

# Simulation numérique du comportement thermique d'un mur de brique intégrant des microcapsules de matériaux à changement de phase via la méthode enthalpique.

Zohir YOUNSI<sup>1, 2, \*</sup>, Hassane NAJI<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> FUPL, Hautes Etudes d'Ingénieur (HEI), LGCgE (EA 4515), 13 Rue de Toul, F-59000 Lille, France.

<sup>2</sup> Univ. Artois, Laboratoire Génie Civil & Geo-Environnement (LGCgE - EA 4515) Technoparc Futura, F-62400 Béthune, France.

<sup>3</sup> Université Lille Nord de France, LGCgE- EA 4515, Lille F-59000, France.

\* (auteur correspondant : [zohir.younsi@yncrea.fr](mailto:zohir.younsi@yncrea.fr))

**Résumé** - Ce travail expose les principaux résultats d'une étude numérique du comportement thermique d'un composant de mur intégrant des microcapsules de MCP. D'abord, nous présentons le modèle mathématique considéré qui est basé sur la méthode enthalpique et la solution numérique en utilisant la méthode des volumes finis. Ce modèle a été validé en comparant nos résultats numériques avec les données expérimentales disponibles dans la littérature. Une discussion approfondie de l'effet de l'incorporation des microcapsules de MCP dans les murs de maçonnerie en briques sur le comportement thermique et inertiel est présentée. Pour cela, une étude paramétrique a été réalisée pour étudier l'effet du pourcentage de MCP micro-encapsulé incorporé dans la paroi sur la réduction et le retard de la charge thermique à travers une telle paroi composite soumise à une température sinusoïdale. Cette étude pourrait servir de cadre pour la conception de murs composites incorporant des MCP micro-encapsulés pour des bâtiments passifs dans divers climats.

## Nomenclature

$c_p$	chaleur spécifique, J/kg/K
$f$	fraction liquide
$h$	enthalpie spécifique, J/m <sup>3</sup>
$H$	enthalpie totale, J/m <sup>3</sup>
$k$	conductivité thermique, W/m/K
$L$	chaleur latente de fusion, J/kg
MCP	matériau à changement de phase
$S$	terme source
$T$	température, K
$t$	Temps, s
$T_{init}$	température initiale, K
$T_a$	température de l'air, K
$T_f$	température de fusion, K
$T_w$	température du mur, K

## *Symboles grecs*

$\alpha$	diffusivité thermique, m <sup>2</sup> /s
$\theta$	vitesse de chauffage/refroidissement, °C/min
$\varphi$	densité de flux, W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	fraction liquide, adimensionnelle
$\rho$	densité du fluide, Kg/m <sup>3</sup>
$\Gamma$	Coefficient de diffusion
$\omega$	facteur de relaxation
$\tau$	période (s ou h)

## *Indices et exposants*

$f$	fusion
$init$	initiale
$l$	liquide
$s$	solide
$a$	air
$w$	mur

## 1. Introduction

En raison des changements climatiques, la gestion de l'énergie est devenue une priorité pour la plupart des autorités. L'axe principal d'économie d'énergie reste celui d'une meilleure maîtrise des consommations [1]. Le secteur du bâtiment présente un très fort potentiel puisque les besoins liés au chauffage/refroidissement représentent l'équivalent de l'énergie consommée dans les transports ou par la totalité de l'industrie. Un des leviers pour concevoir un bâtiment économe en énergie est de mieux considérer son enveloppe pour tirer le meilleur parti du gain solaire en hiver et assurer le confort en été. De ce fait, il semble important d'approfondir la recherche sur le refroidissement/chauffage passif et de développer des matériaux intelligents à faible impact environnemental [2-3].

