



**HAL**  
open science

# Étude expérimentale et numérique d'un mur solaire composite intégrant une paroi stockeuse en mortier ciment et MCP micro-encapsulé

Enghok Leang, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue

## ► To cite this version:

Enghok Leang, Pierre Tittlein, Laurent Zalewski, Stéphane Lassue. Étude expérimentale et numérique d'un mur solaire composite intégrant une paroi stockeuse en mortier ciment et MCP micro-encapsulé. 26ième Congrès Français de Thermique 2018 (Thermique et Sciences de l'information), May 2018, Pau, France. hal-03246204

**HAL Id: hal-03246204**

**<https://hal.science/hal-03246204v1>**

Submitted on 8 Jul 2021

**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.

# Étude expérimentale et numérique d'un mur solaire composite intégrant une paroi stockeuse en mortier ciment et MCP micro-encapsulé

Enghok LEANG<sup>a</sup>, Pierre TITTELEIN<sup>a</sup>, Laurent ZALEWSKI<sup>a\*</sup>, Stéphane LASSUE<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

\* (auteur correspondant : laurent.zalewski@univ-artois.fr)

**Résumé** - Cet article présente l'étude d'un mur solaire de type Trombe composite intégrant une paroi stockeuse constituée d'un mortier ciment contenant un matériau à changement de phase micro-encapsulé. Un modèle numérique de ce mur solaire a été développé en utilisant le logiciel Dymola/Modelica. Les résultats issus de simulations sont comparés à des mesures expérimentales réalisées sur une maquette à échelle réduite en vue d'une validation du modèle. Les résultats numériques et mesurés obtenus montrent une bonne similitude pour les grandeurs caractéristiques du composant solaire essentiels à l'évaluation de ses performances énergétiques.

## Nomenclature

$A$	surf. d'échange de la paroi stockeuse, m <sup>2</sup>	<i>Indices et exposants</i>	
$C$	capacité thermique, J.° kg <sup>-1</sup> .C <sup>-1</sup>	cal	calculé
$L_A$	chaleur latente, J.kg <sup>-1</sup>	Flux	estimé à partir de mesures de flux
$T$	température, °C	int	face intérieure de la lame d'air
$F$	densité de flux, W.m <sup>-2</sup>	ext	face extérieure de la paroi stockeuse
$h$	enthalpie massique, J.kg <sup>-1</sup>	liq	MCP à l'état liquide dans le mortier
$V$	volume de la maille, m <sup>3</sup>	sol	MCP à l'état solide dans le mortier
<i>Symboles grecs</i>		ob	ouïe basse
$\lambda$	conductivité thermique, W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>	oh	ouïe haute
$\rho$	masse volumique, kg.m <sup>-3</sup>	pièce	ambiance à chauffer
$\phi$	flux de chaleur, W		

## 1. Introduction

Le mur solaire composite est une version de mur solaire intéressante par le fait qu'elle permet, par le biais d'un élément de transfert à forte capacité thermique, de déphaser les apports énergétiques et de ce fait de venir en complément d'apports solaires directs par des vitrages. L'énergie récupérée est donc valorisée à des instants où les besoins de chauffage sont les plus importants pour l'habitat (présence des occupants, évitement du pic de consommation, etc.). Afin d'améliorer l'efficacité de la paroi solaire, l'élément stockeur est ici constitué d'un mortier ciment contenant un matériau à changement de phase micro-encapsulé dont la température de changement d'état est 26°C. La présence du MCP au sein de la paroi stockeuse permet d'améliorer la capacité de stockage du mur mais modifie son comportement thermique dynamique en comparaison avec une paroi classique qui elle, ne stocke que de l'énergie sensible. L'objectif de ce travail est de développer des modèles numériques fiables qui permettront de modéliser les transferts thermiques, d'optimiser le composant et d'estimer les

performances thermiques de la paroi solaire à l'année et pour différents climats. Pour valider ces modèles, un mur solaire composite à échelle réduite a été construit, instrumenté et placé en façade sud d'une des salles du laboratoire.

L'article propose de présenter le mur solaire composite puis le modèle numérique du mur solaire développé avec le langage Modelica et le logiciel Dymola. L'étude se poursuit par la confrontation des mesures expérimentales avec les résultats des simulations numériques.

