

Etude expérimentale des performances thermiques d'un mur Trombe.

Afef LARIBI^{1*}, Sylvie BEGOT¹, Yacine AIT-OUMEZIANE¹, Valérie LEPILLER¹, Philippe DESEVAUX¹

¹Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS
Parc technologique, 2 avenue Jean Moulin – 90000 Belfort, France

*(auteur correspondant : afef.laribi@univ-fcomte.fr)

Résumé - Cette étude concerne l'analyse du comportement thermique d'un mur Trombe couplé à un local à partir des données expérimentales. Le dispositif expérimental mis en œuvre en laboratoire est décrit dans un premier temps. Les premiers résultats obtenus, à savoir les variations temporelles de la température et des flux au niveau des différents composants du système mur Trombe, sont ensuite présentés. Ces données expérimentales sont utilisées pour estimer l'efficacité énergétique du mur Trombe.

Nomenclature

A	surface, m ²	ε	émissivité, -
e	épaisseur, m	<i>Indices et exposants</i>	
H	hauteur, m	v	vitrage
L	largeur, m	la	lame d'air
C_p	chaleur spécifique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	mm	mur massif
C_d	coefficient de décharge des ouïes, -	o	ouïe
Q	flux thermique, W	amb	ambiante
S	section, m ²	$cond$	conductif
v	vitesse, m.s ⁻¹	moy	moyenne
T	température, °C		
t	temps, s		
<i>Symboles grecs</i>			
λ	conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹		
β	coefficient de dilatation thermique, K ⁻¹		
ρ	masse volumique, kg.m ⁻³		

1. Introduction

Le bâtiment, secteur le plus énergivore, pèse pour 40 % de la consommation énergétique finale en France. En effet, une partie de cette énergie qui est de nature fossile, est utilisée pour le chauffage et la climatisation dans le but d'assurer des conditions satisfaisantes de confort. L'utilisation de ce type d'énergie engendre l'émission de gaz à effet de serre. Le recours aux énergies renouvelables telle que l'énergie solaire, afin de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage en utilisant des systèmes solaires dits passifs, prend ainsi tout son sens. Une des techniques passives les plus performantes réside dans l'utilisation de murs Trombe [1]. Un tel mur est un système composé, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un vitrage séparé d'une paroi stockeuse opaque par une lame d'air ventilée. Afin de favoriser les échanges thermiques convectifs, des ouïes sont installées en parties haute et basse de la paroi stockeuse. Son intégration au bâtiment vise à valoriser le rayonnement solaire en associant deux phénomènes physiques : l'effet de serre à travers un vitrage et l'inertie thermique du mur [2].

De nombreuses études mettent en évidence l'intérêt des systèmes mur Trombe. Citons Abassi et al. [3] qui ont montré qu'un mur Trombe de surface égale à 8 m^2 permet une économie annuelle d'énergie de chauffage d'environ 77 % dans une habitation classique en Tunisie. Les travaux de Abdeen et al. [4] et Kruger et al. [5], qui montrent que l'intégration d'un mur Trombe à un local permet de réaliser environ 30 % d'économie d'énergie de chauffage et d'améliorer le confort thermique, peuvent également être cités.

Les systèmes mur Trombe présentent toutefois quelques inconvénients. En période hivernale ou durant la nuit, en absence d'ensoleillement, un phénomène de recirculation inverse se produit engendrant des pertes thermiques vers l'extérieur du système. Durant la période estivale, c'est un phénomène de surchauffe qui peut être provoqué par un tel système. Plusieurs pistes d'amélioration des performances thermiques du système mur Trombe ont été étudiées et répertoriées dans l'état de l'art par Wang et al. [6]. On retiendra qu'une grande partie des travaux portent sur l'effet du type vitrage (Stazi et al. [7]), le contrôle des ouvertures et fermetures des ouïes (Liu et al. [8]), l'ajout de protections solaires [9] ou encore les propriétés thermo-physiques de la paroi stockeuse [10].

