Vers une meilleure compréhension des transferts de chaleur dans un mur de maçonnerie modélisé en 3D

Joelle AL FAKHOURY[1,2*], Emilio SASSINE[1], Yassine CHERIF[2], Joseph DGHEIM[1], Emmanuel ANTCZAK[2], Thierry CHARTIER[2]

[1]Lebanese University, Habitat and Energy Unit, Group of Mechanical, Thermal and Renewable Energies - Laboratory of Applied Physics (LPA-GMTER), Faculty of Sciences, Fanar Campus, Lebanon
[2]Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France
***joelle_alfakhoury@ens.univ-artois.fr**

RESUME. La maçonnerie en blocs de béton creux est une technologie de construction largement utilisée dans de nombreux pays. Au Liban, ces blocs sont fabriqués artisanalement et ont des propriétés thermiques mal connues. Leurs performances thermophysiques globales sont peu étudiées alors que les configurations à simple et à double paroi non isolées sont très répandues dans ce pays, soumis à un climat contraignant, tant en hiver qu'en été. L'objectif de ce travail est de coupler les mesures expérimentales et les simulations numériques pour étudier les transferts de chaleur dans un mur en maçonnerie classique, composé de blocs normalisés. Les éléments constitutifs du mur ont été caractérisés séparément (conductivité thermique équivalente et chaleur massique équivalente), et une paroi représentative (1m²) a été étudiée en imposant différentes conditions aux limites sur une face à l'aide d'un caisson régulé thermiquement. La configuration a été modélisée, les résultats numériques et expérimentaux ont été comparés, l'objectif, à terme, est de valider le modèle pour simuler des parois composées de blocs de géométries différentes, spécifiques des régions dans lesquelles ils sont produits.

MOTS-CLÉS : Maçonnerie, flux thermique, modèle 3D

ABSTRACT. Hollow concrete block masonry is a widely used construction technology in many countries. In Lebanon, these blocks are handcrafted and have poorly known thermal properties. Their global thermophysical performance is poorly studied while single and double wall uninsulated configurations are widespread in this country, submitted to a constraining climate, both in winter and in summer. The objective of this work is to couple experimental measurements and numerical simulations to study heat transfer in a classical masonry wall, composed of normalized blocks. The wall components were characterized separately (thermal conductivity and specific heat), and a representative wall (1m²) was studied by imposing different boundary conditions on one face using a thermally controlled box. The configuration was modelled, numerical and experimental results were compared, the objective, in the long term, is to validate the model to simulate walls composed of blocks of different geometries, specific to the regions in which they are produced.

KEYWORDS: Masonry, heat flux, 3D model

1. INTRODUCTION

Les bâtiments occupent une place très importante dans la répartition de l'énergie produite par rapport à d'autres secteurs tels l'industrie et les transports, en raison du besoin continu d'environnements intérieurs confortables, ce qui participe grandement à l'augmentation de la consommation d'énergie dans les bâtiments. Celle-ci est également liée à la croissance démographique et à l'amélioration du niveau de vie des habitants, ce qui impacte d'autant plus le système de production énergétique. Avec le dérèglement climatique, certaines régions du monde voient les amplitudes thermiques augmenter, et ce

quelle que soit la saison, ce qui ne limite pas les consommations au chauffage mais l'étend aux systèmes de refroidissement. De plus, la consommation d'énergie dans les bâtiments résulte également de la production d'eau chaude sanitaire, dont l'augmentation est liée aux changements d'habitudes des utilisateurs davantage intéressés par le confort d'utilisation que par la problématique environnementale. Par exemple, aux Etats-Unis, la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation a représenté près de 70 % de la consommation totale d'énergie (« D&R International, Ltd », s. d.). On constate donc que la qualité de l'enveloppe du bâtiment est le principal facteur de pertes d'énergie dans les bâtiments, d'où l'importance de l'améliorer pour atteindre de meilleurs niveaux de confort thermique et réduire la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement. Les murs en maçonnerie de blocs de béton creux intéressants à étudier, car ils constituent une technologie de construction couramment utilisée pour les murs extérieurs dans de nombreux pays. Leurs performances thermiques équivalentes (blocs + mortier d'assemblage) sont également peu connues car les géométries des alvéoles sont très variables et les bétons de constitution liés aux productions locales de matériaux de base. L'étude des transferts thermiques dans les murs constitués de ces éléments est importante pour préconiser des améliorations appropriées tout en limitant leur coût de production et de mise en œuvre.