## 2. Mur solaire composite

Dans cette configuration de mur solaire, une paroi isolante percée de deux ouïes est placée en face arrière de la paroi stockeuse créant ainsi une lame d'air verticale ventilée où l'air de l'ambiance vient se réchauffer. En plus de déphaser les apports, cette configuration a l'avantage de pouvoir maîtriser la quasi-totalité des apports par le contrôle du débit de ventilation dans la lame d'air par fermeture ou non d'une des ouïes. L'ajout de cet isolant en face arrière permet également d'augmenter la résistance thermique de la paroi lors des périodes où les apports solaires sont déficients. Ici, pour ce prototype expérimental, aucun système contrôlant la circulation d'air n'a été installé ; le phénomène de thermocirculation inverse peut de fait être observé.

La maquette réalisée à échelle réduite de 83 cm de haut, 73 cm de large et 1 m de profondeur a été construite et placée en façade sud du laboratoire. Les dimensions de la paroi stockeuse sont  $71 \times 59 \times 4 \text{ cm}^3$ .

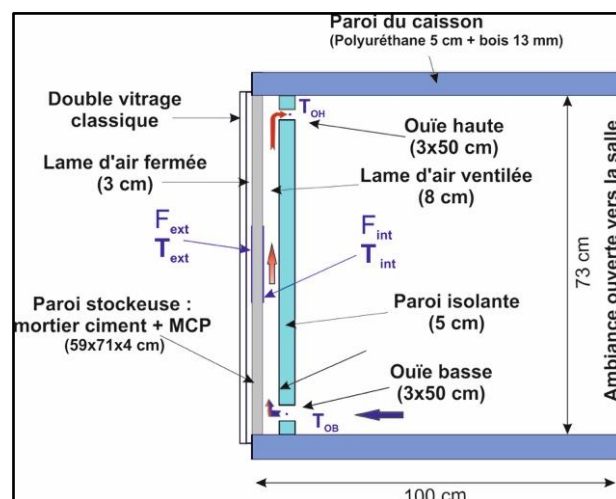


Figure 1: Schéma du mur solaire composite et instrumentation

L'instrumentation se compose à l'extérieur du bâtiment d'un pyranomètre, d'une sonde de température extérieure et d'un anémomètre pour la vitesse du vent. Le mur solaire est équipé de thermocouples pour les mesures de températures d'air et de surfaces, deux fluxmètres à gradients tangentiels. Le pyranomètre est situé dans le plan vertical de la façade recevant le flux solaire incident. Il faut préciser que la fenêtre du laboratoire est située au-dessus d'un local qui possède une avancée en tôle blanche. Ceci permet de bénéficier de réflexions solaires de cette avancée afin d'obtenir des flux solaires plus conséquents. Les deux capteurs de flux avec thermocouple intégré ( $F_{ext}$ ,  $T_{ext}$ ,  $F_{int}$  et  $T_{int}$ ) sont disposés sur les deux faces de la paroi stockeuse en position centrale (Figure 1). Le fluxmètre ( $F_{ext}$ ) mesure le flux de chaleur entrant ou sortant de la face extérieure de la paroi stockeuse (rayonnement solaire et échanges entre la paroi stockeuse et le double vitrage). Du côté de la lame d'air ventilée, le fluxmètre ( $F_{int}$ ) mesure simultanément les échanges par convection entre la paroi stockeuse et l'air ainsi que les échanges radiatifs entre cette même paroi et le mur isolé situé en vis à vis.

Deux thermocouples mesurent la température de l'air à l'entrée de lame d'air au niveau de l'ouïe basse ( $T_{ob}$ ) et en sortie en partie supérieure ( $T_{oh}$ ).