Cette étude décrit le système mur Trombe à échelle réduite monté au sein de notre laboratoire et présente les premiers résultats expérimentaux obtenus. Les mesures réalisées concernent la température, les flux thermiques et radiatifs et la vitesse de l'air. Ces grandeurs sont mesurées dans différentes zones de la maquette et permettent d'examiner le comportement thermique du système et d'en évaluer son efficacité thermique. Le principal objectif de cette maquette est de permettre la validation de notre modèle numérique qui servira ultérieurement à une investigation des caractéristiques géométriques et constructives (dimensions des ouïes, épaisseur de la lame d'air, nature et épaisseur du matériau de la paroi stockeuse).

2. Dispositif expérimental

2.1. Configuration géométrique de la maquette et matériaux utilisés

La maquette expérimentale représente un mur Trombe de type classique intégrant un local (figure 1). Elle se présente sous la forme d'un parallélépipède de 1,97 m de hauteur et de 1,9 m de largeur. La paroi vitrée a une épaisseur de 8 mm. La lame d'air située entre la paroi vitrée et la paroi stockeuse est d'épaisseur 19 cm, ce qui correspond au dixième de la hauteur du mur [2]. Les ouïes en partie haute et basse de la paroi stockeuse sont rectangulaires et ont pour dimensions 1,2 m de longueur sur 0,195 m de hauteur. Le local auquel est associé le mur Trombe est de dimensions $1,97 \times 1,9 \times 1,9 \text{ m}^3$.

Le plancher et le plafond sont composés de dalles OSB, d'épaisseur 18 mm, isolées par l'extérieur par deux couches en polystyrène expansé et extrudé d'épaisseurs respectives 60 et 30 mm. Les murs de droite, de gauche et d'arrière sont composés de panneaux composites de fibres de bois, d'épaisseur 6 mm et isolés par l'extérieur par du polystyrène expansé d'épaisseur 60 mm.

La paroi stockeuse est composée de béton cellulaire d'épaisseur 20 cm. Nous avons choisi ce matériau car d'une part, il est très léger et facile à manipuler au cours de la phase de construction. D'autre part, ce matériau permet d'atteindre de bonnes performances thermiques en hiver et en été grâce à son inertie thermique intéressante et à son caractère d'isolant thermique. Il permet en particulier d'amortir les pics de température extérieure. L'enveloppe de la maquette a été isolée avec du polystyrène afin de limiter l'influence des conditions environnantes.

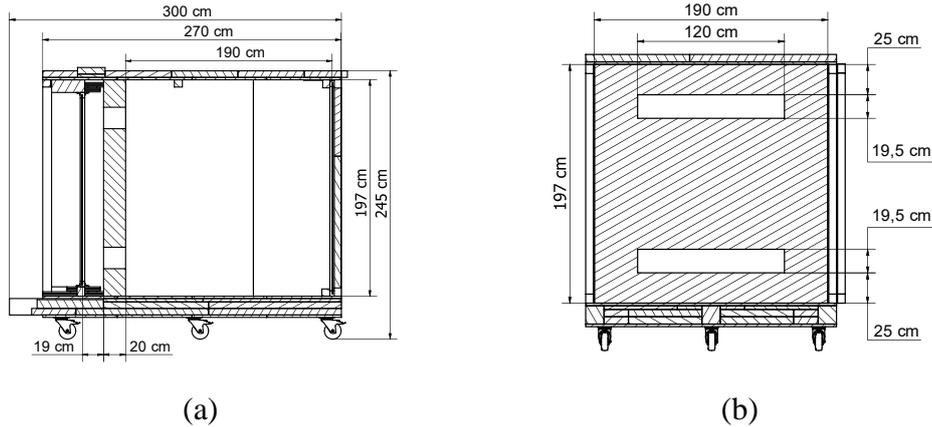


Figure 1 : Dimensions de la maquette : (a) Coupe latérale, (b) Vue de face

Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la construction de la maquette sont présentées dans le tableau 1.

