

Utilisation des matériaux à changement de phase pour le rafraîchissement et l'amélioration de la qualité de l'air dans le bâtiment

Nadia MARTAJ^{1,2*}, Rachid BENNACER³, Mohamed ELOMARI⁴, Mohamed EL GANAOU⁵

¹ EPF-Ecole d'Ingénieurs, 21 boulevard Berthelot, 34000 Montpellier;

² IES, UMR5214, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France;

³ LMT CNRS UMR 8535, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France ;

⁴ Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc;

⁵ Université de Lorraine, Laboratoire Lermab, IUT Henri Poincaré de Longwy, 186 rue de Lorraine, 54400 Longwy - Cosnes et Romain, France ;

* (auteur correspondant : nadia.martaj@epf.fr)

Résumé –Plusieurs systèmes utilisés pour le contrôle climatique des locaux sont assurés par ventilation forcée de l'air ambiant. Les inconvénients de tels systèmes sont le bruit, une puissance limitée et une mauvaise qualité de l'air, etc. Par ailleurs, les performances et les durées de vie des composants de tels systèmes sont fortement liées à l'homogénéité des températures et donc à l'efficacité du système de rafraîchissement. Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons effectuer une étude sur l'efficacité du rafraîchissement des locaux par l'incorporation des matériaux à changement de phase (PCM) au sein des parois externes. La spécificité du nouveau système est l'intra-ventilation de la paroi par des cannelures ventilées (tubes de ventilation). Le but est de comprendre, quantifier et contrôler la capacité de ce matériau à stocker, restituer l'énergie afin de maintenir la température intérieure du bâtiment en deçà de la température d'inconfort. Dans notre application, nous avons utilisé un parpaing contenant le gel qui sert de PCM parcouru par des tubes de ventilation en PVC. L'objectif est la modélisation thermique du parpaing afin d'améliorer sa capacité de stockage/déstockage de l'énergie. Différents modèles numériques ont été élaborés à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Une étude expérimentale de l'effet du stockage/déstockage des parpaings contenant du PCM avec des tubes de ventilation a été réalisée dont le but est de voir l'effet de la fermeture et l'ouverture des tubes sur l'augmentation de l'inertie du parpaing.

Nomenclature

T	température, [K]
t	temps, [s]
C_p	chaleur spécifique à $p=cte$, [J/kg K]
L	chaleur latente, [J]
θ	fraction volumique du MPC solide, [-]
u, v	vitesses (selon x et y), [m/s]
Q	flux solaire, [W/m ²]

Indices

i	intérieur
e	extérieur
s	solide
sol	solaire
l	liquide
PCM	matériau à changement de phase

Symboles grecs

α	coefficient de température en résistance (CTR), [K ⁻¹]
λ	conductivité thermique, [W/m.K]
ρ	masse volumique, [Kg/m ³]

1. Introduction

La limitation des besoins en climatisation/chauffage, dans le secteur du bâtiment, est devenue un impact primordial. En effet, ce dernier consomme une énergie importante en chauffage et climatisation. Ceci est dû partiellement au changement climatique. Un des moyens qui a fait l'objet de plusieurs études, pour y remédier, est l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM). Ces derniers, incorporés dans l'enveloppe du bâtiment, permettent d'accroître son inertie thermique et ce, grâce à leur chaleur latente qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés, ces dernières années, sur l'utilisation de PCM dans la climatisation et le chauffage des bâtiments dont les résultats montrent que les pics de température dans une pièce équipée de PCM peuvent être réduits de 3 à 4°C, ainsi la consommation de l'énergie liée à la climatisation baisse de 30 %, [1]. L'incorporation des PCM, dans les différents éléments de construction, se fait par différentes manières dont on cite l'incorporation directe du PCM, l'imprégnation du matériau de construction, l'incorporation de capsules remplies de PCM dans les éléments de construction, etc.

Les temps de stockage et déstockage, à cause de leur asymétrie, posent de vraies limitations [2-7]. Pour extraire plus de puissance, il faut augmenter la surface d'échange car les différences de températures sont bornées. Pour les pays méditerranéens les températures, pendant la saison chaude, oscillent de façon non symétrique autour d'une température moyenne agréable. Pour contrôler le couplage ainsi que les temps de réponse, nous avons incorporé un gel-PCM dans un élément constructif "parpaing" muni de tubes de ventilation. Une étude à la fois numérique et expérimentale a été réalisée. Des modèles 2-D ont été développés dans les cas du parpaing avec PCM et avec, en plus, une lame d'air ventilées. Le but étant d'analyser l'effet de l'intra-ventilation sur la dynamique thermique de ce système.

