés simultanément grâce à un algorithme inverse d'optimisation utilisé dans le logiciel COMSOL Multiphysics, la conductivité thermique λ et la capacité calorifique ρC_p .

Les paramètres inconnus λ et ρC_p sont liés à la résistance thermique équivalente R et la capacité

thermique surfacique équivalente C par les équations suivantes:

$$R = \frac{e}{\lambda} ; C = \rho.C_p.e$$

où e est l'épaisseur totale de la paroi.

b- Méthodologie pour h_i

Par la suite, la détermination du coefficient d'échange de chaleur convectif interne h_i est effectuée en utilisant les propriétés de la paroi déjà déterminées dans la première phase, et en utilisant comme conditions aux limites de la température ambiante du caisson T_i et la température de la face interne de la paroi (T_{wi}). Le flux de chaleur convectif est donc donné par:

$$F_i = h_i(T_i - T_{wi})$$

La valeur optimale de h_i est donc la valeur qui minimise la différence entre le flux de chaleur mesuré sur la face interne de la paroi et le flux de chaleur obtenu numériquement sur cette même face.

RÉSULTATS

Caractérisation thermique des parois et détermination du coefficient d'échange convectif

Les résultats sont obtenus par méthode inverse, en fonction des différents régimes étudiés. Trois profils de flux de chaleur ont été comparés dans les figures. 6-8;

- le flux de chaleur expérimental qui a été mesuré par le fluxmètre thermique interne : F_{i_exp} ,
- le flux de chaleur interne numérique pour déterminer les propriétés thermiques optimisées de la paroi (λ et ρC_p) : $F_{i_num}(\lambda, \rho C_p)$,
- le flux de chaleur interne numérique pour déterminer le coefficient d'échange de chaleur interne optimisé h_i : $F_{i_num}(h_i)$.

Cela signifie que $F_{i_num}(\lambda, \rho C_p)$ et $F_{i_num}(h_i)$ proviennent de deux simulations différentes, où la première simulation est effectuée pour déterminer les propriétés thermiques optimales de la paroi (λ et ρC_p), et la deuxième pour déterminer le coefficient d'échange convectif h_i , à l'intérieur du caisson thermique de chauffage.

Les résultats (Fig. 5-6) montrent que les graphiques numériques et expérimentaux de la fonction objectif F_i correspondent parfaitement dans les deux cas étudiés (le cas sinusoïdal, et les cas aléatoire) et pour les deux cas d'optimisation ($F_{i_num}(\lambda, \rho C_p)$ et $F_{i_num}(h_i)$).

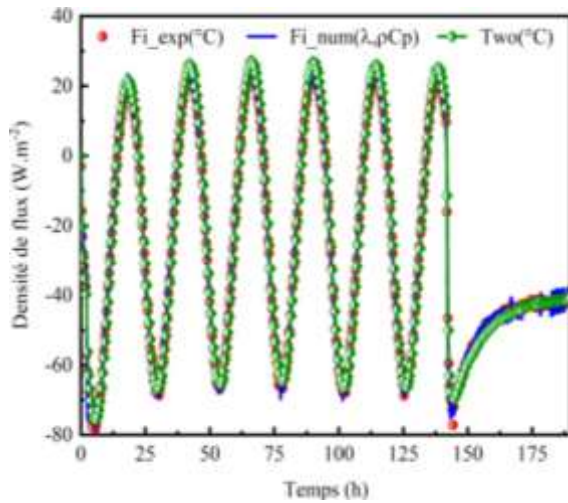


Figure 5- Flux de chaleur internes numérique et expérimental dans le cas du signal 1 pour les propriétés thermiques optimisées λ et ρC_p du mur et pour le coefficient d'échange de chaleur interne optimisé h_i

