

Impact d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) sur le comportement thermique d'un plancher soumis à une sollicitation thermique estivale

Laurie KARIM¹, Laurent ROYON^{1,3*}, Arnaud GRADOS¹ et André BONTEMPS^{2,3}

¹Laboratoire des Systèmes Complexes, Université Denis Diderot, Paris

²Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Université de Grenoble, Grenoble

³Laboratoire des Energies de Demain, Université Denis Diderot, Paris

* (auteur correspondant : laurent.royon@univ-paris-diderot.fr)

Résumé - Pour limiter les besoins en climatisation nous proposons d'augmenter l'inertie des bâtiments en introduisant une paraffine stabilisée par une matrice polymère dans les cavités d'une dalle alvéolée pouvant être utilisée comme plancher/plafond. La présence du polymère a pour rôle d'éviter l'exsudation de la paraffine lors du changement de phase solide-liquide. Les propriétés thermophysiques du composite ont été mesurées et sa chaleur latente a été trouvée égale à 110 kJ/kg. Le comportement thermique de deux dalles a été étudié : l'une dont les cavités ont été remplies de composite, l'autre avec des cavités sans MCP. On montre qu'en imposant une variation de température sur une face, l'autre face présente une température inférieure. Si la température imposée est périodique l'amplitude des oscillations est moindre sur l'autre face démontrant ainsi la capacité de ce composant à produire une climatisation passive.

Nomenclature

C_p	capacité thermique massique $J.K^{-1}.kg^{-1}$
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
L	chaleur latente, $kJ.kg^{-1}$
m	masse, kg
S	surface de la dalle, m^2
t	temps, s
T	température, $K, ^\circ C$

Symboles grecs

φ densité de flux thermique, $W.m^{-2}$

Indices et exposants

i	entrant
inf	paroi inférieure
e	sortant
sup	paroi supérieure

1. Introduction

Limiter les besoins en climatisation dans les bâtiments à structure légère est devenu un véritable enjeu dans le contexte actuel du réchauffement climatique. Un des moyens proposés ici pour y remédier est l'incorporation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans la structure de paroi du bâtiment, permettant ainsi d'accroître son inertie thermique. L'utilisation de ce système passif pour la climatisation ou le chauffage des bâtiments a donné lieu à de nombreux travaux de recherche durant les dernières décennies et on peut trouver les principaux résultats dans plusieurs articles de revue [1-3].

L'incorporation de MCP dans les composants de construction a déjà été réalisée par différents moyens, soit :

- par incorporation directe ou par imprégnation du matériau de construction,
- par incorporation de capsules remplies de MCP dans les éléments de construction,
- par une fabrication de panneaux contenant des MCP pour remplacer les murs ou les cloisons classiques,

- par incorporation dans un échangeur pour améliorer les performances d'un système de climatisation.

Une des principales difficultés rencontrée est le conditionnement du matériau. En effet, l'étanchéité soit du composant soit du système de stockage du matériau doit être totale, en particulier lorsque le matériau est à l'état liquide.

Parmi les composants d'un bâtiment, celui qui a été le plus étudié est certainement le mur constituant la partie la plus importante de l'enveloppe. En particulier de nombreuses études ont concerné la réalisation d'une enveloppe légère puisque l'utilisation de MCP pourrait permettre d'en diminuer le volume. Par contre, l'incorporation de MCP dans les dalles (plancher ou plafond) a été relativement peu étudiée [4-7]. Ce travail s'inscrit dans cette thématique et a le double objectif d'évaluer les potentialités d'un MCP que l'on propose d'intégrer dans un plancher alvéolé.

2. Matériel et méthode

2.1. Composition de la paroi d'étude

La dalle alvéolée en mortier, présentée Fig.1, sera considérée comme la paroi de référence dans le cadre de cette étude. Sa surface est de 28x28 cm² et son épaisseur de 3,75cm correspondant à une dalle réelle mise à l'échelle 1/5ème. Elle comporte 8 alvéoles de 25 mm de diamètre remplies d'air, portant ainsi le taux de vide à 57,8%.

