

## Modélisation du Changement de Phase dans un Matériau de Construction : Application dans le bâtiment

T. Kousksou<sup>1\*</sup>, T. Elrhafiki<sup>2</sup>, A. Jamil<sup>3</sup>, Y. Zeraouli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Electrique (SIAME).  
Avenue de l'Université, BP 1155, 64013 Pau Cedex, France

<sup>2</sup>Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, ENSAM Marjane II, BP - 4024 Meknès Ismailia, Maroc.

<sup>3</sup>École Supérieure de Technologie de Fès, Université Sidi Mohamed Ibn Abdelah Route d'Imouzzer BP 2427.

\* (auteur correspondant : [tarik.kousksou@univ-pau.fr](mailto:tarik.kousksou@univ-pau.fr))

**Résumé** - Dans ce travail, nous présentons un modèle physique pour étudier les transferts thermiques dans un matériau de construction à base de ciment qui contient un matériau à changement de phase (MCP) sous forme de microbilles encapsulées. L'objectif est de mettre en évidence, à partir de différentes expérimentations numériques, le comportement thermique du matériau de construction en présence d'un MCP.

Mots-clés: Modélisation, Transferts thermiques, MCP, Bâtiment.

### 1. Introduction

Afin de réduire les consommations énergétiques des bâtiments, des solutions passives ont été développées. L'isolation des parois extérieures a tout d'abord été augmentée et plus tard l'inertie des matériaux en favorisant le stockage-déstockage de l'énergie thermique à l'intérieur du bâtiment. Il faut remarquer sur ce dernier point, que la France à l'inverse de l'Allemagne, met en œuvre de façon majoritaire une isolation intérieure, solution qui n'est pas, thermiquement parlant, la solution la plus optimale. Une autre manière d'améliorer les performances énergétiques d'une construction bien isolée est de développer des composants d'enveloppes multifonctionnels utilisables à la fois pour la protection, l'isolation, mais aussi pour le captage et le stockage d'énergie gratuite d'origine solaire. Les matériaux à changement de phase (MCPs) permettent de stocker à volume identique davantage d'énergie thermique que les matériaux qui stockent que la chaleur sensible. L'incorporation des MCPs dans des matériaux de construction permet donc d'augmenter l'inertie des bâtiments sans en diminuer la surface utile. Plusieurs études ont déjà été menées en ce sens [1-4]

L'objectif de cet article est de montrer via la modélisation l'effet de ces matériaux sur le comportement thermique d'un mur.

### 2. Modèle physique

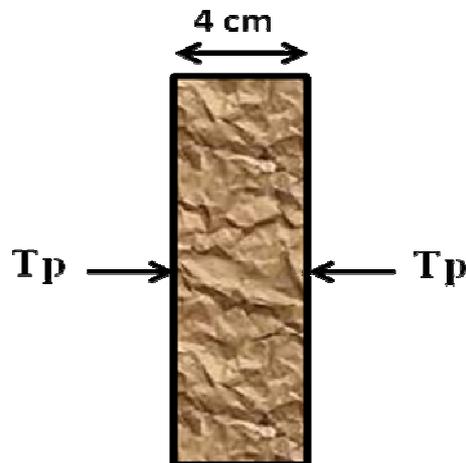


Figure 1 : Enveloppe.

Dans le cadre de ce travail, nous supposons que le matériau de construction contenant des microbilles confinant un MCP est conditionné dans une enveloppe de forme parallélépipédique de dimension  $25 \times 25 \times 4 \text{ cm}^3$  (voir **Fig.1**). Les propriétés du MCP et du matériau de construction sont données sur les **Tableaux 1 et 2**. Les dimensions de l'enveloppe sont supposées assez grandes de manière à ne considérer que des transferts de chaleur unidirectionnels perpendiculairement au plan de l'enveloppe.