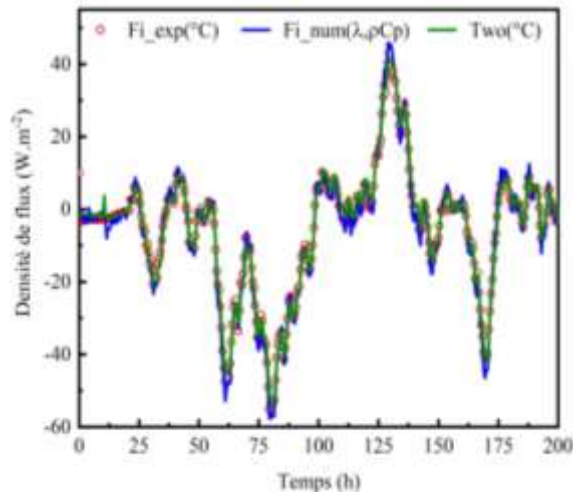


Figure 6- Flux de chaleur internes numérique et expérimental dans le cas du signal 2 pour les propriétés thermiques optimisées λ et ρC_p du mur et pour le coefficient d'échange de chaleur interne optimisé h_i

La méthode inverse pour la détermination des propriétés thermiques de (λ et ρC_p) présente des résultats satisfaisants dans les conditions aux limites harmoniques et aléatoires, les valeurs obtenues sont très similaires, comme indiqué dans le tableau 1. De même, le coefficient d'échange convectif interne h_i a bien été déterminé pour les deux tests avec des valeurs proches (6.13 et 6.03 $W/m^2.K$) rapportées dans le Tableau 1.

Tableau 1- Propriétés thermiques par la méthode inverse pour les trois essais étudiés

	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	ρC_p ($kJ.m^{-3}.K^{-1}$)	h_i ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
Signal 1	0.877	1012.4	6.13
Signal 2	0.935	1057.1	6.03

Solution du problème direct

Pour une meilleure validation du modèle numérique de transfert de chaleur et des paramètres thermiques optimisés par la méthode inverse, le flux de chaleur externe numérique F_{o_num} a été comparé au flux de chaleur externe mesuré expérimentalement F_{o_exp} pour les deux études de cas. Les graphiques montrent une très bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux (fig. 7, et 8).

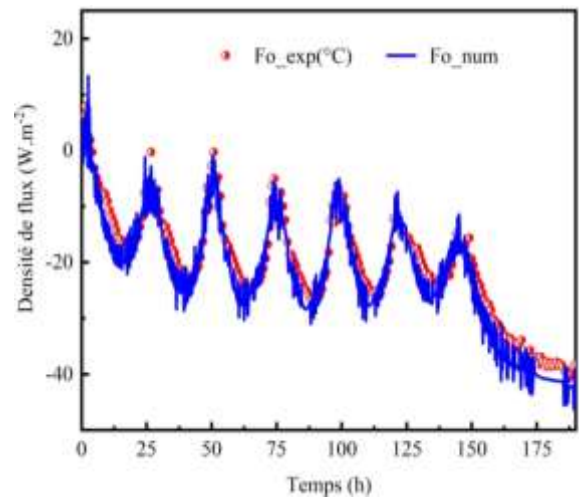


Figure 7- Flux de chaleur externe numérique et expérimental du signal 1 pour les propriétés thermiques optimisées λ et ρC_p

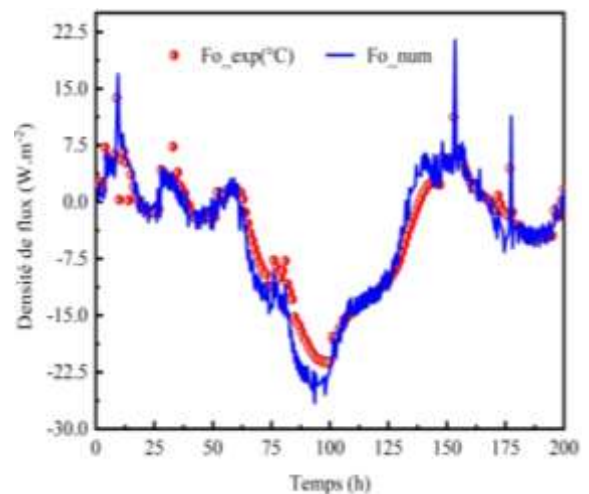


Figure 8- Flux de chaleur externe numérique et expérimental du signal 2 pour les propriétés thermiques optimisées λ et ρC_p

CONCLUSION ET REMARQUES

Une méthode de détermination des propriétés thermophysiques des éléments de construction à partir des mesures de température et de flux de chaleur en laboratoire en utilisant la méthode inverse a été développée pour deux types de conditions aux limites différentes : le cas harmonique et le cas du profil de température aléatoire.