La paroi d'étude est une dalle alvéolée dans laquelle on introduit un matériau à changement de phase à l'intérieur des 8 alvéoles. Ce MCP se présente sous la forme d'un gel de paraffine de point de fusion voisin de 27°C. La composition du mélange paraffine-polymère est optimisée de manière à éliminer complètement l'exsudation possible de la paraffine lors du changement de phase solide-liquide. Les caractéristiques thermophysiques de ce matériau ainsi que celles du mortier sont présentées Tableau 1.



Figure 1. Photographies et schéma des dalles alvéolées

	<i>Masse volumique</i>	<i>Conductivité thermique</i>	<i>Capacité thermique massique</i>
	kg.m ⁻³	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
MCP T < 27 °C	850	0,28	2800
MCP T > 27 °C	780	0,18	2500
Mortier	2 127	1,00	918

Tableau 1 : Caractéristiques du MCP et du mortier utilisé

Les valeurs sont issues de mesures expérimentales obtenues respectivement par pesée, par la méthode de plaque chaude et par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Les erreurs

expérimentales sont de +/- 11% pour la conductivité thermique, de 8% pour la capacité thermique massique et de +/- 4% pour la masse volumique.

La chaleur latente et les températures de fusion et de cristallisation ont été obtenues par calorimétrie différentielle à balayage (DSC). La figure 2 présente un thermogramme de fusion du MCP pour différentes vitesses de montée en température. La température d'onset est de 26°C, la température au pic est de 27,6°C et la chaleur latente de fusion de 110 kJ/kg pour une vitesse de 0,125°C/min. Pour la phase de cristallisation, la température d'onset est de 27,1°C et la température au pic est de 25,8°C.

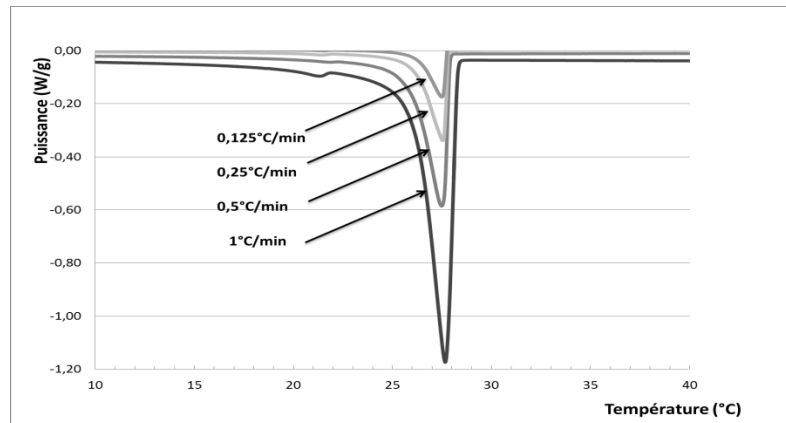


Figure 2 : Thermogramme de fusion du MCP pour 4 vitesses de montée en température

2.2. Dispositif expérimental

Chaque dalle a été soumise à des sollicitations thermiques au moyen du dispositif expérimental, présenté sur la figure 3. Il comprend un échangeur à eau associé à un bain thermostaté qui permet de fixer la température sur la face inférieure de la dalle. Le débit d'eau est suffisamment important pour que l'on n'observe pas de différence significative de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur. De la pâte thermique est mise entre la plaque de l'échangeur et la dalle afin d'assurer un bon contact et de bons transferts de chaleur. Afin d'éviter des fuites thermiques sur les bords de la dalle, une couche de mousse de polyuréthane de 8 cm d'épaisseur entoure complètement le pourtour de la dalle. Une peinture noire mate et d'émissivité mesurée à 0,9 recouvre la surface supérieure de la dalle.