L'intégration de matériaux à changement de phase (MCPs) pourrait être une solution intéressante à étudier car elle permet de stocker plus d'énergie pendant le processus de changement de phase. En effet, les MCPs sont capables de stocker et de libérer une grande quantité de chaleur latente grâce au processus de changement de phase [4]. L'avantage de la chaleur latente par rapport à la chaleur sensible est qu'il permet une capacité de stockage d'énergie thermique élevée, même avec un petit changement de température et de volume [5-6]. Il existe trois principaux groupes de MCPs basés sur les processus de changement de phase : solide/solide, solide/liquide et liquide/gaz [6]. Le processus le plus fréquent dans le bâtiment est le processus "solide-liquide". Dans ce cas, lorsque la température augmente et atteint celle de fusion, le MCP fond et absorbe le gain de chaleur. Ensuite, lorsque la température chute vers la température de solidification, le MCP libère l'énergie stockée [2].

De nombreuses études numériques et expérimentales ont été réalisées au cours de la dernière décennie [7-9], afin d'évaluer le potentiel de recours à l'intégration d'un MCP dans les murs et/ou les enveloppes de bâtiments et d'augmenter son inertie thermique pour améliorer sa performance énergétique. C'est pourquoi de nombreuses méthodes ont été expérimentalement conduites sur l'incorporation de la paraffine micro-encapsulée dans les bâtiments, tels que les MCP micro-encapsulés dans le mortier de ciment, les murs de béton ou les planchers de béton. Cependant, les études concernant les solutions constructives en briques, largement utilisées dans les pays méditerranéens, demeurent rares voire inexistantes.

Dans ce travail, la performance énergétique des enveloppes de bâtiments intégrant des MCPs micro-encapsulés a été étudiée et discutée. Le MCP micro-encapsulé dans le mortier de ciment est ajouté dans les murs de brique. Pour cela, nous avons mis au point un modèle numérique qui permet d'étudier le stockage d'énergie et le comportement thermique. Les calculs numériques sont basés sur la méthode enthalpique et le modèle numérique mis en œuvre a été vérifié par comparaison avec les résultats expérimentaux de [10]. Nous visons à démontrer comment un tel modèle peut permettre de reproduire fidèlement le comportement expérimental d'un mur incorporant un MCP. C'est une solution numérique très intéressante qui complète les méthodes numériques traditionnelles. Par la suite, le modèle a été utilisé pour une étude paramétrique afin d'étudier l'effet de différents paramètres tels que l'épaisseur et la fraction de masse du MCP micro-encapsulé sur la réduction et le retard de la charge thermique à travers une telle paroi composite soumise à un sommet sinusoïdal température.

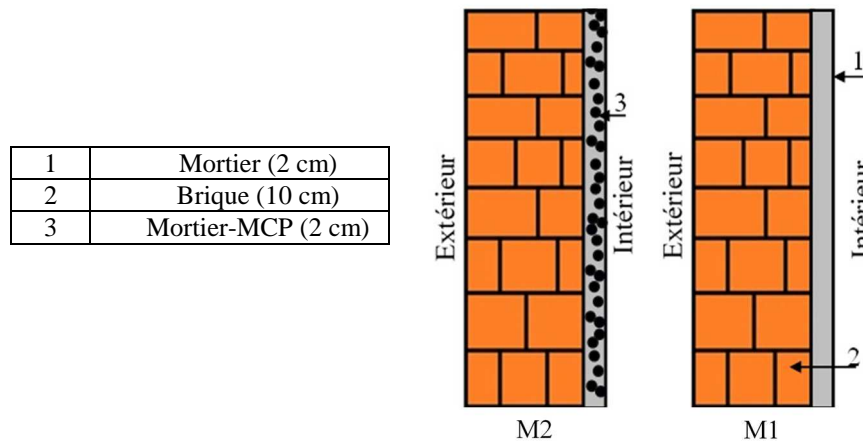
Le présent article est organisé comme suit : Le modèle physique étudié dans ce travail est présenté dans la section 2. La formulation mathématique du problème est introduite dans la section 3. Le modèle numérique est décrit dans la section 4. La validation du modèle est présentée dans la section 5. La section 6 présente et analyse les principaux résultats obtenus. Enfin, une conclusion est donnée en section 7 où nous signalons quelques points saillants de cette étude.