### 3. Données climatiques

Les données météorologiques utilisées proviennent de mesures enregistrées pendant une semaine à BETHUNE en façade sud-ouest (latitude 50,51°N, longitude 2,65°E) la troisième semaine d'avril. Le rayonnement solaire global vertical irradiant la façade du bâtiment a été mesurée par un pyromètre (CMP10 de chez Kipp & Zonen) et la température extérieure par un thermocouple inséré dans un cylindre blanc naturellement ventilé. Les mesures enregistrées et utilisées comme données d'entrée du modèle sont illustrées ci-dessous :

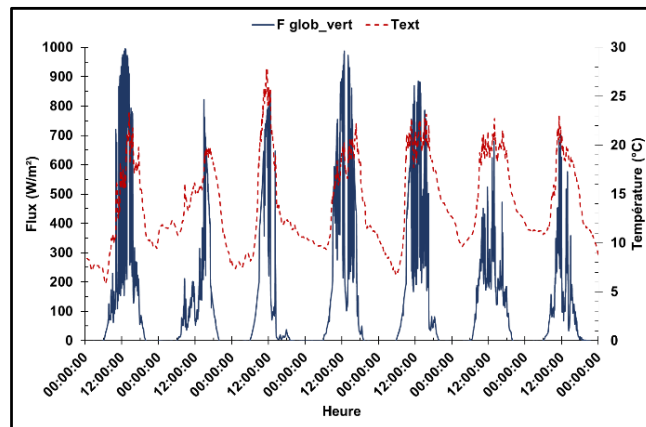


Figure 2: Données climatiques

### 4. Modèle numérique

La Figure 3 illustre les différents composants du modèle pour le mur solaire composite, les conditions aux limites imposées aux frontières extérieures et intérieures utilisées dans le logiciel Dymola/Modelica. Dans ce modèle, certains des éléments utilisés proviennent des bibliothèques "Buildings" et "IDEAS" [1,2]. Les composants concernant la modélisation des transferts thermiques au sein du mur stockeur ou de la lame d'air ventilée ont été créés pour les besoins de cette étude.

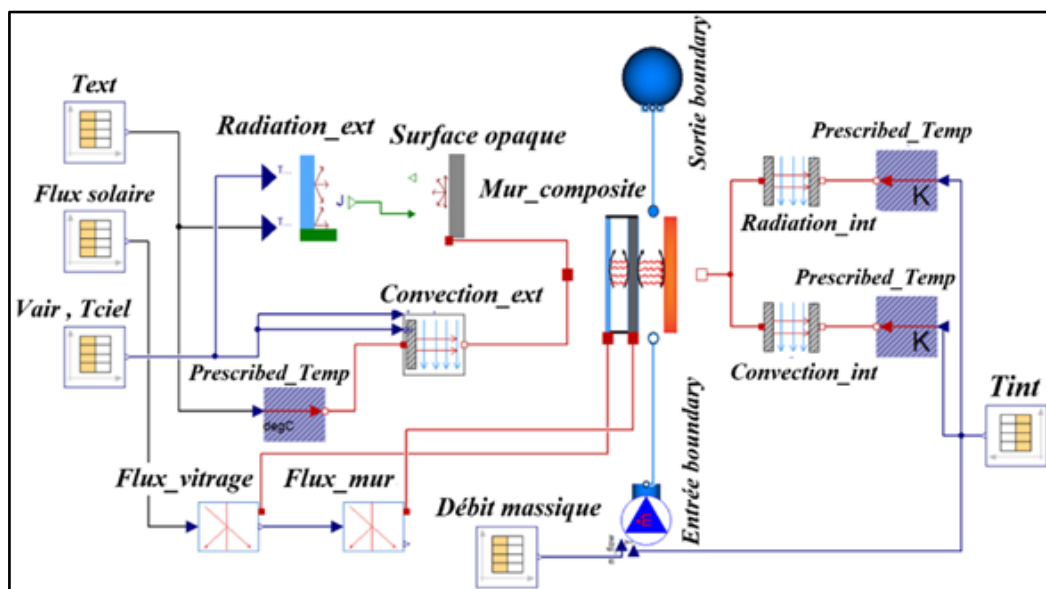


Figure 3: Schéma du modèle issu de Dymola/Modelica

La méthode la plus courante pour utiliser Dymola/Modelica consiste à créer graphiquement un modèle en sélectionnant, en dessinant, en connectant et en configurant les composants individuels pris dans une bibliothèque. Les données météorologiques sont stockées dans des tables ; tandis que les codes (formules et équations) représentant le comportement physique des différentes parties du modèle (convection, rayonnement et conduction) sont intégrés dans les différents composants tels que :

- Flux\_vitrage : évalue le flux solaire absorbé par le vitrage et le flux direct transmis à la face externe du mur stockeur ;