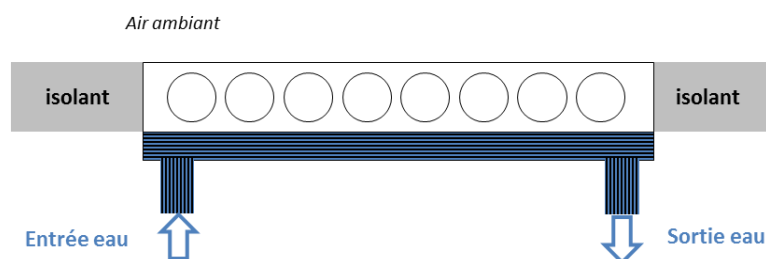


Figure 3 : Représentation schématique du dispositif expérimental

Deux sollicitations ont été choisies afin de caractériser le comportement thermique de la dalle et de connaître l'influence du MCP sur la dynamique des transferts :

- La première sollicitation est une montée linéaire en température de 20°C à 35 °C suivie d'un palier de température à 35°C. La vitesse de montée est fixée à 0,25 °C/

min. Ce protocole permet d'étudier la cinétique de stockage et les caractéristiques de la dalle dans un état stationnaire.

- La deuxième sollicitation consiste à imposer 7 cycles montée-descente en température sur la dalle. Chaque cycle a une durée de $24/5^2 = 0,96$ heures permettant ainsi de prendre en compte le facteur d'échelle.
- Pour chacune des sollicitations, la dalle est initialement à la température de 20°C . L'autre face de la dalle est en contact avec l'air ambiant de la salle de laboratoire régulée à 20°C .

Chaque face est équipée d'un fluxmètre et d'une sonde de température (thermocouples type T) afin d'évaluer le flux et les évolutions de températures sur les faces. Une caméra infra-rouge Flir est également utilisée pour contrôler l'homogénéité en température de la face de la dalle en contact avec l'air du laboratoire.

3. Comportement thermique de la dalle soumise à un échelon linéaire en température

Sur la face inférieure de la dalle on impose une montée linéaire en température de 20°C à 35°C pendant une heure (Vitesse de montée = $1,25^{\circ}\text{C/h}$) puis on maintient la température de la face inférieure à 35°C pendant 6 heures.

3.1. Etude de la phase instationnaire

La dalle est soumise sur sa face inférieure à une variation linéaire en température de 20°C à 35°C . La figure 4 présente la variation de la température des surfaces inférieure et supérieure des dalles, leur face supérieure étant en contact direct avec l'atmosphère de la salle du laboratoire à $T_{\text{ext}} \sim 20^{\circ}\text{C}$. Sur cette figure, la courbe en pointillés épais représente la température (imposée) T_{inf} de la face inférieure de chaque dalle, celle en pointillés fins la température de la face supérieure de la dalle sans MCP et celle en trait plein celle de la face supérieure de la dalle avec MCP. On peut observer que l'état stationnaire est atteint beaucoup plus tardivement lorsque la dalle est remplie de MCP, bien que paradoxalement le matériau que l'on a introduit soit 10 fois plus conducteur de la chaleur que l'air présent dans les alvéoles. Ce résultat s'explique par une forte accumulation de la chaleur au sein du MCP notamment lors de son changement de phase.