La modélisation s'inspire des méthodes de la mécanique des milieux continus appliquées aux milieux poreux : méthodes qui consistent à exprimer localement les lois de conservation et à les moyenner dans un volume de référence [5-6]. Le matériau de construction est assimilé à un milieu poreux à deux phases : une phase à base de ciment et de sable et une phase à base du MCP. Le MCP confiné dans des microbilles est supposé homogène et isotrope. On supposera que toutes les de microbilles dispersées ont la même taille. Nous supposons aussi qu'il y a une symétrie entre la cristallisation et la fusion (i.e. les effets de la surfusion sont négligeables). Ces hypothèses ont permis d'établir pour chacune des phases, les équations de conservation de l'énergie dans le stock. Elles se résument de la manière suivante :

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques du MCP.

Température de fusion	27°C
Chaleur spécifique (solide)	1,42 kJ/kg.°C
Chaleur spécifique (liquide)	2,22 kJ/kg.°C
Chaleur latente	192,6 kJ/kg
Conductivité thermique (solide)	1,05 W/m.°C
Conductivité thermique (liquide)	0,58 W/m.°C
Masse volumique (solide)	1710 kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique (liquide)	1530 kg/m <sup>3</sup>

Tableau 2 : Propriétés thermophysiques du matériau de construction sans MCP.

Conductivité thermique	0,65
Chaleur spécifique	925
Masse volumique	1200 kg/m <sup>3</sup>

Pour le mur:

$$(\rho c)_{mur} \frac{\partial T_{mur}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{mur} \frac{\partial T_{mur}}{\partial x} \right) + \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d \cdot \varepsilon} U (T_{mcp} - T_{mur}) \quad (1)$$

Où  $U$  est le coefficient de transfert global entre les microbilles et la matrice solide,  $T_{mur}$  la température de la matrice solide et  $T_{mcp}$  la température du MCP déterminée de la manière suivante :

Durant le stockage sensible :

$$(\rho c)_{mcp} \frac{\partial T_{mcp}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{mcp} \frac{\partial T_{mcp}}{\partial x} \right) + \frac{6}{d} U (T_{mur} - T_{mcp}) \quad (2)$$

Dans le cas du changement phase (cristallisation/fusion), on rajoute l'équation suivante :

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = \frac{6}{d} \frac{U}{\rho_{mcp} L_F} (T_{mur} - T_F) - \frac{k_{mcp}}{\rho_{mcp} L_F} \frac{\partial^2 T_{mcp}}{\partial x^2} \quad (3)$$

Le coefficient  $\beta$  est la fraction liquide. Il prend la valeur 0 dans la zone solide et la valeur 1 dans la zone liquide.

Les conditions initiales et aux limites sont écrites selon :

$$T_{mur}(x,0) = T_{mcp}(x,0) = T_{ini} \quad (4)$$

$$T_{mur}(0,t) = T_{mcp}(0,t) = T_p \quad (5)$$

Pour la température  $T_p$ , on choisit une variation linéaire du type :

$$T_{paroi} = \beta t + Cte \quad (6)$$

avec  $\beta$  la vitesse de refroidissement ( $\beta < 0$  dans le cas de la cristallisation) ou de réchauffement ( $\beta > 0$  dans le cas de la fusion). Dans le cadre de ce travail nous n'analyserons que la phase de déstockage (Fusion). La résolution numérique de ce système d'équations, permet d'obtenir en fonction du temps, le champ de la température du mur et du MCP ainsi que la fraction transformée dans le mur.

### 3. Résultats et discussions

Sur la **Fig.2** nous avons présenté la densité de flux entrant sur les deux facettes de l'enveloppe durant la phase de déstockage. Le matériau passe de 10°C à 40°C. Le réchauffement s'effectue par l'intermédiaire d'une rampe de variation de température d'une durée de 6 heures soit un gradient d'un peu moins d'un dixième de degré par minute. Lors du changement d'état, la courbe de flux présente une inflexion. C'est à partir de ce point d'inflexion que la température de changement d'état du MCP peut être déterminée.