Le travail préliminaire expérimental, est nécessaire afin de déterminer et vérifier les propriétés des matériaux et les couplages afin d'alimenter et compléter le modèle et la procédure de calcul numérique. L'objectif lointain est de disposer d'un modèle fiable de composant mûr permettant de simuler le comportement d'une enveloppe avec des tubes de ventilation à débit contrôlé par une gestion thermique du bâtiment (GTB-contrôle-commande).

Nous présentons en premier le modèle et la simulation numérique, de la paroi multicouches incluant le PCM. Cette modélisation est une simplification du cas réel car essentiellement bidimensionnel. Ceci permettra d'analyser la dynamique du chargement et du déchargement thermique ainsi que le suivi des températures aux frontières des parois du bâtiment.

La seconde partie expérimentale décrira la géométrie du produit visé et une campagne expérimentale permettra d'identifier les similitudes avec la modélisation numérique et les améliorations possibles comme il sera indiqué en conclusion.

2. Description des modèles de simulation

Pour étudier le comportement du système, une modélisation bidimensionnelle (2D), utilisant un code commercial 'Comsol Multiphysics', a été développée. L'équation de conservation d'énergie locale mise en jeu, au point $M_{(x,y)}$, est la suivante:

$$(\rho C_p)_M \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial (\lambda_M \partial T / \partial x)}{\partial x} + \frac{\partial (\lambda_M \partial T / \partial y)}{\partial y} \right) \quad (1)$$

Les propriétés thermophysiques ρ_M , $(C_p)_M$, λ_M respectivement, masse volumique, capacité calorifique et conductivité thermique sont fonction des matériaux constituant le domaine au point M (position (x, y)). Pour les matériaux à changement de phase une propriété apparente est utilisée afin d'inclure les propriétés de la phase liquide et solide ainsi que la chaleur latente. Les expressions décrivant les propriétés thermo-physiques du PCM sont :

$$\lambda_{MCP} = \theta\lambda_s + (1-\theta)\lambda_l, \quad \rho_{MCP} = \theta\rho_s + (1-\theta)\rho_l$$

$$Cp_{MCP_sensible} = \frac{\theta(\rho Cp)_s + (1-\theta)(\rho Cp)_L}{\rho_{MCP}}, \quad Cp_{MCP} = Cp_{MCP_sensible} + L \frac{d\theta}{dT}$$

avec θ la fraction volumique de la phase solide du **PCM** solide :

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{si } T < T_s \\ \frac{T-T_l}{T_s-T_l} & \text{si } T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & \text{si } T > T_l \end{cases} \quad (2)$$

Le domaine considéré (Fig. 1) représente le cas d'un parpaing contenant du **PCM** et partitionné par un tube vertical ventilé permettant d'accroître la surface d'échange et contrôler le temps de charge et de décharge en énergie par l'intensité de ventilation. Cette conduite assurera l'écoulement d'air à vitesse et température d'entrée de l'air contrôlé. Il est à signaler que cette modélisation permettra de dégager des tendances car elle représente davantage une lame d'air continue au lieu de canaux tubulaires.

Les conditions aux limites sont de types fourrier sur les deux faces. De plus la face externe est également soumise à l'ensoleillement.

$$\text{Coté interne } \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=e} = h_i (T - T_{int})$$

$$\text{Coté externe } \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_e (T - T_{ext}) + Q_{Sol}(t)$$

Le suivi des températures est assuré par des sondes placées sur les deux surfaces externes du parpaing (A et C) et à la sortie du canal ventilé (B) comme représenté sur la figure 1.

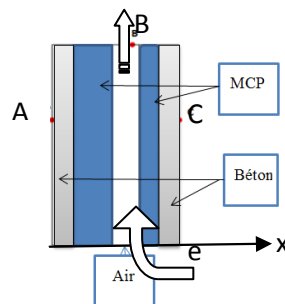


Figure 1: Schéma explicatif du domaine

Le comportement thermique de la paroi verticale considérée est simulé durant l'été avec une température interne de confort constante (25°C, assuré par une pompe à chaleur réversible) et une variation diurne de la température externe entre 20 et 39 °C (293 et 312K). Cette paroi verticale est soumise au flux solaire simulé sur une journée par :

$$Q_{sol}(t) = \begin{cases} 29.43 \times 10^{-3} t - 6.6810 \times 10^{-7} t^2, & \text{si } t < 43200s \\ 0 & \text{si } t \geq 43200s \end{cases}$$

Les coefficients convectifs, interne et externe, sont supposés constants et valent respectivement $h_c=17W/m^2$ et $h_i=8W/m^2$.