	ρ kg.m ⁻³	C_p J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹	ε -
Vitrage	2500	800	1.02	0.89
Béton cellulaire	450	1000	0.11	0.85
Polystyrène	30	1450	0.038	0.9

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés

2.2. Instrumentation

L'éclairage de la maquette est simulé par un éclairage artificiel permettant de contrôler l'ensoleillement et dont le spectre lumineux se rapproche de celui de la lumière solaire. Il est mesuré par un pyranomètre. Une instrumentation spécifique, destinée à mesurer la température, le flux thermique et la vitesse dans différentes zones de la maquette, a été mise en œuvre. Les mesures de température sont réalisées dans l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la maquette ainsi qu'au niveau de certaines surfaces. L'ensemble des relevés de température est assuré par des thermocouples de type K (chromel-alumel). Les capteurs utilisés pour mesurer les flux conductif, convectif et radiatif dans le dispositif sont les fluxmètres à gradient de la marque Captec. Deux types de capteurs sont utilisés : des fluxmètres conductif-convectif et des fluxmètres radiatifs. Le logiciel Labview est utilisé pour visualiser et analyser les données. Les emplacements des différents capteurs sont indiqués dans la figure 2.

La vitesse de l'air relative sont mesurées au centre de l'ouïe haute à l'aide d'une sonde à fil chaud (modèle 9545A de la marque TSI).

Une sonde multi-fonctions (Testo 480) est utilisée pour mesurer les paramètres permettant d'évaluer le confort hygrothermique à l'intérieur du local. Cet appareil permet de mesurer la température, l'humidité relative, la température de globe (chaleur rayonnante), la vitesse d'air et le taux de CO₂.