Sur la **Fig.3** est représenté les flux (sur la facette gauche) obtenus par le modèle en fonction de la vitesse de réchauffement  $\beta$ . Ces flux présentent des pics dont la température et la largeur varient dans le même sens que la vitesse de réchauffement. La pente du pic de fusion reste la même dans les différents cas, alors que les abscisses des sommets des différents pics de fusion augmentent avec  $\beta$ . Les abscisses des différents sommets sont décalées par rapport à  $T_p$ , ces sommets correspondent au moment où la puissance mise en jeu par le changement de phase est la plus forte. Comme le montre les **Figs.4 et 5** la variation de la température au centre de l'enveloppe montre que plus la vitesse augmente, plus l'écart avec la température imposée  $T_p$  augmente.

En supposant les propriétés thermophysiques du matériau de construction inchangées, nous avons tracé sur la **Fig.6** le flux sur la facette gauche de l'enveloppe pour différentes valeurs de la porosité. Comme précédemment, la hauteur est la largeur des pics varient dans le même sens que  $\mathcal{E}$ . Mais dans ce cas, on remarque que la pente du pic de la fusion augmente en fonction de  $\mathcal{E}$ . Par contre les abscisses des sommets restent pratiquement inchangées. On peut donc conclure que la cinétique du changement de phase est les trois valeurs de la porosité. Sur les **Figs. 7 et 8** on peut noter que les gradients de températures augmentent avec la porosité.

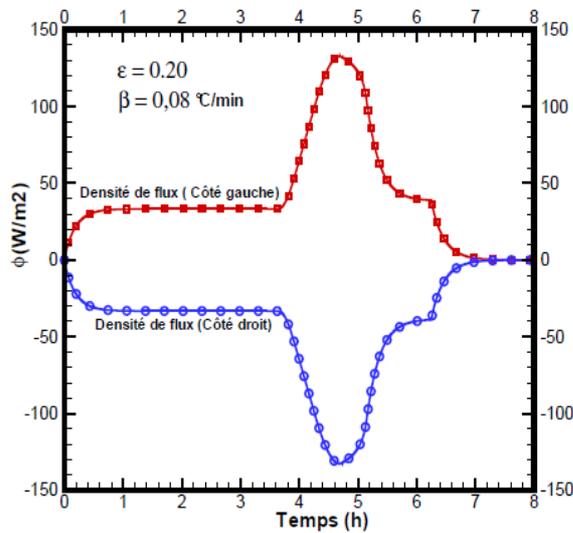


Figure 2 : Densité de flux sur les deux facettes de l'enveloppe.

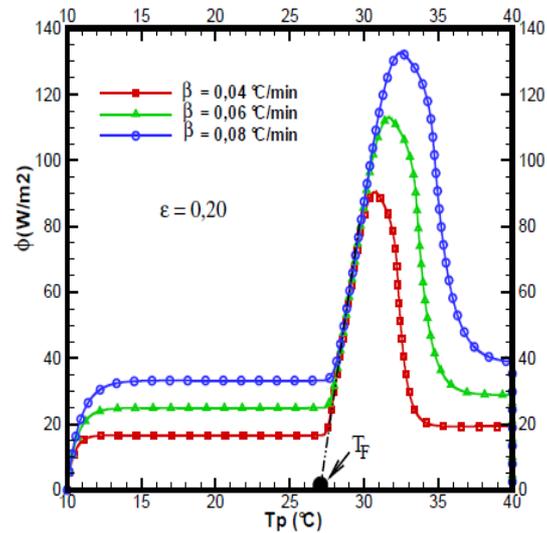


Figure 3 : Effet de la vitesse de réchauffement sur la densité de flux.