- Flux\_mur : évalue l'énergie totale absorbée par le mur stockeur en tenant compte du flux thermique transmis par le vitrage et des multi-réflexions dans la lame d'air non ventilée ;

- Radiation\_ext : évalue les échanges par rayonnement grandes longueurs d'onde entre la vitre et le ciel ainsi que le rayonnement réfléchi par le sol vers la façade ;

- Convection\_ext: évalue les transferts thermiques par convection entre le mur composite et l'extérieur. Ils dépendent de la température, de la vélocité et de l'orientation du vent ;

- Convection\_int: évalue les transferts thermiques par convection entre la façade intérieure du mur (isolant de la lame air ventilée) et l'environnement intérieur du caisson ;

- Radiation\_int: évalue les transferts thermiques par rayonnement entre la façade intérieure du mur (isolant de la lame air ventilée) et l'environnement intérieur du caisson.

En ce qui concerne l'évaluation des transferts thermiques au sein de la paroi stockeuse intégrant le MCP, la méthode enthalpique [3,4] est utilisée :

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

La paroi est discrétisée en mailles pour lesquelles le bilan thermique peut s'écrire de la manière suivante :

$$\rho \cdot V \cdot C \frac{dT}{dt} = \phi_i - \phi_{i+1} \quad (2)$$

La paroi est discrétisée en mailles pour lesquelles  $\phi_i$  et  $\phi_{i+1}$  représentent les flux unidirectionnels à leurs bornes.  $C$  représente la dérivée de l'enthalpie par rapport à la température  $T$ . Les relations suivantes permettent de déterminer la valeur de  $C$  en fonction de la température du matériau. Elles sont basées sur un modèle analytique de mélange binaire [3,4] :

$$\text{si } T \leq T_M$$

$$C = \frac{(T_A - T_M) \cdot L_A}{(T_A - T)^2} + C_{sol} \cdot \left(1 - \frac{(T_A - T_M)}{(T_A - T)}\right) + C_{liq} \cdot \frac{(T_A - T_M)}{(T_A - T)} \quad (3)$$

$$\text{sinon } C = C_{liq} \quad (4)$$

avec :  $T_A$  la température de fusion du corps pur associé au MCP,

$T_M$  la température de fin de fusion du MCP.

Ce modèle basé [3–5] sur la dérivée de la courbe enthalpique du matériau composite (mortier+MCP) permet de reproduire fidèlement le comportement thermique de la paroi stockeuse contenant le MCP micro-encapsulé de façon fiable aussi bien dans les périodes de fusion que dans les périodes de solidification du MCP. Les propriétés thermophysiques de la paroi stockeuse de dimensions 71 x59 x 4 cm ont été déterminées à partir de mesures réalisées au LGCgE au moyen d'un banc expérimental fluxmétrique muni de plaques échangeuses de 1m x 1m selon des méthodes décrites notamment dans les communications [6,7].

Les propriétés thermophysiques de la paroi sont identifiées à partir de ces mesures et de méthodes inverses associées à des méthodes d'optimisation [4,5]. Les propriétés identifiées pour la paroi de cette étude sont présentées dans le tableau ci-dessous :

$\rho$	$\lambda$	$C_{sol}$	$C_{liq}$	$L_A$	$T_M$	$T_A$
kg.m <sup>-3</sup>	J.kg <sup>-1</sup> .°C	J.kg <sup>-1</sup> .°C	J.kg <sup>-1</sup> .°C	J.kg <sup>-1</sup>	°C	°C
1329	0.6	1178	1150	17100	25.8	27.4

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques de la paroi stockeuse

Le bilan énergétique de la lame d'air ventilée a été calculé en utilisant deux méthodes différentes validées dans des études antérieures [8–10].