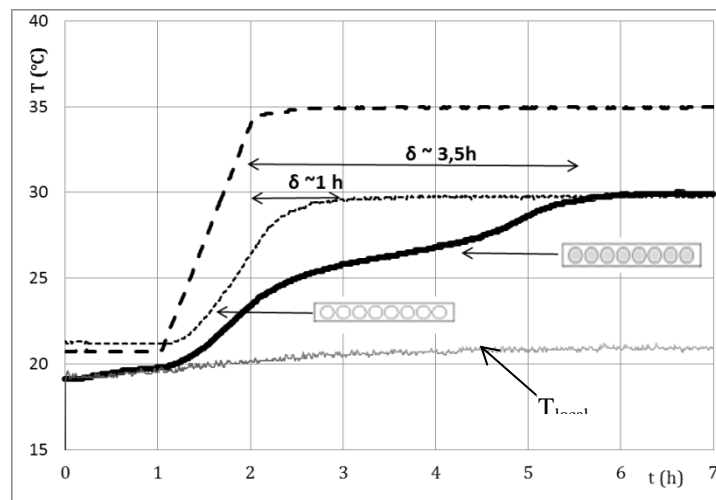


Figure 4 : Température aux interfaces de la dalle

Il est corroboré par le résultat observé sur la Figure 5, montrant la différence de densité de flux de chaleur entrant-sortant $\Delta\varphi = \varphi_{inf} - \varphi_{sup}$ en fonction du temps. En présence de MCP, cette différence est beaucoup plus importante que dans la dalle de référence pour autant l'écart de température ($T_{inf} - T_{sup}$) demeure plus élevé.

L'expression (1)

$$q(t) = \int_0^t (\varphi_{inf} - \varphi_{sup}) S dt \quad (1)$$

permet d'évaluer la quantité de chaleur $Q(t)$ stockée au cours de cette évolution. On trouve respectivement 172,3 kJ pour la dalle avec MCP et 48,8 kJ pour la dalle de référence au bout des 7 heures d'expérience. On vérifie, en prenant les valeurs présentées dans le Tableau 1, que la différence des quantités de chaleur de ces deux dalles correspond à la quantité de chaleur accumulée par le MCP:

$$q_{MCP} = m C_p \Delta T + m L = 24,6 + 99,4 = 124 \text{ kJ} \quad (2)$$

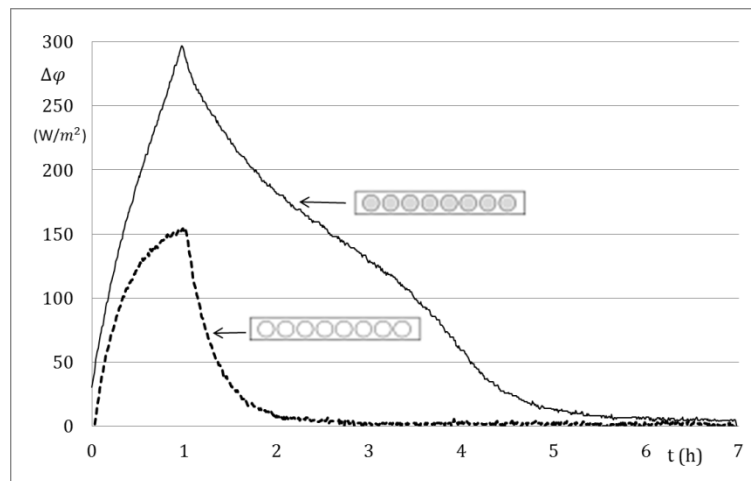


Figure 5 : Différence des densités de flux entrant et sortant en fonction du temps

3.2. Etude de la phase stationnaire

On remarque que l'équilibre thermique est atteint au bout d'environ 1 heure pour la dalle de référence et au bout de 3,5 h pour la dalle remplie de MCP, traduisant ainsi l'impact du changement de phase sur la cinétique du processus de diffusion. A l'équilibre thermique, l'écart de température ΔT entre les 2 faces de la dalle est de $5,3^\circ\text{C}$ pour la dalle de référence et de $5,8^\circ\text{C}$ pour la dalle avec du MCP. Compte-tenu de la valeur de la densité de flux à l'état stationnaire ($\varphi = 102 \text{ W/m}^2$), on peut évaluer la conductivité thermique effective k_{eff} de la dalle. L'analyse des données permet d'obtenir :

Pour la dalle de référence :

$$k_{eff} = 0,66 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Pour la dalle avec MCP (en phase liquide) :

$$k_{eff} = 0,71 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

En effectuant une expérience entre 20°C et 15°C, les caractéristiques de la dalle avec MCP en phase solide sont :

$$k_{eff} = 0,77 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Ces données expérimentales sont bien conformes à nos attentes. La dalle avec MCP est bien plus conductrice de la chaleur que la dalle de référence.