Différents essais de ventilation forcée nous ont permis d'analyser le changement de la dynamique thermique de cette paroi ainsi que le niveau de stockage/déstockage sur le matériau à changement de phase.

Pour des vitesses de ventilation de 2 et 6 cm/s, nous avons tracé l'évolution des températures aux points A, B et C (illustrés sur la figure 2).

On remarque que la température de la surface intérieure évolue assez vite vers un pallier et qu'elle demeure constante. Ce pallier est conforme à la condition aux limites que l'on s'impose. Pour ces vitesses, l'énergie déstockée est moins faible que celle stockée. En changeant la vitesse de déstockage et en fixant la vitesse du flux d'air, au moment du stockage, à 2 cm/s, on a remarqué que la température de la face intérieure varie au moment de déstockage et reste constante lors du stockage Figure 3.

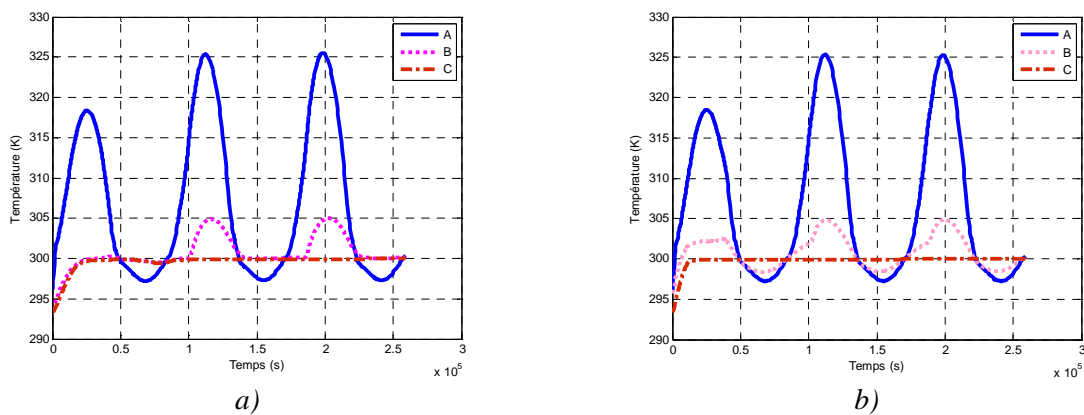


Figure 2 : Evolution de la température pour différentes vitesses de ventilation: a) 2 cm/s, et b) 6 cm/s

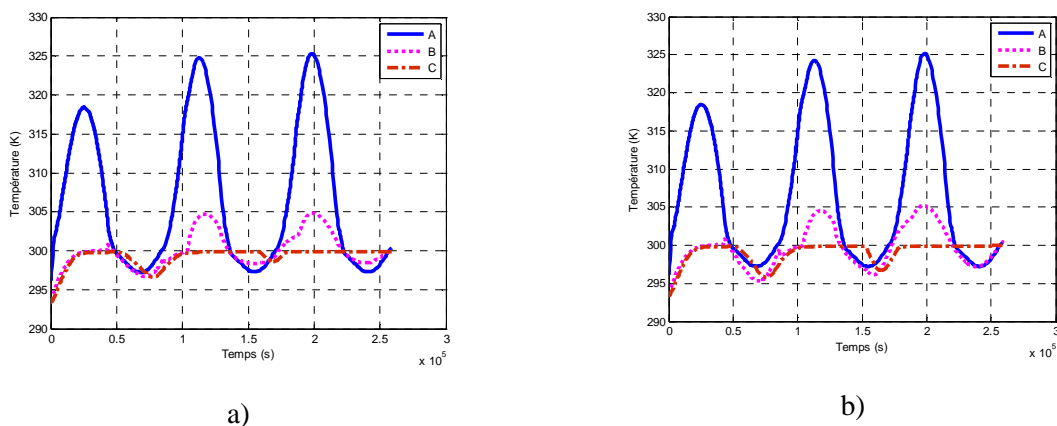


Figure 3: Evolution de la température pour une vitesse de 2 cm/s dans le stockage et différentes vitesses dans le déstockage a) 6 cm/s et b) 10 cm/s

L'emplacement des tubes de ventilation joue aussi un rôle important dans le transfert de chaleur comme on le remarque dans la figure 4 pour un emplacement de tubes de 4,45 cm et 5,5 cm de la face chauffée et ce pour une vitesse de l'air de 2 cm/s.