La première méthode s'appuie sur l'étude de l'écoulement de l'air à l'intérieur de la lame d'air à partir des équations de la mécanique des fluides. La détermination du débit massique s'effectue à partir du cumul des pertes de charge sur le trajet suivi par l'air de son entrée à sa sortie de la lame d'air. L'équation permettant d'estimer l'énergie restituée à l'ambiance et qui sera utilisée dans le modèle numérique est :

$$P_{cal} = \dot{m}C_f |T_{sortie} - T_{entrée}| \quad (5)$$

La seconde méthode est basée sur une mesure directe du flux thermique sur la face intérieure de la paroi stockeuse et la considération que la densité de flux délivrée par la paroi stockeuse est restituée en totalité à l'air :

$$P_{flux} = \sum F_{,int} \cdot A \quad (6)$$

## 5. Résultats et discussion

La Figure 4 et Figure 5 montrent la comparaison des densités de flux ou des températures mesurées et calculées sur les deux faces de la paroi stockeuse. Lorsque le rayonnement solaire atteint son intensité maximale variant de 950 à 1000 W/m<sup>2</sup> (cf. Figure 2), le mur stockeur peut absorber une quantité de flux solaire ( $F_{,ext}$ ) allant de 400 à 450 W/ m<sup>2</sup> et correspondant à environ 50% du rayonnement solaire incident pendant les heures d'ensoleillement. Ce pourcentage confirme les mesures du taux de transmission réalisées sur le double vitrage. Ce flux, côté extérieur de la paroi stockeuse, devient négatif (-50 W / m<sup>2</sup>) au coucher du soleil en raison des pertes de chaleur à travers le double vitrage vers l'environnement extérieur. Il faut préciser que le vitrage est un double vitrage classique ; un vitrage à isolation renforcée aurait certainement permis de limiter ces déperditions. Le déphasage, pour cette paroi stockeuse de 4 cm, entre le flux solaire incident et le flux restitué dans la lame d'air ( $F_{int}$ ) est estimé par le calcul d'une fonction d'intercorrélation [8] à 184 minutes, soit environ 3 heures. La température la plus élevée atteinte par la paroi stockeuse est de 65 ° C sur sa surface extérieure et de 45 ° C sur sa surface intérieure. L'écart entre les densités de flux thermiques issus de la simulation numérique et les flux expérimentaux de la somme de la valeur absolue des flux est de 1% pour les  $Flux_{,ext}$  et 10% pour les  $Flux_{,int}$  ; l'écart de température entre les valeurs numériques et expérimentales sont en moyenne de 1 °C sur  $T_{,ext}$  et  $T_{,int}$  et 0,4 °C pour  $T_{oh}$ .

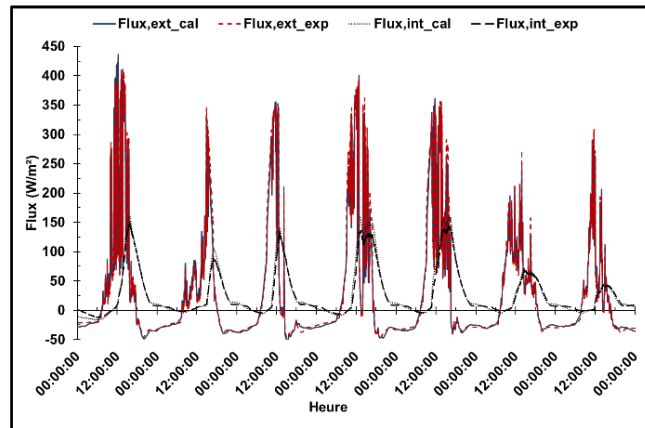


Figure 4: Densité de flux sur les faces intérieure et extérieure de la paroi stockeuse