## 2. Description du modèle physique

Généralement l'enveloppe des bâtiments situés dans les pays méditerranéens est construite avec des briques creuses. Ces bâtiments sont confrontés à des situations d'inconfort d'été causées par une forte chaleur extérieure. Par conséquent, dans le présent travail, nous étudierons l'amélioration des caractéristiques thermiques de ce type de paroi typique par l'ajout sur sa face intérieure d'une couche de MCP micro-encapsulée dans du mortier de ciment. Les MCP micro-encapsulés utilisés sont les microcapsules Micronal® DS5001X fournies par BASF car elles ont une capacité de stockage de chaleur

latente élevée (environ 110 J/g) et un manque de fuite en phase liquide. La température de fusion de ce type de MCP micro-encapsulé est de 26 °C, proche de la température diurne moyenne de la zone méditerranéenne. Les MCPs étudiés ont été conçus pour des applications de refroidissement. Dans le cadre de cette étude, deux échantillons de parois différents sont étudiés : le premier est un mur de maçonnerie typique (sans MCP) et l'autre contient un MCP micro-encapsulé dans du mortier.

Le premier échantillon de paroi (M1) est composé d'une couche de mortier d'une épaisseur de 2 cm et de 10 cm de briques creuses. Le deuxième échantillon de paroi (M2) est similaire au premier, la spécificité de ce type de paroi est l'ajout d'une couche de mortier incorporant un MCP micro-encapsulé. La géométrie et la composition des échantillons de paroi sont représentées sur la figure 1. Les propriétés physiques de tous les matériaux utilisés dans cette étude sont résumées dans le tableau 1.



**Figure 1 :** Géométrie et composition des échantillons de paroi.

Matériaux	MCP	Mortier	Brique
Conductivité thermique solide (W/m.K)	0,2	0,65	0,77
Conductivité thermique liquide (W/m.K)	0,13	-	-
Capacité thermique solide (J/kg.K)	1700	925	835
Capacité thermique liquide (J/kg.K)	2153	-	-
Chaleur latente (kJ/kg)	130	-	-
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	995	2001	1976

**Tableau 1 :** Propriétés thermophysiques des matériaux.

### 3. Modèle mathématique

Afin d'écrire les équations régissant le problème physique à traiter, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses :

1. Le MCP est pur, homogène et isotrope.
2. Le transfert de chaleur à travers la paroi est unidimensionnel et est réalisé par conduction.
3. Toutes les couches du système de paroi sont homogènes et isotropes.
4. Les microcapsules sont homogènes et réparties uniformément à l'intérieur du mortier.
5. Les propriétés thermo-physiques sont constantes. Bien que différentes dans les phases liquide et solide, on suppose que les densités, les capacités thermiques et les conductivités thermiques restent constantes avec le temps et indépendantes de la température.
6. Les parois horizontales sont supposées adiabatiques.
7. Les résistances de contact sont négligeables.
8. La convection naturelle et le transfert de chaleur par rayonnement dans les matériaux sont ignorés.
9. Le changement de phase est isotherme.

Pour la couche de brique, l'équation de transfert de chaleur transitoire est donnée par l'équation (1).

$$\rho_{Br} c_{p,Br} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{Br} \nabla T) \quad (1)$$

Pour la couche composite MCP-Mortier, le modèle enthalpique a été utilisé pour traiter le processus de transfert de chaleur transitoire (au lieu de l'équation de conduction thermique transitoire) afin de tenir compte de l'effet de la chaleur latente du MCP. Ainsi, les équations gouvernantes sont les suivantes :

#### Mortier de ciment

$$(1 - \varepsilon) \left[ \frac{\partial H_i}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T) \right] \quad (2)$$