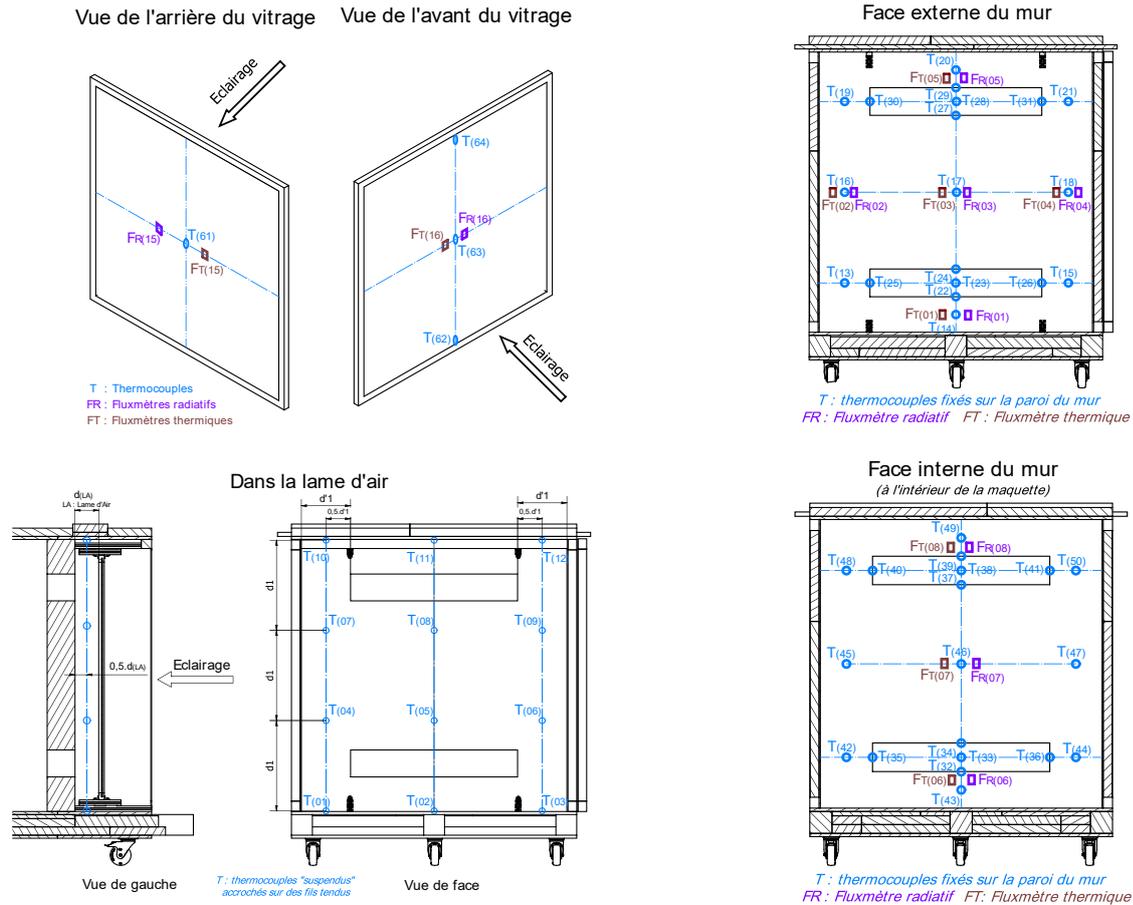


Figure 2 : Emplacement des capteurs de mesure

3. Résultats

3.1. Evolutions temporelles des grandeurs mesurées

Les résultats présentés concernent la température, la vitesse ainsi que les flux conductifs-convectifs et radiatifs dans différentes zones de la maquette. Celle-ci est installée dans un hall dans lequel la température est maintenue à environ 18 °C. La source d'éclairage artificielle a été programmée pour reproduire l'ensoleillement solaire pendant 5 heures et 25 minutes (9h-14h25), avec un flux maximal de 277 W/m². Les résultats expérimentaux présentés dans la partie suivante ont été réalisés en continu sur une période de deux jours.

La figure 3 présente l'évolution temporelle des températures moyennes dans différentes zones de la maquette. La température moyenne d'une zone correspond à la moyenne des températures indiquées par l'ensemble des capteurs de la zone. On constate que la température extérieure est quasi constante et égale en moyenne à 18 °C. La température moyenne au niveau de la face externe de mur massif peinte en noir est la plus élevée, atteignant une valeur maximale égale à environ 40 °C, due à l'absorptivité élevée de la paroi. Quant à la face interne du mur massif, elle présente une température maximale de 24,6 °C en léger déphasage (environ 1,5 heures) par rapport à la face extérieure et légèrement inférieure à la température du local (environ 26 °C comme le montre la figure 4).

La température moyenne au niveau de la face interne de la vitre (35,2 °C) est supérieure à celle de la face externe (32,3 °C). Ceci s'explique par le fait que la face externe de la vitre est impactée par les conditions extérieures de la maquette.

La figure 4 représente la température de l'air dans différentes zones de la maquette. La température moyenne au niveau de la lame d'air atteint une valeur maximale d'environ 29 °C grâce au phénomène d'effet de serre qui se produit dans cette zone. La température du local varie quant à elle entre 18 °C et 26 °C, valeur comprise dans la plage du confort thermique.

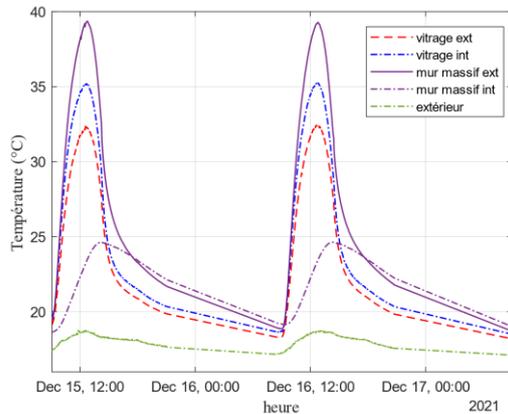


Figure 3 : Evolutions de la température moyenne dans différentes zones de la maquette