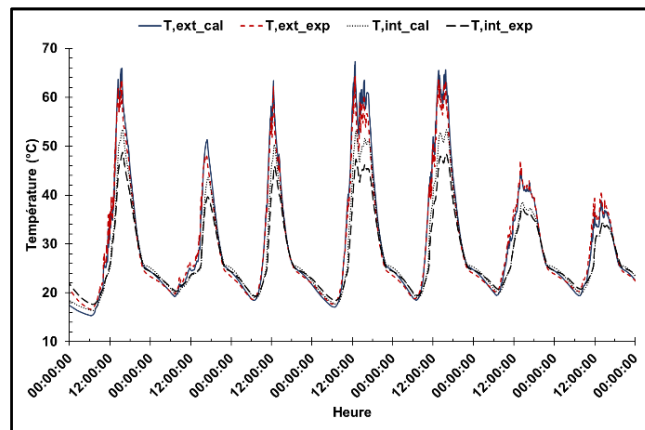


Figure 5: Températures des faces intérieure et extérieure de la paroi stockeuse

La Figure 6 illustre l'évolution des températures d'air en entrée et sortie de lame ventilée ainsi que la température de l'ambiance ( $T_{\text{pièce}}$ ). L'analyse de ces températures permet d'identifier le parcours de l'air dans cette lame d'air. Lorsque la paroi stockeuse est plus chaude que l'ambiance, l'air entre par l'ouïe basse ( $T_{\text{ob}}$ ), se réchauffe en son contact et en ressort par l'ouïe haut plus chaud ( $T_{\text{oh}}$ ). A contrario, lorsque la paroi stockeuse est plus froide que l'ambiance, l'air entre par l'ouïe haute, se refroidit en son contact et en ressort plus froid par l'ouïe basse, il y a alors thermocirculation inverse (fin de nuit). Pour identifier le sens de l'écoulement, il suffit de regarder quelle température de  $T_{\text{ob}}$  ou  $T_{\text{oh}}$  est la plus proche de la température de l'air de l'ambiance ( $T_{\text{pièce}}$ ).

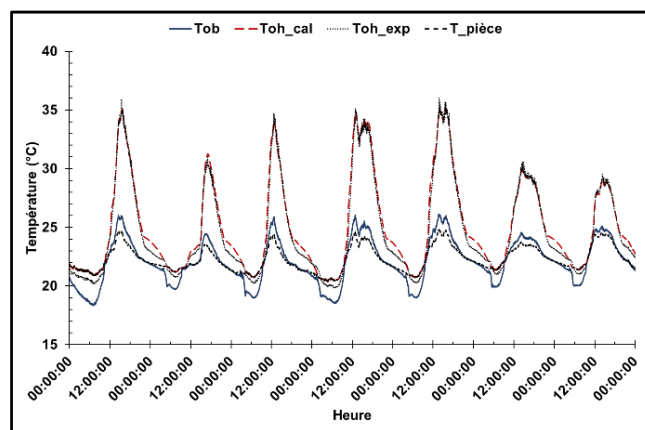


Figure 6: Température en entrée et sortie lame d'air

On remarquera que l'air peut sortir très chaud (presque 35°C) de la lame d'air et que cette température de sortie d'air (Toh) est très correctement estimée.

La bonne estimation des flux échangés au sein de la lame d'air ventilée (F,int) ainsi que celle de la température de sortie de lame d'air indiquent que les transferts thermiques au sein du composant solaire le sont également. Il est ainsi possible d'envisager de réaliser un bilan énergétique du mur solaire afin d'en évaluer son efficacité (Figure 7).

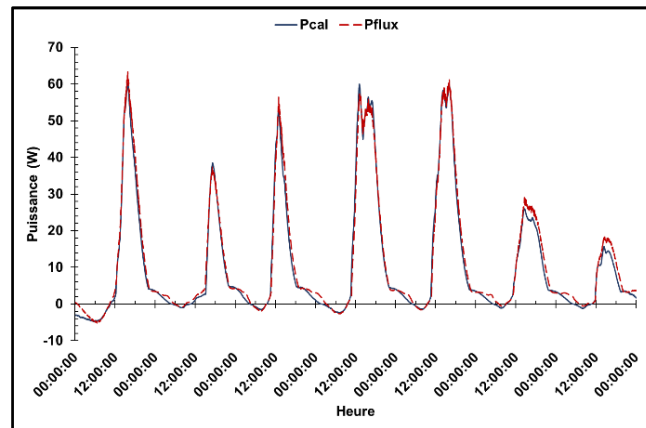


Figure 7: Puissance instantanée fournie à l'ambiance

La Figure 7 montre la comparaison des énergies restituées à l'ambiance par le mur solaire calculées par le modèle et estimées à partir des mesures de flux (cf. Eq (5) & (6)) sur une période d'une semaine. Elle montre que le modèle représente très bien la dynamique des échanges. Dans les périodes de faibles échanges thermiques, quelques petites différences peuvent être observées. Cependant, l'énergie totale récupérée calculée et mesurée sont respectivement de 4,5 kWh et de 4,8 kWh par m<sup>2</sup> de capteur solaire ; l'écart entre les deux méthodes est égal à 8,1%. L'énergie solaire incidente mesurée est égale à 15,7 kWh/m<sup>2</sup> sur la période considérée. 52,9% de cette énergie, ce qui équivaut à 8,3 kWh/m<sup>2</sup>, a été absorbé par le mur stockeur en face extérieure. L'énergie restituée dans la lame d'air ventilée est estimée à 4,8 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui équivaut à 58% de l'énergie absorbée et à 31% de l'énergie solaire incidente.