#### MCP

$$\varepsilon \left[ \frac{\partial H_i}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T) \right] \quad (3)$$

où  $\varepsilon$  la fraction volumique du MCP dans le mortier de ciment et  $H$  est l'enthalpie volumétrique totale (i.e. la somme des enthalpies sensible et latente).

$$H_i = h_i + \rho_{MCP} f L \quad (4)$$

$f$  étant la fraction volumique du liquide,  $\rho$  est la densité (kg/m<sup>3</sup>), et  $L$  est la chaleur latente du MCP (J/kg). L'enthalpie sensible  $h$  (J/m<sup>3</sup>) est définie comme suit :

$$h_i = \int_{T_{réf}}^T \rho_i c_{p,i} dT \quad (5)$$

où  $T_{réf}$  est la température de référence (K).

La fraction liquide est calculée via la relation :

$$f = \begin{cases} 1 & \text{si } T \geq T_f \text{ (liquide)} \\ 0 & \text{si } T < T_f \text{ (solide)} \end{cases} \quad (6)$$

où  $T_f$  est la température de fusion du MCP (K).

## 4. Procédure numérique

La conduction thermique transitoire unidimensionnelle ainsi que des conditions initiales ont été résolues par une méthode implicite de volume fini. Les équations (1-3) peuvent être réécrites sous la forme générale suivante [12].

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \varphi) + S \quad (7)$$

où  $\Gamma$  est le coefficient de diffusion et  $S$  le terme source associé à la variable  $\varphi$ . L'équation discrétisée est mise sous la forme de l'équation algébrique générale suivante :

$$A_p \varphi_p = \sum A_i \varphi_i + S_\varphi \quad (8)$$

où  $A_p$  est le coefficient de la variable  $\varphi$  au centre de la maille,  $A_i$  sont les coefficients de la variable  $\varphi$  au centre des mailles voisines et  $S_\varphi$  est un terme source.

L'équation (8) est résolue itérativement en utilisant l'algorithme TDMA [12] complété par une élimination directe et une substitution en arrière.

Dans la mise en œuvre numérique, la valeur de la fraction liquide est déterminée itérativement à partir de la solution courante du champ d'enthalpie à l'aide de l'expression suivante :

$$f_p^{k+1} = f_p^k + \omega A_p h_p / \rho L \quad (9)$$

où  $\omega$  est un facteur de sous-relaxation utile pour accélérer la convergence. Il convient de signaler qu'au cours des calculs, la correction (9) est appliquée à tous les points, ce qui impose une deuxième correction (10) pour les points qui se retrouvent avec une fraction liquide en dehors de l'intervalle  $[0,1]$ , à savoir :

$$f_p^{k+1} = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si } f_p^{k+1} > \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \text{si } f_p^{k+1} < \mathbf{0} \end{cases} \quad (10)$$

En appliquant ces deux corrections successivement après la résolution du système d'équations, on détermine la nouvelle distribution de la fraction liquide. On répète cette opération jusqu'à la satisfaction du critère de convergence considéré. Une description plus détaillée de cette méthode enthalpique est fournie dans la référence [10].