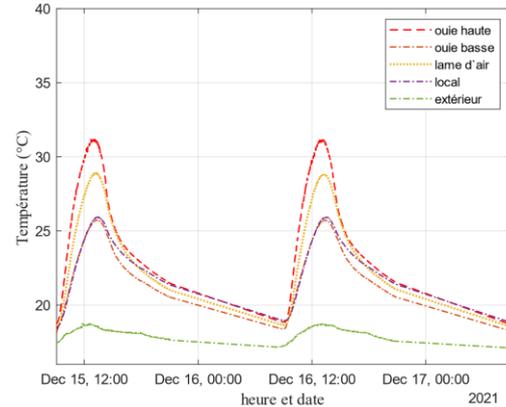


Figure 4 : Evolutions de la température moyenne de l'air au niveau des ouïes, de la lame d'air et dans le local

Les figures 5 et 6 présentent respectivement les variations temporelles des flux radiatifs et conductifs-convectifs au niveau de la face externe et interne du vitrage et de la paroi stockeuse.

Sur la figure 5, le capteur identifié FR16 mesure le flux radiatif reçu sur la face externe de la vitre. Il indique une valeur maximale d'environ 256 W/m², légèrement inférieure (-8%) à la valeur de 277 W/m² mesurée par le pyranomètre. Le capteur FR15, situé côté intérieur du vitrage en regard du mur, mesure le flux émis par la face externe de mur massif (valeur maxi 50 W/m²). La courbe FR 1-5 présente la valeur moyenne des flux radiatifs mesurés par les capteurs FR1, FR2, FR3, FR4 et FR5 placés sur la face externe du mur massif (figure 2). Cette courbe atteint une valeur maximale égale à 111 W/m². La courbe FR 6-8 présente la valeur moyenne des flux radiatifs mesurés par les capteurs FR6, FR7, FR8 placés sur la face interne du mur massif. Cette courbe reste très proche de la valeur de 0 montrant l'absence de transferts par rayonnement.

La figure 6 concerne les flux conductifs et convectifs mesurés en différents points à la surface de la maquette. Au niveau de la face externe du vitrage, le flux thermique par conduction et par convection (FT16) augmente légèrement jusqu'à atteindre 20 W/m² puis diminue jusqu'à la valeur négative de -30 W/m². Ces échanges thermiques sont expliqués par l'impact des conditions ambiantes dans le hall. Au niveau de la face externe de la paroi stockeuse (FT1-5), l'échange se fait majoritairement par convection avec la lame d'air. En absence d'éclairage, des déperditions thermiques vers l'extérieur de la maquette ont lieu. Quant à la face interne (FT 6-8), l'échange thermique est moins important et reste inférieur à 10 W/m².

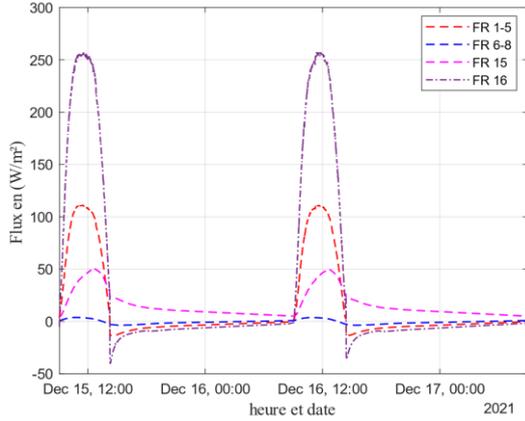


Figure 5 : Evolutions du flux radiatif dans différentes zones de la maquette

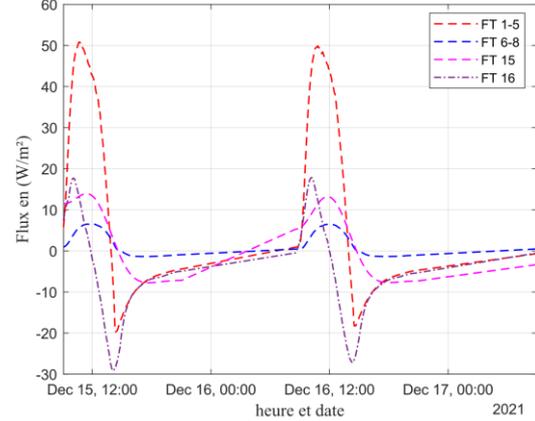


Figure 6 : Evolutions du flux conductif et convectif dans différentes zones de la maquette