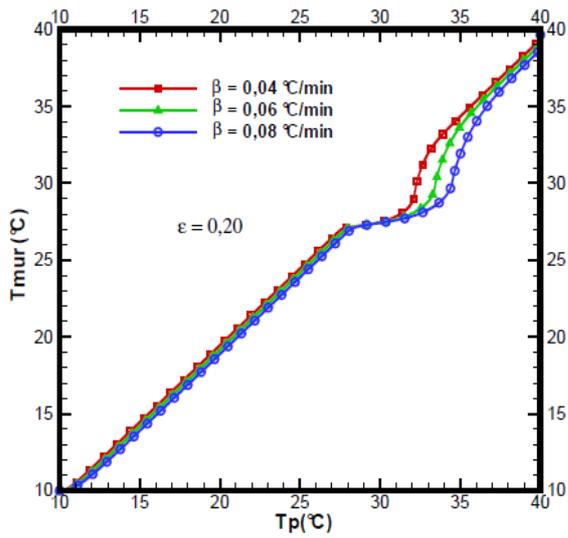


Figure 4 : Effet de la vitesse de réchauffement sur  $T_{mur}$  au milieu de l'enveloppe

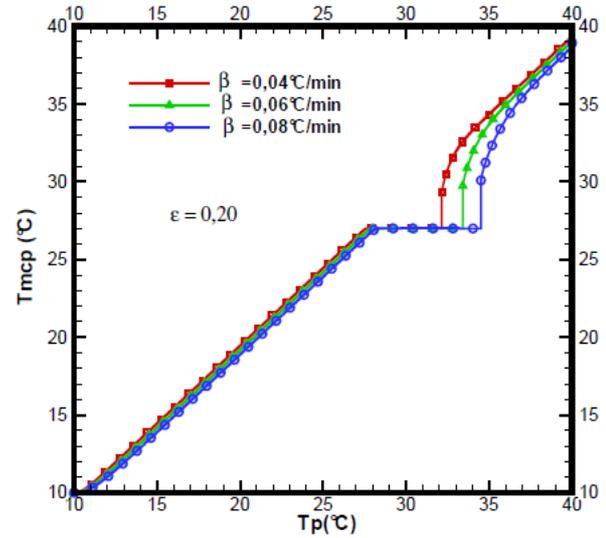


Figure 5 : Effet de la vitesse de réchauffement sur  $T_{mcp}$  au milieu de l'enveloppe