## 5. Résultats et discussion

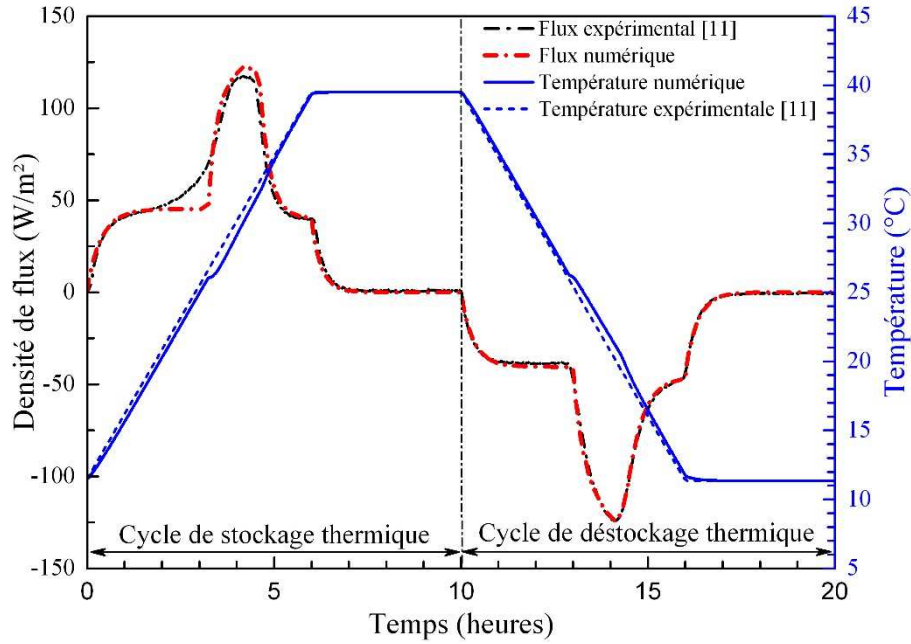
### 5.1. Validation numérique

Pour comparer nos résultats avec les données expérimentales proposées par [11], nous avons testé le mortier de ciment avec 20% de MCP. Les mesures de la campagne réalisée par [11] sont fournies dans le tableau 2 [11]. Le matériau de construction intégrant des microcapsules de MCP est placé dans un moule rectangulaire avec la dimension intérieure de  $25 \times 25 \times 4 \text{ cm}^3$  [11]. Il convient de rappeler que la température de fusion du MCP est de  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Chaque côté de l'échantillon est exposé à une température de surface linéaire dépendant du temps qui est comprise entre 11 et  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T(t) = \theta t + T_{init}$ ). La température initiale ( $T_{init}$ ) de l'échantillon est de  $11,4 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $\theta$  est la vitesse de chauffage ou de refroidissement. Pour plus de précisions, je suggère aux lecteurs d'aller consulter la référence [10].

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques des flux de chaleur et de l'évolution de température sur le côté gauche de l'échantillon pendant les processus de fusion et de solidification sont représentés sur la figure 2. Expérimentalement, la variation du flux de chaleur pendant le chauffage est moins rapide que pendant le refroidissement. De plus, la fusion se fait sur une plage de température contrairement à la solidification qui se fait à température constante. Ceci est dû principalement à l'historique de l'échantillon, à sa vitesse de chauffage et au fait qu'il est impur et non homogène. Une légère différence entre les courbes expérimentale et numérique peut être observée au début du processus de fusion. Cette différence peut être partiellement justifiée par le fait que, dans la simulation numérique, on a supposé que le MCP-Mortier est un matériau pur, homogène et que le changement de phase est supposé isotherme. Selon les résultats qui ont été établis, on peut affirmer que la solution obtenue avec la méthode actuelle fournit des résultats très satisfaisants pour le problème de conduction dans l'échantillon composite MCP-Mortier.

Matériaux	Mortier	MCP	
		Solide	Liquide
Conductivité thermique (W/m.K)	0,65	0,2	0,13
Capacité thermique (J/kg.K)	925	1700	2001
Chaleur latente (J/kg)	-	16674	-
Densité ( $\text{kg/m}^3$ )	1400	995	-

**Tableau 2 :** Propriétés thermophysiques des matériaux [11].



**Figure 2** : Flux de chaleur numérique et expérimental pendant les processus de chauffage et de refroidissement de la face avant de l'échantillon.

## 5.2. Effet de la quantité de matériaux à changement de phase micro-encapsulés

Un des facteurs importants qui peut affecter l'efficacité thermique du bâtiment est la quantité de MCP micro-encapsulée intégrée dans l'enveloppe. L'effet de la quantité de microcapsules de MCP présente dans la couche de mortier (mur M2) est étudié. L'objectif visé ici est d'optimiser la quantité de MCP dans le mortier. La détermination de la quantité optimale de microcapsules de MCP est souhaitable pour maintenir la performance du mur de brique composite.