4. Comportement thermique de la dalle soumise à une sollicitation cyclique en température

La figure 6 présente les variations de température enregistrées sur les faces des dalles. La température imposée en face inférieure T_{inf} est une succession de 7 montées-descentes linéaire en température entre 22°C et 33°C de période $T = 58$ min. On peut observer que la température T_{sup} de la dalle de référence atteint dès le deuxième cycle un régime oscillant stabilisé alors que ce régime n'est atteint qu'au bout du 4^{ème} cycle pour la dalle avec MCP. De plus, l'amplitude des oscillations en température (présentée Tableau 2) est nettement plus faible en présence du MCP ; ces résultats montrent que le MCP d'une part participe à retarder les effets de montée en température lors de la vague de chaleur et d'autre part permet d'amortir fortement les oscillations en température à la surface de la dalle. Le confort thermique s'en trouve donc amélioré.

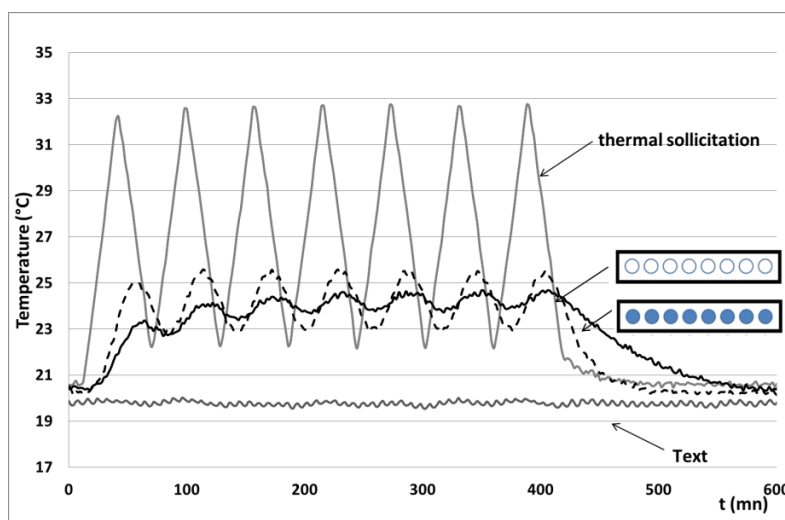


Figure 6 : Relevé des températures sur les faces supérieures des dalles

	Dalle de référence	Dalle avec MCP
T_{max} (°C)	$25,4 \pm 0,1$	$24,4 \pm 0,1$
T_{min} (°C)	$22,9 \pm 0,1$	$23,7 \pm 0,1$
ΔT (°C)	$2,6 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$

Tableau 2 : Températures de surface T_{sup}

La figure 7 présente la différence de densité de flux $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_e$ mesurée au niveau de la dalle avec MCP. Pour la dalle de référence une allure similaire est observée, la différence intervient principalement au niveau de l'amplitude qui est plus faible. Les oscillations des densités de flux sont de mêmes périodes que celle observées en température.

Si l'on effectue un bilan thermique en calculant l'énergie stockée par unité de surface $q(t)$ au moyen de l'expression:

$$q(t) = \int_0^t (\varphi_i - \varphi_e) dt$$

Il est alors possible de représenter l'énergie stockée par unité de surface dans la dalle en fonction du temps.