L'étude des transferts de chaleur dans les blocs creux en béton a déjà été menée (Al Fakhoury et al. 2021) (Sassine et al. 2020) qui ont étudié l'effet de la morphologie des cavités et de l'incorporation de granulats recyclés dans la formulation de béton sur la performance thermique globale des blocs. Ces études ont mis en évidence l'effet de la forme des cavités sur le transfert de chaleur dans les blocs creux et ont également montré que les blocs constitués d'agrégats isolants recyclés étaient plus performants thermiquement que les blocs ordinaires mais leurs caractéristiques mécaniques se dégradaient. Différentes méthodes expérimentales ont été développées sur les murs en maçonnerie pour estimer leurs performances thermiques. (Abdou et Murali 1994) ont étudié la contribution de cellules d'air contenues dans les parois en maçonnerie en utilisant des capteurs de flux de chaleur et ont montré qu'elles contribuaient de manière significative à la résistance thermique des murs. La modélisation numérique du transfert de chaleur est nécessaire pour caractériser et valider les paramètres thermiques. Parmi les options envisagées. (Al-Tamimi et al. 2020) ont développé un modèle par éléments finis pour déterminer la géométrie optimale de la cavité des blocs de maçonnerie en béton afin de réduire la demande de climatisation dans les bâtiments.

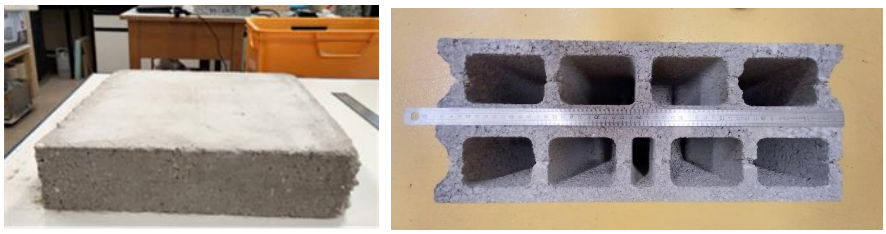
Dans notre étude, un mur en maçonnerie de 10 cm d'épaisseur constitué de blocs creux (49 cm ×19 cm ×10 cm) assemblés par un mortier est analysé selon deux approches différentes. Tout d'abord, les valeurs thermiques des éléments constitutifs du mur ont été mesurées séparément afin de connaître leurs propriétés thermiques équivalentes. Ensuite, un mur expérimental a été analysé en imposant des conditions limites en température de différents types sur une face par l'intermédiaire d'une enceinte régulée, l'autre face du mur étant exposée aux conditions thermiques ambiantes du laboratoire. Les différents scénarios de conditions aux limites en température sont de type sinusoïdal et stochastique. Enfin, un modèle numérique 3D reprenant le protocole expérimental a été généré en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics et a été comparé aux résultats obtenus expérimentalement. L'objectif est de valider ce modèle pour, à terme, s'affranchir du protocole expérimental, et simuler différentes géométries de blocs de maçonnerie.

2. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

2.1. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Un dispositif expérimental dédié est utilisé au laboratoire pour déterminer les propriétés thermiques des matériaux de construction par la méthode fluxmétrique, elles seront implémentées dans le modèle numérique 3D du mur. Cette méthode a été utilisée dans de nombreuses recherches sur différents matériaux notamment les matériaux isolants, les formulations de béton et les pierres calcaires (Sassine et al. 2021) (Pestre et al. 2022). Dans cette méthode, les échantillons sont placés horizontalement entre deux plaques échangeuses reliées à deux bains thermostatés permettant d'imposer des conditions limites en température contrôlées en entrée et en sortie de l'échantillon testé. Les températures et les flux de chaleur sont mesurés à l'aide de deux thermocouples de type T et de deux capteurs fluxmétriques plans de surface active de 0,15 x 0,15 m^2 placés sur les deux plus grandes faces de l'échantillon étudié et sont reliés à une centrale d'acquisition de données permettant de visualiser et d'enregistrer leur évolution. Les propriétés thermiques à déterminer sont la conductivité thermique équivalente (λ) et la chaleur massique équivalente (Cp). L'échantillon testé est enveloppé latéralement par un matériau isolant afin de réduire les pertes de chaleur latérales et d'assurer un transfert de chaleur unidirectionnel.