La simulation choisie dans cette étude consiste à imposer une variation sinusoïdale de la température extérieure représentant la variation quotidienne de la température ambiante en été (Éq. (11)).

$$T_{a,ext} = 28 + 12 \sin(2\pi t / \tau) \quad (11)$$

où  $t$  est le temps et  $\tau$  étant la période (24h).

La température de l'air intérieur a été maintenue à température constante  $T_{a,int} = 23^\circ\text{C}$ . Initialement, le milieu est dans un état solide à  $T_{init} = 23^\circ\text{C}$ . La simulation a été poursuivie jusqu'à ce qu'une condition périodique soit établie.

Pour les surfaces exposées à l'extérieur et à l'air intérieur, les conditions limites en termes de flux de chaleur sont :

$$\varphi_{ext} = h_{ext} (T_{a,ext} - T_{w,ext}) = -\lambda_t \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (12)$$

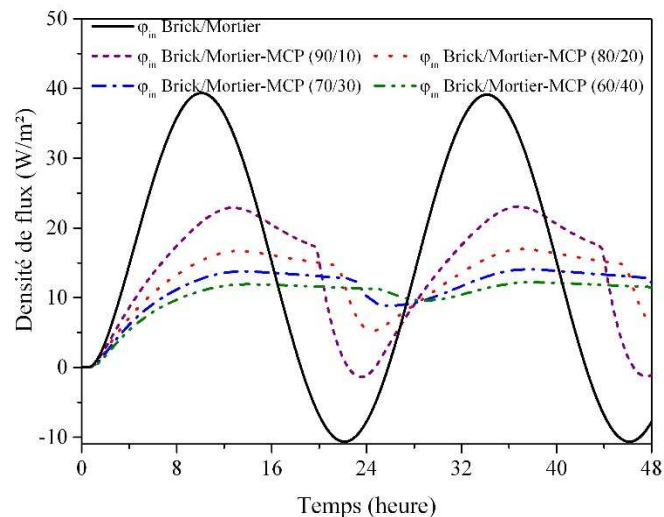
$$\varphi_{int} = h_{int} (T_{w,int} - T_{a,int}) = -\lambda_t \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} \quad (13)$$

$\varphi_{ext}$  et  $\varphi_{int}$  sont les flux de chaleur dans la surface de la paroi intérieure et extérieure de la paroi respectivement.  $h_{ext}$  ( $= 19 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) et  $h_{int}$  ( $= 8.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) sont respectivement les coefficients de transfert de chaleur par convection extérieure et intérieure.

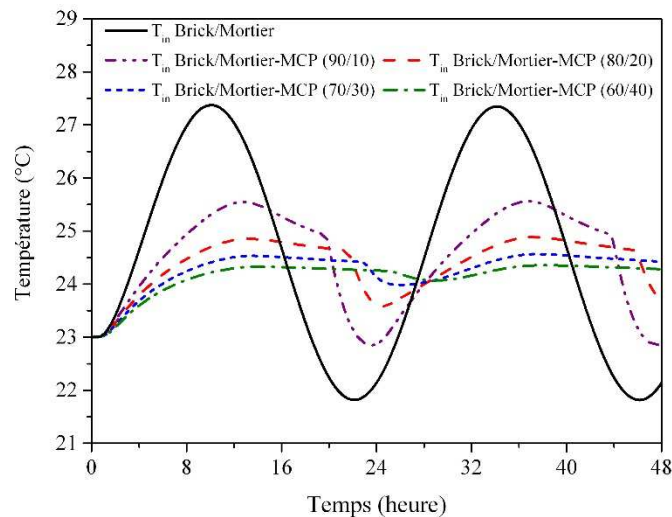
Les figures 3 et 4 représentent le flux de chaleur et la température à la surface intérieure pour les deux cas de murs examinés (M1 sans MCP, M2 avec MCP) pour différents pourcentages de MCP. Nous constatons que l'ajout d'une couche de mortier-MCP à la brique permet de réduire le flux thermique maximal, d'amortir les pics de température et d'améliorer le déphasage de temps de ces pics. Pour 10% de