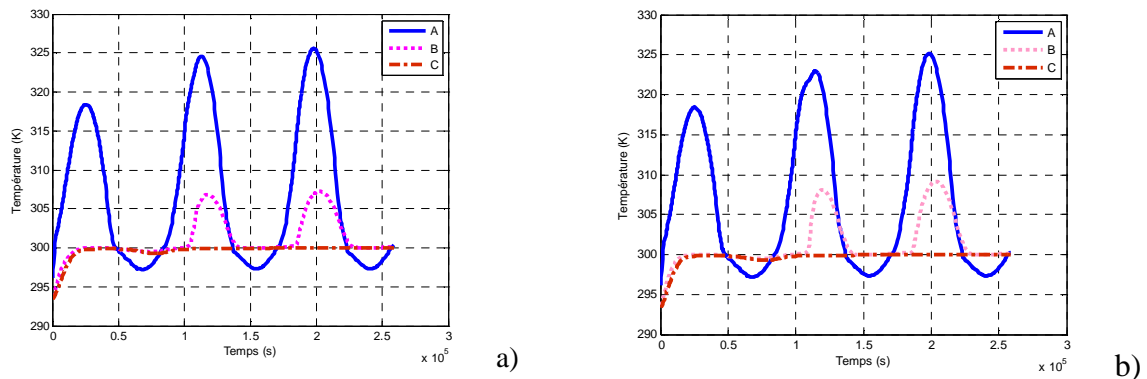


Figure 4 : Evolution de la température pour un tube situé à a) 4,45 cm, b) 5,5 cm

3. Discussion des résultats

Pour comparer les différents modèles utilisés (sans PCM, avec PCM, avec et sans tubes de ventilation), on a calculé les besoins énergétiques pour le rafraîchissement de l'air pour un débit de renouvellement d'air de 47.1 mg/s (Figure 5). Les résultats obtenus montrent que pour un parpaing, avec et sans PCM, on aura besoin de chauffer l'air pendant une durée de 21600s. La durée de la climatisation est de 64800s, afin de ramener l'air intérieur à la température de consigne de 25°C. Par contre, pour un parpaing avec tubes, l'air utilisé pour le chauffage est celui de la sortie des tubes. Pour la climatisation, l'énergie qui sera utilisée est plus faible dans le cas d'utilisation des tubes pour la ventilation, car la température sur la face intérieure reste constante est vaut 27 °C, cette valeur de température qui étant proche de la température de confort.

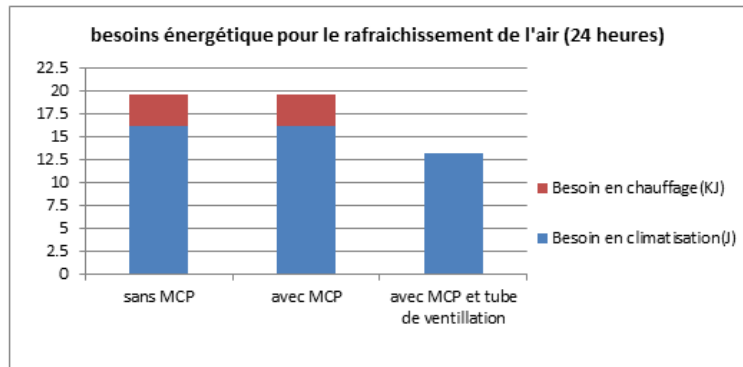


Figure 5 : Besoins énergétiques pour le rafraîchissement de l'air (24heures)

Afin d'avoir une estimation de la quantité d'énergie optimisée, on a calculé les besoins énergétiques pour faire disparaître le flux de chaleur qui rentre de la face intérieure (température à la surface et supérieure à 25°C pour tous les modèles). Ainsi on gagne à peu près 110kJ lors de l'utilisation de la paraffine au lieu de l'air, et l'ajout des tubes de ventilation permet d'optimiser 7 kJ/jour par rapport à un parpaing avec PCM sans tubes.