Les principaux composants entrant dans la production de blocs creux sont les granulats naturels, le ciment et l'eau. Dans notre cas, nous avons utilisé un bloc béton creux NF composé de 4 cavités rectangulaires (*Figure **1***b). Le mortier d'assemblage, classique, est composé de ciment, de sable et d'eau. Un échantillon de ce mortier de 27.7 cm de longueur, 26.7 cm de largeur et 6.5 cm d'épaisseur a été réalisé pour en mesurer ses caractéristiques thermiques (*Figure **1***a).



(a) *(b)*

Figure 1 : Echantillon de mortier (a) et bloc creux en béton (b)

La masse volumique du parpaing est ρ=1214 $kg.m^{-3}$, celle du joint de mortier est ρ=1834,5 $kg.m^{-3}$. Les caractéristiques thermiques des éléments sont obtenues en régime permanent, des conditions limites en température différentes ont été imposée sur chaque face du parpaing (T_1=25°C et T_2= 15°C), afin de déterminer la conductivité thermique équivalente (λ) en utilisant les relations suivantes ;

$$R = \frac{\Delta T}{\left(\frac{\sum \varphi}{2}\right)} \quad \text{et } \lambda = \frac{e}{R} \qquad (1)$$

Où R est la résistance thermique en $m^2.K.W^{-1}$, ΔT est la différence de la température entre les deux faces principales de l'échantillon, ∑φ est la somme des flux en $W.m^{-2}$, e est l'épaisseur de l'échantillon étudié en m, et λ est la conductivité thermique équivalente en $W.m^{-1}.K^{-1}$ déduite de la détermination de R.

A partir des conditions de régime permanent, la condition de température T_2 est imposée à 25°C sur chaque face afin de créer un déséquilibre thermique pendant lequel l'échantillon va stocker une quantité de chaleur Q, telle que ;

$$Q = \int_{t1}^{t2} \Delta\varphi \, dt \; et \; C = \frac{Q}{\Delta T} \text{ et } C_P = \frac{C}{\rho.S.e} \qquad (2)$$

Où Δφ est la différence des flux, Q est la quantité de chaleur stockée dans l'échantillon pendant la phase transitoire en J, C est la capacité thermique en $J.K^{-1}$, ρ est la masse volumique de l'échantillon en $kg.m^{-3}$, S est la surface de l'échantillon en m^2 et C_P est la chaleur massique équivalente en $J.Kg^{-1}.K^{-1}$.

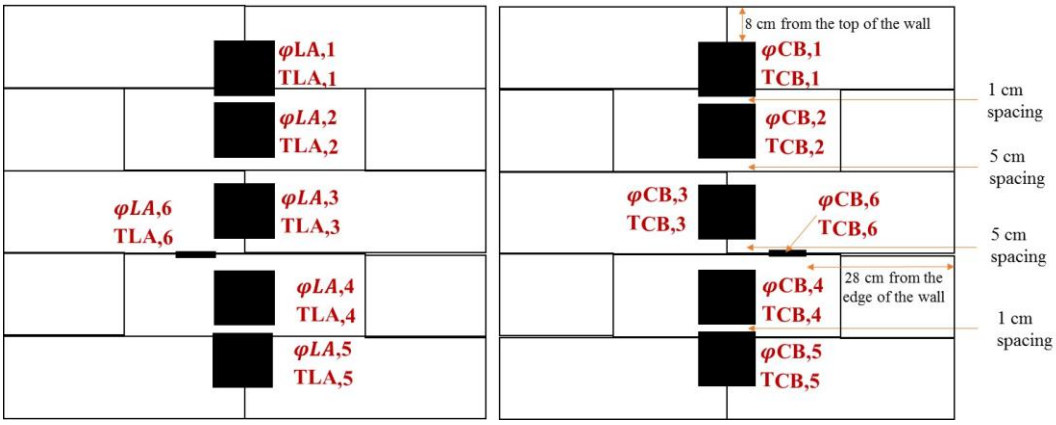
Le *Tableau **1*** résume les propriétés thermiques du bloc creux en béton et du joint de mortier.