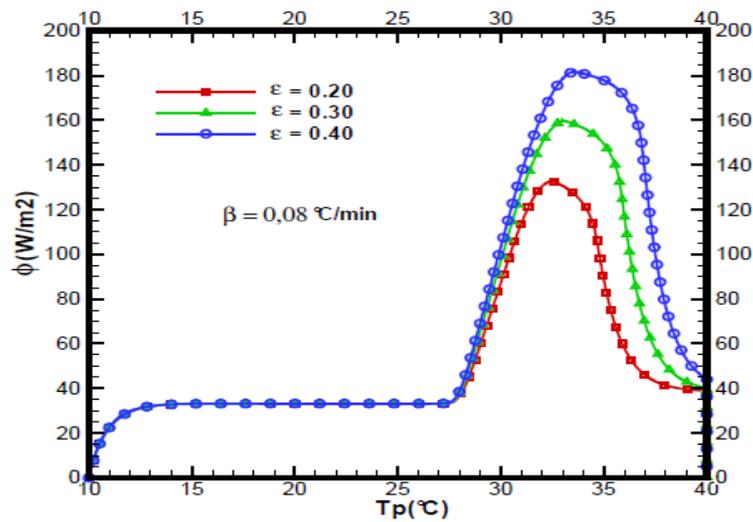


Figure 6 : Densité de flux pour différentes valeurs de porosité

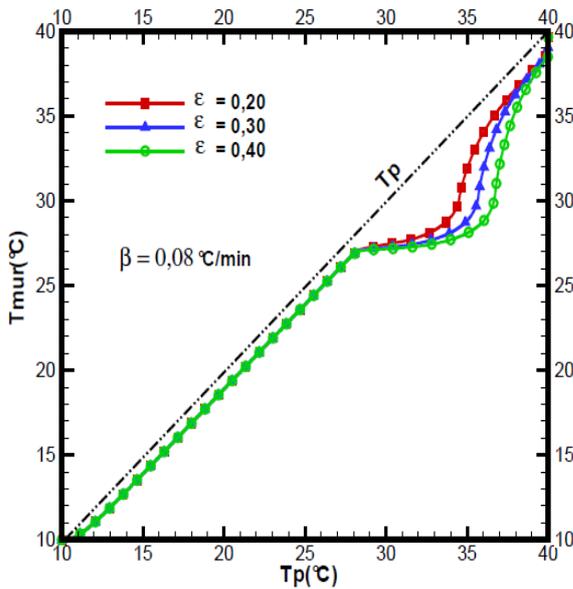


Figure 7 : Effet de la porosité sur  $T_{mur}$

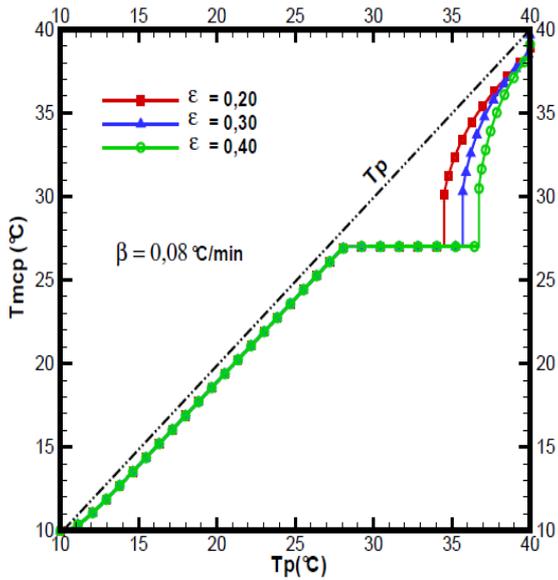


Figure 8 : Effet de la porosité sur  $T_{mcp}$

## 4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons proposé un modèle physique qui décrit les transferts thermiques au sein d'un mur contenant un matériau à changement de phase. Les résultats obtenus par le modèle physique ont permis d'étudier l'influence de différents paramètres sur le comportement du mur durant la phase de déstockage. Cette étude rend compte de résultats très récents. Il va de soi qu'une comparaison avec l'expérience reste le meilleur moyen de juger de la pertinence du modèle proposé.

### Nomenclature

$c$	chaleur spécifique, $J/(kg.K)$	$U$	coefficient de transfert convectif, $W/m.K$
$d$	diamètre de la microbille, $m$		
$k$	conductivité thermique, $W/m.K$		
$L_F$	chaleur latente du MCP, $J/kg$	<i>Symboles grecs</i>	
$T_F$	température du changement de phase, $K$	$\varepsilon$	porosité
		$\phi$	densité de flux, $W/m^2$
		$\rho$	masse volumique du fluide, $kg/m^3$

### Références

- [1] A. Khudair, M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conservation and Management*, 45(2004)263-275.
- [2] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, D. Quenard, Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material, *Energy and Buildings*, 38(2006)357-366.
- [3] Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D. Rousse, A. Joulin, A novel technique for experimental thermophysical characterization of phase change materials, *International Journal of Thermophysics*
- [4] A. Jamil, T. Kousksou, Y. Zeraouli Modélisation du Changement de Phase dans un Mélange de Paraffines : Application dans le bâtiment, SFT2010.
- [5] T. Kousksou, T. Elrhafiki, A. Arid, E. Schall, Y Zeraouli. Power, efficiency and irreversibility analysis of latent energy system. *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 22 (2008) 234-239.
- [6] T.Kousksou, A. Jamil, P. Bruel, Asymptotic Behavior of a Storage Unit Subject to Cyclic Melting and Solidification Processes, *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 24 24(2010)355-363.