La figure 7 présente les évolutions de la vitesse au niveau du centre de l'ouïe haute et au centre du local. On remarque que la vitesse au niveau de l'ouïe est fortement dépendante de l'éclaircement. La vitesse atteint une valeur maximale égale à 0,20 m/s quand l'éclaircement est maximal. La vitesse de l'air dans le centre du local reste quant à elle quasi constante.

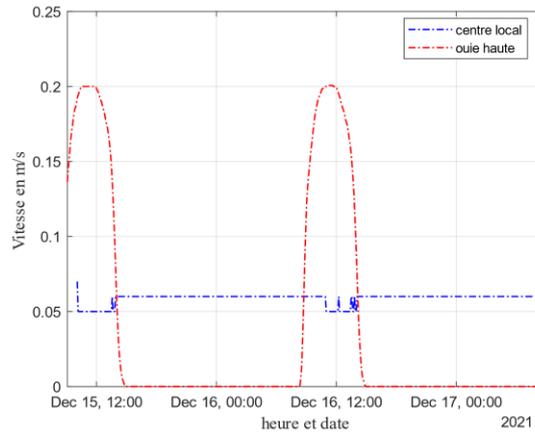


Figure 7 : Evolutions de la vitesse au niveau de l'ouïe haute et au centre du local

3.2. Efficacité thermique du système

L'efficacité thermique du système η est définie comme étant le rapport entre la chaleur transmise au local et le flux radiatif reçu sur la paroi vitrée durant une journée [11] (équation 1). L'énergie transmise à l'intérieur du local est égale à la somme des énergies transmises par conduction à travers le mur et par convection à travers les ouïes. Le flux par conduction à travers le mur (Q_{cond}) est mesuré expérimentalement (FT6-8) et le flux par convection à travers les ouïes (Q_{air}) est calculé à l'aide de l'équation (2).

Expérimentalement, la vitesse de l'air n'est mesurée qu'en un seul point. Nous avons donc préféré calculer le débit d'air à partir de la vitesse moyenne déterminée à partir de l'expression (3) [12].

$$\eta = \frac{\int (Q_{air} + Q_{cond}) dt}{\int I_{solaire} A_{vitrage} dt} \quad (1)$$

$$Q_{air} = v_{air} S_{ouïe} \rho (T_{entrée, moy} - T_{sortie, moy}) \quad (2)$$

$$v_{air} = \sqrt{\frac{2gH_{ouïes}\beta(T_{entrée, moy} - T_{sortie, moy})}{C_1\left(\frac{S_{la}}{S_{ouïe}}\right)^2 + C_2\left(\frac{S_{la}}{S_{ouïe}}\right)^2 + C_f\left(\frac{S_{la}}{2(L+H)}\right)}} \quad (3)$$

Avec : $C_1 = 0,25$; $C_2 = 0,30$; $C_f = 0,41 \times Gr^{0,084}$ [12]

La figure 8 présente les évolutions temporelles des flux de chaleur reçus sur le vitrage et des flux transmis à l'intérieur du local par convection à travers les ouïes et par conduction à travers le mur en béton cellulaire. Le flux conductif est négligeable vis-à-vis du flux transmis par convection à travers les ouïes. Ceci s'explique par le caractère isolant du béton cellulaire. L'échange se fait donc majoritairement par thermo-circulation à travers les ouïes.

L'efficacité énergétique sur une journée, calculée par l'équation (1), est égale à 69 %. Cette valeur élevée s'explique des déperditions thermiques très faibles du fait que la maquette est installée en laboratoire où les conditions d'ambiances sont contrôlées et quasi-constantes.