Matériaux	ρ ($Kg.m^{-3}$)	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	C_P ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)
Joint du mortier	1834.5	0.88	927
Bloc creux	1214	0.75	842

Tableau 1 : Propriétés thermiques des matériaux constituant le mur

2.2. MONTAGE EXPERIMENTAL POUR L'ETUDE THERMIQUE DU MUR

Un mur expérimental de 10 cm d'épaisseur est construit à partir de blocs creux assemblés par un mortier (*Figure **2***), il est soumis à une condition limite en température sur une face, par l'intermédiaire d'une enceinte régulée placée contre cette face, où est placé un émetteur de chaleur dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température peut varier de 5°C à 60°C. Deux types de profils de températures ont été imposés au mur par l'intermédiaire de l'émetteur : le profil harmonique et le profil quelconque. Le pourtour du mur est composé d'une ceinture isolante pour favoriser un transfert de chaleur unidirectionnel perpendiculairement au mur, comme le montre la Figure 3. Un petit ventilateur a été placé dans l'enceinte afin d'éviter la stratification et d'obtenir une distribution relativement homogène de la température à l'intérieur du volume chauffé. Des capteurs de flux et des thermocouples ont été placés sur les deux faces du mur. Cinq capteurs de flux thermique plans de 15 cm x 15 cm ont été placés sur les blocs, sur chaque face, et deux capteurs de flux thermique de 1 cm x 10 cm ont été placés sur les joints de mortier, comme le montre la *Figure **2*** et la *Figure **3***. Ce type de capteur permet de mesurer simultanément le flux thermique et la température dans le même plan, à partir d'un thermocouple de type T (Cuivre-Constantan).



(a) *(b)*

Figure 2 : Emplacement des capteurs de flux du côté de l'ambiance du laboratoire (LA) (a) et du côté de l'ambiance contrôlée par l'enceinte régulée (CB) (b)

Un thermocouple a été utilisé pour mesurer la température ambiante dans le laboratoire (Text) et deux autres ont été placés à l'intérieur de l'enceinte, l'un mesurant sa température ambiante intérieure (Tamb,CB) et l'autre placé sur le radiateur mesurant sa température de surface (Trad,CB), comme le

montre la *Figure **3***. L'ensemble des capteurs a été connecté à un système d'acquisition de données pour un relevé régulier des grandeurs mesurées.