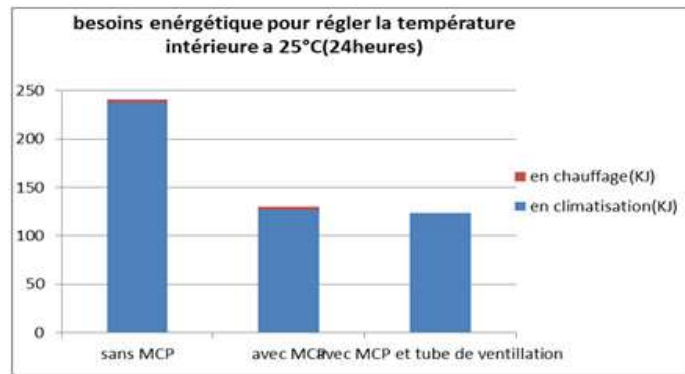


Figure 6 : Besoins énergétiques pour régler la température intérieure à 25°C (24heures)

L'incorporation de la paraffine dans le parpaing permet de diminuer l'énergie utilisée, (Figure 6); en effet, notre paraffine peut stocker une grande quantité d'énergie lors du changement de phase pour une température donnée. L'énergie stockée est restituée au moment du déstockage.

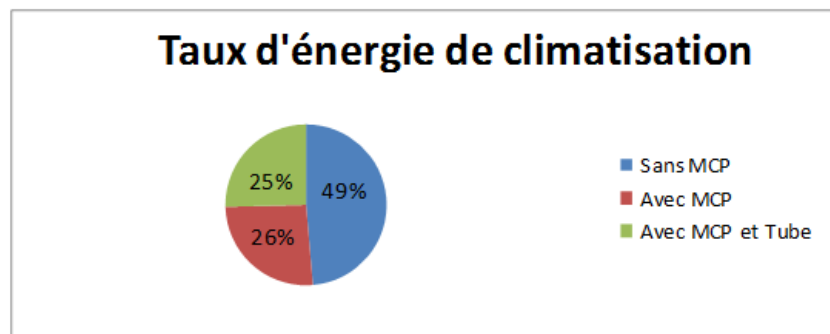


Figure 7 : Répartition d'énergie de climatisation

La figure 7 représente la répartition de l'énergie de climatisation. A peu près, 50% sera utilisée pour le parpaing sans PCM. En revanche, l'utilisation du PCM avec et sans tubes de ventilation, permet de réduire l'énergie utilisée à 25%. Avec les tubes de ventilation, cette réduction remonte à 26%.

4. Résultats expérimentaux

Des tests ont été réalisés pour calculer l'inertie thermique du parpaing avec PCM et tubes de ventilation. Pour ce faire, nous avons utilisé un parpaing contenant trois cavités dont les caractéristiques géométriques sont les suivantes :

Longueur : 13 cm, largeur : 6.5 cm, hauteur : 16 cm, et volume : 728 cm³.

Le parpaing est équipé de 8 thermocouples ; 3 sur la face chauffée, 3 incorporés dans le gel (PCM) autour du tube de ventilation et 2 sur la surface non chauffée pour simuler l'intérieur d'un bâtiment. Dans cette étude expérimentale, on s'est intéressé à l'amélioration de la capacité de stockage de ce type de boc "parpaing" afin de rafraichir l'air à l'intérieur du bâtiment.

Les figures suivantes représentent le banc expérimental.

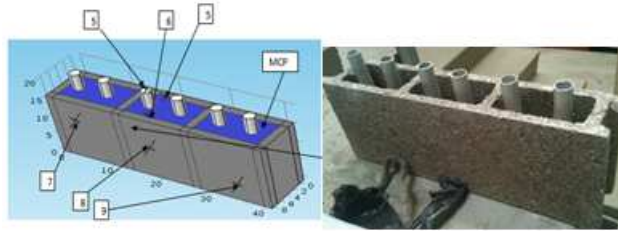


Figure 8 : Paroi expérimentale modèle et spécimen.

Pour générer de la chaleur, une résistante chauffante a été placée sur l'une des faces du parpaing après avoir installé 3 thermocouples dans différentes zones du parpaing et ce pour mesurer la température moyenne de la surface chauffée.

Un système d'isolation en polystyrène a été mis en place sur les 4 faces de parpaing (supérieure, inférieure et les 2 cotés) afin que le transfert de chaleur soit unidirectionnel.

Deux cas ont été considérés ; une convection naturelle (tubes ouverts) et sans convection (tubes fermés).