## 6. Conclusion

Cet article a présenté la validation d'un code numérique développé avec le logiciel Dymola/Modelica. Les transferts thermiques "classiques" conduction, convection, rayonnement, transmission solaire, etc. sont modélisés à partir de composants disponibles dans les bibliothèques "Buildings" et "IDEAS". Les transferts concernant la paroi stockeuse en mortier ciment intégrant un MCP micro-encapsulé ont fait l'objet d'une création de composant spécifique afin de prendre en compte le changement d'état du matériau lors du changement de phase. Les transferts thermiques au sein de lame d'air et le calcul du bilan énergétique réalisé sur l'air en mouvement ont également fait l'objet d'une création de composant. Ces créations s'appuient sur des études antérieures. La validation du modèle est effectuée à partir de données expérimentales enregistrées sur une maquette de mur solaire au sein de notre laboratoire. Les résultats montrent une bonne adéquation entre les flux et températures mesurées et calculées aux faces de la paroi stockeuse ainsi que pour la température de sortie de lame d'air ventilée. Ces grandeurs importantes dans le calcul des apports énergétiques à l'ambiance. Un bilan énergétique ainsi qu'une efficacité du mur solaire sont estimés sur une période d'une semaine. Ces travaux sont les prémices de simulations numériques nécessaire à l'optimisation de la paroi solaire et à l'intégration des composants dans un modèle à l'échelle du bâtiment.



## Références

- [1] M. Wetter, M. Bonvini, T.S. Nouidui, W. Tian, W. Zuo, Modelica Buildings library 2.0, in: Proceedings of BS2015, Hyderabad, India, 2015.
- [2] R. Baetens, R. De Coninck, F. Jorissen, D. Picard, L. Helsen, D. Saelens, OPENIDEAS – An open framework for integrated district energy simulations, in: Proceedings of BS2015, Hyderabad, India, 2015.
- [3] P. Tittlein, S. Gibout, E. Franquet, K. Johannes, L. Zalewski, F. Kuznik, J.-P. Dumas, S. Lassue, J.-P. Bédécarrats, D. David, Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: Influence of the thermodynamical modelling, *Applied Energy*. 140 (2015) 269–274. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.055.
- [4] E. Franquet, S. Gibout, P. Tittlein, L. Zalewski, J.-P. Dumas, Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM, *Applied Thermal Engineering*. 73 (2014) 32–40. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.06.053.
- [5] A. Joulin, L. Zalewski, S. Lassue, H. Naji, Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material, *Applied Thermal Engineering*. 66 (2014) 171–180. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.01.027.
- [6] A.D. Côté, L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, T. Chartier, Etude thermique comparative de deux mortiers dont l'un contient des matériaux à changement de phase, in: Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Sur La Thermique Des Systèmes, Saguenay, 2011.
- [7] P. Tittlein, S. Gibout, E. Franquet, L. Zalewski, D. Defer, Identification of Thermal Properties and Thermodynamic Model for a Cement Mortar Containing PCM by Using Inverse Method, *Energy Procedia*. 78 (2015) 1696–1701. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.265.
- [8] L. Zalewski, M. Chantant, S. Lassue, B. Duthoit, Experimental thermal study of a solar wall of composite type, *Energy and Buildings*. 25 (1997) 7–18. doi:10.1016/S0378-7788(96)00974-7.
- [9] L. Zalewski, S. Lassue, B. Duthoit, M. Butez, Study of solar walls — validating a simulation model, *Building and Environment*. 37 (2002) 109–121. doi:10.1016/S0360-1323(00)00072-X.
- [10] J. Shen, S. Lassue, L. Zalewski, D. Huang, Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls, *Energy and Buildings*. 39 (2007) 962–974. doi:10.1016/j.enbuild.2006.11.003.

## Remerciements

Nous remercions la Région des Hauts-de-France et l'Université d'Artois pour le financement du contrat doctoral de M. LEANG Enghok. Nous remercions également l'entreprise BASF pour nous avoir gracieusement fourni le Micronal.