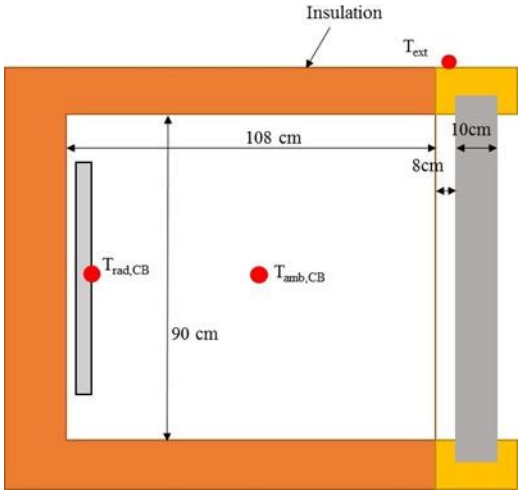


Figure 3 : Coupe horizontale de l'ensemble mur-enceinte régulée

3. MODELE NUMERIQUE

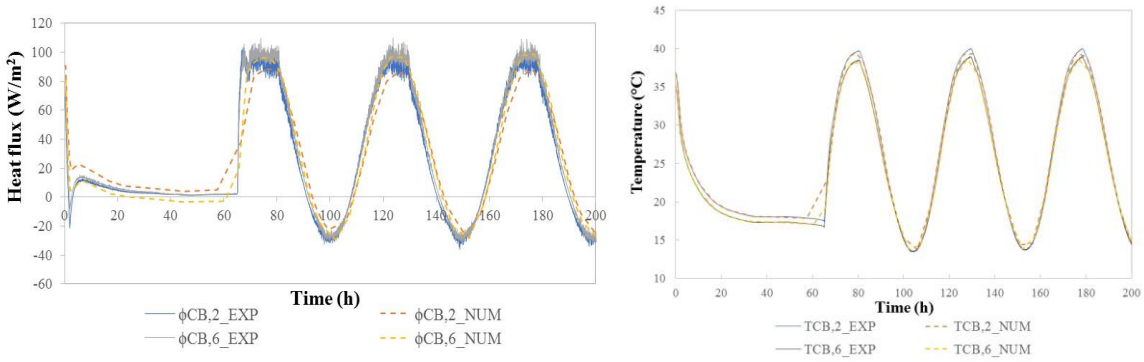
L'objectif de l'approche numérique est de vérifier l'adéquation entre les résultats expérimentaux et la modélisation dont les données d'entrées sont en partie issues de la caractérisation thermique des matériaux en laboratoire. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics®. Les propriétés thermiques équivalentes des matériaux constituant le mur déterminé expérimentalement ont été affectées aux composants du mur, c'est-à-dire le bloc béton et le mortier d'assemblage. Pour ces deux éléments, un milieu homogène équivalent a été introduit dans le modèle, qui est représentatif de l'échantillon caractérisé expérimentalement. Un maillage structuré a été établi pour le transfert thermique en régime transitoire. La taille, les dimensions et les conditions thermiques imposées au mur dans l'analyse numérique sont identiques aux conditions expérimentales. Le modèle est soumis à des conditions aux limites adiabatiques sur les parties latérales de la paroi et à des températures imposées (conditions de Dirichlet) sur les deux faces de la paroi (Xiong, Yu, et Yang 2015) (Huelsz, Barrios, et Rojas 2016) (Gao et al. 2004). Des capteurs numériques virtuels ont été placés de part et d'autre de la paroi de manière identique à ceux positionnés dans le dispositif expérimental. Le pas de temps de mesure est de deux minutes, il est identique à celui imposé expérimentalement, suffisant au regard de la lenteur des transferts thermiques et de la précision des calculs.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS NUMERIQUES ET EXPERIMENTAUX

Dans cette partie, les résultats expérimentaux sont comparés avec l'approche numérique développée. L'objectif de cette comparaison, dans un premier temps, est de valider le modèle de comportement par les résultats expérimentaux. A terme, le modèle doit permettre de simuler des modifications techniques qui potentiellement amélioreront les performances thermiques des murs en maçonnerie en utilisant d'autres configurations de géométries de blocs, et en complétant la paroi par des matériaux isolants recyclés (cas des parois doubles avec lame d'air).

4.1.1 Sollicitations en température de type harmonique



(a) *(b)*

Figure 4 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur la variation des flux de chaleur (a) et de la distribution des températures (b) côté enceinte

La Figure 4 présente les résultats expérimentaux et numériques des évolutions du flux thermique et de la température pour les capteurs 2 et 6 placés du côté de l'ambiance régulée, le capteur 2 étant situé à la surface du bloc béton et le capteur 6 sur le joint de mortier d'assemblage. L'évolution de la température d'ambiance du laboratoire est faiblement variable (cycles de chauffage atténués par une forte inertie de la pièce). Cette évolution a une forme sinusoïdale avec une faible amplitude sur la surface du mur, faisant face à l'ambiance du laboratoire, par rapport aux profils de température des capteurs du côté de l'enceinte régulée, ceci est dû à l'effet d'amortissement du mur (Figure 5). Une période de 60 heures a été nécessaire pour la mise en régime permanent du mur, puis les cycles de chauffage sinusoïdaux ont été imposés. On constate que la variation du flux thermique sur le mortier ($\varphi_{CB,\,6}$) est plus importante que celle du bloc ($\varphi_{CB,\,2}$), ce qui est logique puisque la conductivité thermique équivalente du mortier est plus importante que celle du bloc (Tableau 1).