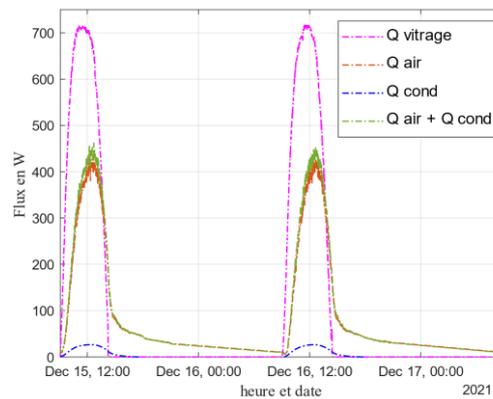


Figure 8 : Evolutions des flux de chaleur

4. Conclusion

Cette étude présente les premiers résultats expérimentaux obtenus sur une maquette de mur Trombe montée au sein de notre laboratoire. Les mesures concernent la température, les flux de chaleur, et la vitesse relevés dans différentes zones de la maquette sur une période de deux jours. Les résultats nous permettent de calculer une efficacité énergétique. Ce dispositif expérimental va être utilisé pour valider un modèle numérique CFD du système mur Trombe qui permettra une investigation systématique de l'influence de certains paramètres tels que l'épaisseur de la lame d'air et le pourcentage d'ouverture des ouïes sur l'efficacité énergétique et le confort thermique.

Références

- [1] J. Dong, Z. Chen, L. Zhang, Y. Cheng, S. Sun, et J. Jie, « Experimental investigation on the heating performance of a novel designed trombe wall », *Energy*, vol. 168, p. 728-736, févr. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.125.
- [2] A. Laribi, S. Begot, V. Lepiller, Y. Ait-Oumeziane, et P. Desevaux, « Modélisation CFD des performances thermiques d'un mur Trombe. », Congrès de la Société Française de Thermique (SFT) à Belfort, p. 8.
- [3] F. Abbassi, N. Dimassi, et L. Dehmani, « Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations », *Energy and Buildings*, vol. 80, p. 302-308, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.036.

- [4] A. Abdeen, A. A. Serageldin, M. G. E. Ibrahim, A. El-Zafarany, S. Ookawara, et R. Murata, « Experimental, analytical, and numerical investigation into the feasibility of integrating a passive Trombe wall into a single room », *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, p. 751-768, mai 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.03.090.
- [5] E. Krüger, E. Suzuki, et A. Matoski, « Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location », *Energy and Buildings*, vol. 66, p. 364-372, nov. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.035.
- [6] D. Wang *et al.*, « Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, p. 109772, mai 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109772.
- [7] F. Stazi, A. Mastrucci, et C. di Perna, « The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study », *Energy and Buildings*, vol. 47, p. 217-229, avr. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.039.
- [8] Y. Liu, D. Wang, C. Ma, et J. Liu, « A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall », *Solar Energy*, vol. 91, p. 1-10, mai 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.01.016.
- [9] A. Briga Sá, J. Boaventura-Cunha, J.-C. Lanzinha, et A. Paiva, « An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions: Influence of ventilation openings and shading devices », *Energy and Buildings*, vol. 138, p. 546-558, mars 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.085.
- [10] A. Fernández-González, « Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest », *Solar Energy*, vol. 81, n° 5, p. 581-593, mai 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.09.010.
- [11] A. D. Demou et D. G. E. Grigoriadis, « 1D model for the energy yield calculation of natural convection solar air collectors », *Renewable Energy*, vol. 119, p. 649-661, avr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.12.030.
- [12] Y. Lin, J. Ji, F. Zhou, Y. Ma, K. Luo, et X. Lu, « Experimental and numerical study on the performance of a built-middle PV Trombe wall system », *Energy and Buildings*, vol. 200, p. 47-57, oct. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.042.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'EIPHI Graduate School (contrat ANR-17-EURE-0002) et à la Région Bourgogne-Franche-Comté.