Une identification paramétrique des propriétés thermophysiques d'un mur expérimental en brique (à savoir la conductivité thermique équivalente λ et la capacité thermique équivalente ρC_p) a été réalisée en comparant et en minimisant la différence entre les résultats issus des essais expérimentaux et ceux résultants du modèle numérique. L'étude réalisée a montré des résultats satisfaisants pour les deux paramètres λ et ρC_p . Le coefficient d'échange convectif interne h_i a également été déterminé avec succès pour les deux essais avec des valeurs proches (6,13 ; 6,03 W / m².K).

Les résultats de λ et ρC_p ont également été validés en comparant les flux de chaleur externes mesurés et numériques pour les propriétés thermiques optimisées.

On peut ainsi conclure que la méthode inverse peut apporter des résultats satisfaisants dans la détermination des paramètres thermiques statiques (λ), mais aussi dynamiques (ρC_p) pour des conditions aux limites aléatoires. Par la suite, on peut envisager d'utiliser cette approche sur des murs existants à partir d'un dispositif expérimental assez simple composé de deux thermocouples et d'un fluxmètre.

RÉFÉRENCES

- [1] Worawan Natephra, Nobuyoshi Yabuki, Tomohiro Fukuda, Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation, *Building and Environment* 136 (2018) 128-145
- [2] Roberto Bruno, Piero Bevilacqua, Giorgio Cuconati, Natale Arcuri, An innovative compact facility for the measurement of the thermal properties of building materials: first experimental results, *Applied Thermal Engineering* 143 (2018) 947-954
- [3] Arash Rasooli, Laure Itard, In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method, *Energy & Buildings* 179 (2018) 374-383
- [4] E. Sassine, Z. Younsi, Y. Cherif, A. Chauchois, E. Antczak, Experimental determination of thermal properties of brick wall for existing construction in the north of France, *Journal of Building Engineering* 14 (2017) 15-23
- [5] Emilio Sassine, A practical method for in-situ thermal characterization of walls, *Case Studies in Thermal Engineering* 8 (2016) 84-93
- [6] Emilio Sassine, Zohir Younsi, Yassine Cherif, Emmanuel Antczak, Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the Conduction Transfer function method, *Case Studies in Construction Materials* 7 (2017) 56-65
- [7] Emilio Sassine, Zohir Younsi, Yassine Cherif, Emmanuel Antczak, Frequency domain regression method to predict thermal behavior of brick wall of existing buildings, *Applied Thermal Engineering* 114 (2017) 24-35
- [8] R.Walker, S.Pavía, Thermal and moisture monitoring of an internally insulated historic brick wall, *Building and Environment* 133 (2018) 178-186
- [9] Pape Moussa Touré, Vincent Sambou, Mactar Faye, Ababacar Thiam, Mamadou Adj, Dorothé Azilinson, Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB), *Journal of Building Engineering* 13 (2017) 266-271
- [10] Syed Minhaj Saleem Kazmi, Muhammad Junaid Munir, Yu-Fei Wu, Asad Hanif, Indubhushan Patnaikuni, Thermal performance evaluation of eco-friendly bricks incorporating waste glass sludge, *Journal of Cleaner Production* 172 (2018) 1867-1880
- [11] S. Raefat, M. Garoum, M. Souihel, N. Laaroussi, Thermal transmittance comparison between multilayer walls made from hollow fired clay and plaster-granular cork bricks using electrical analogy, *Energy Procedia* 139 (2017) 596-601.