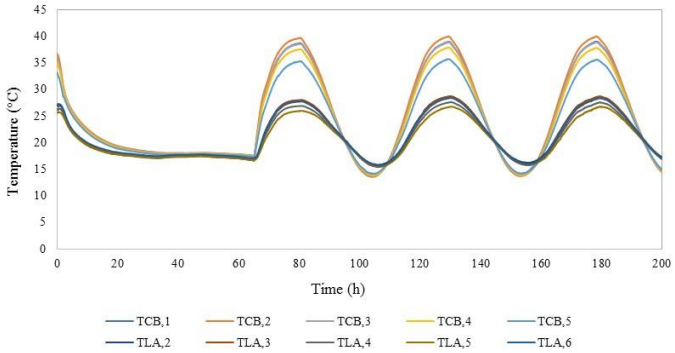
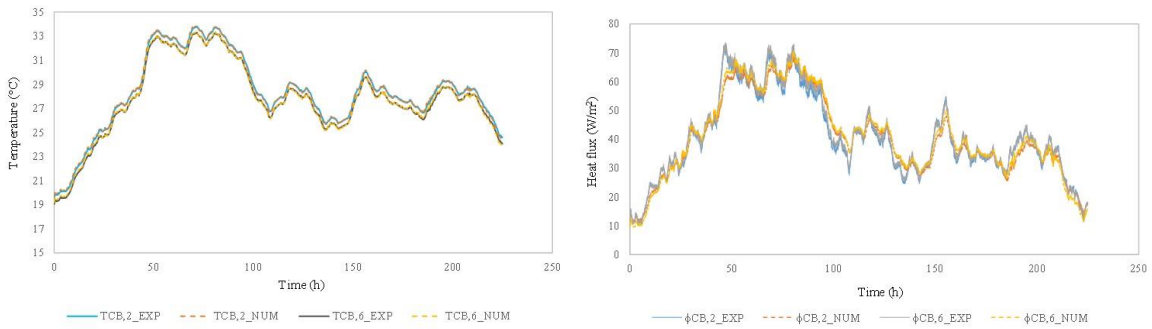


Figure 5 : Evolution de la température du mur face exposée à l'enceinte et face exposée aux conditions ambiantes du laboratoire

4.1.2. Sollicitations en température de type stochastique

L'intérêt du régime stochastique est qu'il représente un cas pseudo-aléatoire, où l'intérieur de l'enceinte régulée est assimilé à la température extérieure et l'environnement du laboratoire représente la température intérieure qui reste constante à environ 18°C.



(a) *(b)*

Figure 6 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur la variation des flux de chaleur (a) et de la distribution des températures (b) côté enceinte

La Figure 6 montre les résultats expérimentaux et numériques pour l'évolution du flux thermique et l'évolution de la température pour les capteurs 2 et 6. On constate, comme précédemment, une très bonne adéquation entre les donnée mesure et la simulation.

4.1.3 Évaluation de la précision des résultats

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée pour les mesures et les simulations de la variation de température et du flux thermique sur chaque face du mur. La RMSE calcule la distance moyenne entre les valeurs du modèle et les valeurs réelles de l'ensemble de données (Ćalasan, Abdel Aleem, et Zobaa 2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (3),$$

Où n est le nombre d'observations, y_i les observations expérimentales et $\hat{y}_i$ les valeurs numériques. Pour mieux estimer si une valeur de RMSE est "bonne", les RMSE ont été normalisées à l'aide de l'expression suivante (Zeller-Plumhoff et al. 2021) :

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \qquad (4)$$

On obtient ainsi une valeur comprise entre 0 et 1, les valeurs les plus proches de 0 représentant des modèles mieux adaptés.

Le *Tableau **2*** représente le calcul des NRMSE obtenus à partir des résultats numériques et expérimentaux des températures et de flux pour les différentes sollicitations thermiques imposées par l'enceinte.

Capteurs	NRMSE (harmonique)	NRMSE (quelconque)
$T_{CB,2}$	0.002074473	0.00702647
$T_{CB,6}$	0.007307356	0.00669811
$\varphi_{CB,2}$	0.087084731	0.05580965
$\varphi_{CB,6}$	0.029179937	0.04448151

Tableau 2 : Valeurs NRMSE pour la température et le flux de chaleur

On remarque que les NRMSE sont faibles et proches de 0 pour tous les points de température et de flux, cela indique une excellente adéquation modélisation/expérimentation.

5. CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension des transferts de chaleur dans les murs de maçonnerie en blocs creux. Une approche expérimentale spécifique pour la