MCP ajoutés, le flux thermique maximal a été réduit de 50% et la température maximale sur la face du mur intérieur de 2,5 °C. On constate que, plus le pourcentage de MCP présent dans la couche composite mortier-MCP augmente, plus on réduit le flux thermique maximal et la température maximale. Le transfert de chaleur total à la surface intérieure est le gain de chaleur qui devrait être enlevé par le système CVC.

Notez que le mur de brique composite avec 30% de MCP a le même comportement que celui avec 40%, et ont presque les mêmes valeurs maximale et minimale. Ainsi, en augmentant la fraction de masse MCP, la quantité de chaleur stockée dans le panneau mural augmente. Ainsi, la transmission de chaleur à l'atmosphère intérieure est réduite.



**Figure 3 :** Variation du flux de chaleur à la surface interne par rapport au temps pour divers composites Brique / Mortier-MCP (90/10), (80/20), (70/30) et (60/40).



**Figure 4 :** Variation de la température de surface interne en fonction du temps pour divers composites Brique / Mortier-MCP (90/10), (80/20), (70/30) et (60/40).

## 6. Conclusion

Dans cet article, un travail numérique a été effectué pour étudier les performances thermiques d'un de brique intégrant des microcapsules de MCP.

Une formulation enthalpique a été utilisée pour analyser le stockage par chaleur latente du MCP27. La solution est obtenue en utilisant une méthode de volumes finis. Une telle approche a d'abord été validée en comparant nos résultats aux données expérimentales disponibles dans la littérature. Ensuite, nous avons étudié un des paramètres influençant la régulation de la température du bâtiment. Ce

paramètre n'est que le pourcentage de MCP incorporé dans la couche de mortier ajoutée sur la face intérieure de la brique.

A travers les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être :

- Le modèle d'enthalpie basé sur l'hypothèse d'un mélange binaire a été validé avec succès par des données expérimentales [11].
- L'amplitude des oscillations du flux thermique et de la température est grandement affectée par la quantité du MCP dans le composite. Ces grandeurs sont réduites avec l'augmentation de la fraction de masse MCP micro-encapsulée.

## Références

- [1] L. Hembade, N. Neithalath, S. Rajan, Understanding the energy implications of phase-change materials in concrete walls through finite-element analysis, *J. Energy Eng.* 140 (2014) 04013009.
- [2] M. Kheradmand, M. Azenha, J. Aguiar, J. Castro-Gomes, Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behavior of buildings, *Energy* 94 (2016) 250-261.
- [3] A.M. Khudhair, M.M. Farid, A review on energy conservation in building application with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Convers. Manag.* 45 (2004) 263-275.
- [4] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: a state-of-the-art review, *Energy Build.* 42 (2010) 1361-1368.
- [5] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy Build.* 59 (2013) 82-103.
- [6] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs), in building applications, *Applied Energy* 92 (2012) 593-605.
- [7] N. Soares, J.J. Costab, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy Build.* 59 (2013) 82-103.
- [8] S. Cunha, J. Aguiar, F. Pacheco-Torgal, Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 89-101.
- [9] M. Lachheb, Z. Younsi, H. Naji, M. Karkri, S. Ben Nasrallah, Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation, *Appl. Therm. Eng.* 111 (2017) 49-59.
- [10] Z. Younsi, H. Naji, M. Lachheb, Numerical investigation of transient thermal behavior of a wall incorporating a phase change material via a hybrid scheme, *Int. Comm. Heat Mass transfer* 78 (2017) 200-206.
- [11] 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, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 171-180.
- [12] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow. By Hemisphere Publishing Corporation 1980.