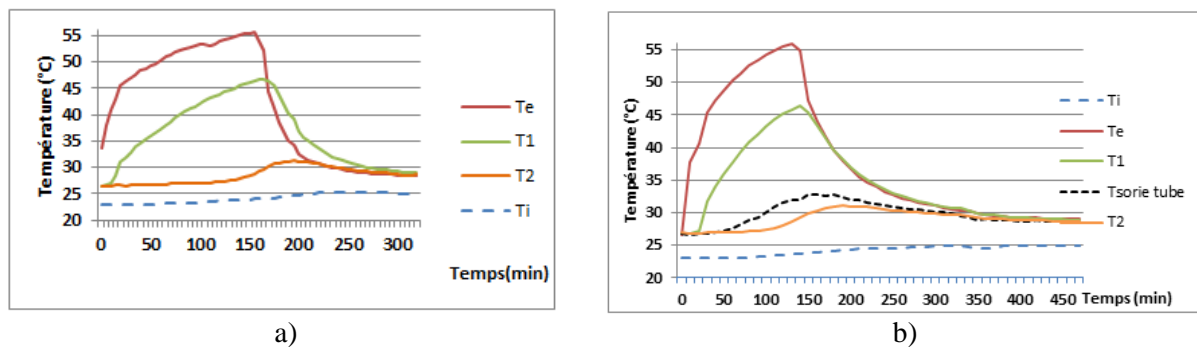


Figure 9 : a) Profil de température dans le cas des tubes fermés
b) Profil de température dans le cas des tubes ouverts

Les résultats obtenus pour les deux cas sont donnés sur la figure 9. On note une légère variation de la température de la façade intérieure qui se stabilise à 25 °C pour les deux cas. La détermination de la constante du temps (*tableau 1*) pour les différentes températures, dans le cas d'une convection naturelle et sans convection, nous a permis de constater que pour les tubes ouverts (aération naturelle), l'inertie de notre système augmente d'un facteur 2.

Tubes ouverts		Tubes fermés	
	$\tau=RC$		$\tau=RC$
	min		min
Te	50	Te	25
T1	85	T1	60
T2	150	T2	75
T_{sortie tube}	230	T_{sortie tube}	175

Tableau 1 : Constantes de temps des différentes températures

5. Conclusion

L'étude décrite dans cet article consiste à optimiser (augmenter) l'inertie de l'enveloppe externe d'un bâtiment afin de minimiser l'énergie de climatisation et de chauffage. La solution proposée consiste à utiliser la paraffine sous forme de gel dans un parpaing

contenant des tubes de ventilation. Des simulations numériques ont été réalisées sous Comsol Multiphysics sur 3 modèles (parpaing avec et sans PCM et tubes de ventilation). Les résultats obtenus ont mis en évidence l'utilité du PCM avec tubes de ventilation dans l'optimisation de l'énergie de climatisation/chauffage. Le problème rencontré dans cette simulation concerne la non symétrie entre les énergies, stockée et déstockée. Pour y remédier, nous proposons de traiter la partie déstockage séparément de la partie stockage, par exemple changer l'air dans les tubes par un autre fluide caloporteur capable d'absorber une grande partie de la chaleur emmagasinée dans les PCM. Concernant notre expérience, un dispositif expérimental a été réalisé pour tester le comportement thermique du parpaing contenant du PCM avec tubes de ventilation. Nous avons montré qu'en fermant les tubes, l'inertie du parpaing diminue. Aussi, les tubes ouverts peuvent être utilisés comme un échangeur de chaleur pour le rafraîchissement.

La partie expérimentale ayant donné des résultats sur l'inertie du mur avec PCM et ventilation, un contrôle en température des parois est en cours de développement.

Références

[1] Ahmad, M., « Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Énergétique de L'Enveloppe Légère des Bâtiments », Ph.D. Thesis, Université Joseph Fourier, Nov. 2004.

[2] Ahmad, M., thèse « nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux a changement de phase, super isolation, apports solaires », 2004, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1.

[3] D.W. Hawes, D. Feldman and D. Banu, « Energy conservation through latent heat thermal storage in building materials », Proc. 5th Jacques Cartier Conf., Montreal, 1992.

[4] H. Kadri, S. Aggoun, R. Bennacer, A. Bouvet « Stockage de l'énergie dans les matériaux de construction », Congrès de Mécanique, Marrakech, 2009.

[5] L.Royon,« Amélioration énergétique de dalles alvéolées par l'intégration d'un MCP stable mécaniquement »,XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie 2012.

[6] Zohir YOUNSSI,-Analyse numérique de la fusion des matériaux à changement de phase dans une enceinte chauffée par une paroi latérale-IXème colloque Interuniversitaire Franco-québécois-2009 Lille

[7] Serge Blaise EKOMY ANGO, thèse « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : Développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.