détermination des caractéristiques thermiques de ce type de mur a été proposée. A l'échelle du bloc, la méthode de caractérisation permet d'obtenir les propriétés thermiques du bloc creux et du joint de mortier séparément, afin de les implémenter dans le modèle numérique. A l'échelle du mur, un dispositif expérimental composé d'une enceinte régulée est appliqué sur une face du mur, l'autre face étant exposée à la température ambiante du laboratoire. La méthode développée permet d'étudier les propriétés thermiques du mur soumis à un régime harmonique et à un régime quelconque, qui peuvent s'apparenter à des conditions climatiques extérieures. Les mesures sont basées sur l'utilisation de capteurs fluxmétriques permettant les relevés de flux de chaleur et de température dans le même plan, aux limites de la paroi, dans la direction du transfert. Un modèle numérique a été réalisé à l'aide de Comsol Multiphysics® pour comparer et valider les résultats expérimentaux et numériques. Les résultats obtenus montrent que l'approche expérimentale choisie est adaptée pour une configuration de paroi en maçonnerie. L'objectif est de s'appuyer sur ce travail pour étudier les murs doubles comportant une lame d'air et ensuite proposer des améliorations de l'efficacité énergétique de ce type de paroi, par la simulation, en modifiant la géométrie des alvéoles des blocs béton, et utilisant des matériaux isolants recyclés (mousses plastique d'emballage par exemple) pour en réduire les coûts de réalisation.

6. BIBLIOGRAPHIE

Abdou, Ossama A., et Kris S. Murali. 1994. « The Effect of Air Cells and Mortar Joints on the Thermal Resistance of Concrete Masonry Walls ». Energy and Buildings 21 (2): 111‑19. https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)90004-3.

Al Fakhoury, Joelle, Emilio Sassine, Yassine Cherif, Joseph Dgheim, et Emmanuel Antczak. 2021. « Experimental feasibility for the incorporation of solid waste aggregates in masonry hollow blocks ». European Journal of Environmental and Civil Engineering 0 (0): 1‑15. https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1982779.

Al-Tamimi, Ahmed S., Omar S. Baghabra Al-Amoudi, Mohammed A. Al-Osta, Mohammed R. Ali, et Aftab Ahmad. 2020. « Effect of Insulation Materials and Cavity Layout on Heat Transfer of Concrete Masonry Hollow Blocks ». Construction and Building Materials 254 (septembre): 119300. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119300.

Ćalasan, Martin, Shady H. E. Abdel Aleem, et Ahmed F. Zobaa. 2020. « On the Root Mean Square Error (RMSE) Calculation for Parameter Estimation of Photovoltaic Models: A Novel Exact Analytical Solution Based on Lambert W Function ». Energy Conversion and Management 210 (avril): 112716. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112716.

« D&R International, Ltd ». s. d., 286.

Gao, Y., J. J. Roux, C. Teodosiu, et L. H. Zhao. 2004. « Reduced Linear State Model of Hollow Blocks Walls, Validation Using Hot Box Measurements ». Energy and Buildings 36 (11): 1107‑15. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.008.

Huelsz, G., G. Barrios, et J. Rojas. 2016. « Equivalent-Homogeneous-Layers-Set Method for Time-Dependent Heat Transfer through Hollow-Block Walls ». Applied Thermal Engineering 102 (juin): 1019‑23. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.113.

Pestre, Tristan, Emmanuel Antczak, Franck Brachelet, et Didier Pallix. 2022. « Multiphysical Characteristics of Limestones for Energy-Efficient and Sustainable Buildings Components ». Journal of Materials in Civil Engineering 34 (4): 04022024. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004158.

Sassine, Emilio, Yassine Cherif, Joseph Dgheim, et Emmanuel Antczak. 2020. « Experimental and Numerical Thermal Assessment of Lebanese Traditional Hollow Blocks ».

International Journal of Thermophysics 41 (4): 47. https://doi.org/10.1007/s10765-020-02626-7.

Sassine, Emilio, Elias Kinab, Yassine Cherif, Emmanuel Antczak, et Michel Nasrallah. 2021. « Thermal Performance of Lightweight Concrete Applications in Building Envelopes in Lebanon ». Building Simulation 14 (5): 1359‑75. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0762-2.

Xiong, Chao, Jinghua Yu, et Jian Yang. 2015. « Study of the Simplified Dynamic Thermal Network Model for the Hollow Block Ventilated Wall ». Procedia Engineering, The 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), 12-15 July 2015, Tianjin, China, 121 (janvier): 1304‑11. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.008.

Zeller-Plumhoff, Berit, Tamadur AlBaraghtheh, Daniel Höche, et Regine Willumeit-Römer. 2021. « Computational Modelling of Magnesium Degradation in Simulated Body Fluid under Physiological Conditions ». Journal of Magnesium and Alloys, décembre. https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.11.014.