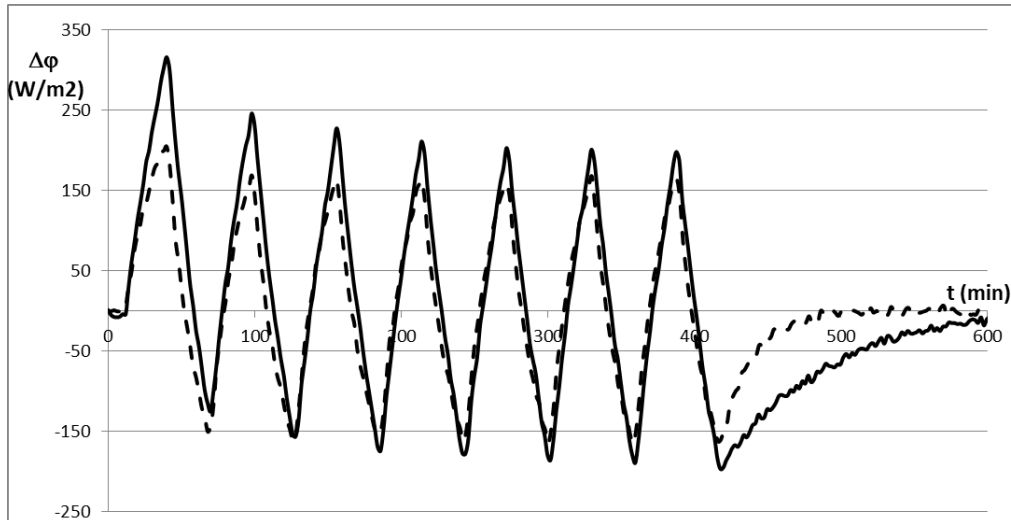


Figure 7 : Variation de la différence de densité de flux $\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_e$ en fonction du temps pour la dalle avec MCP (trait plein) et la dalle de référence (pointillé)

La figure 8 montre ainsi que la dalle contenant le MCP a pu stocker environ 14 kJ/m^2 alors que la dalle de référence n'a stocké que 5 kJ/m^2 . On peut donc admettre qu'environ 11 kJ/m^2 ont été stockés par le MCP ce qui représente environ 40% de l'énergie disponible sous forme latente au sein de la quantité de MCP présente dans la dalle. Ce résultat s'explique en partie par la faible conductivité thermique de la paraffine qui ne permet pas, compte tenu de la période des oscillations, de stocker davantage d'énergie.

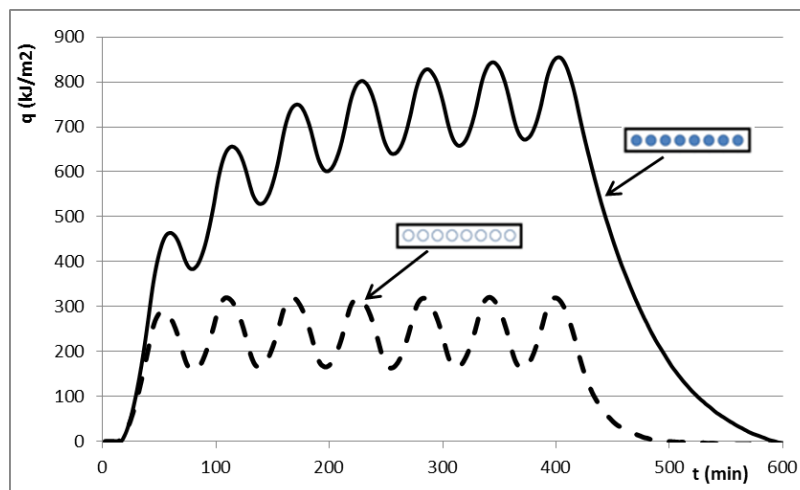


Figure 8 : Energie par unité de surface stockée dans la dalle en fonction du temps

Une optimisation sur la quantité de MCP à mettre en œuvre et sur la configuration optimale à adopter constitue la prochaine étape de ce projet.

5. Conclusion

Cette communication présente le volet expérimental d'une étude complète sur la mise au point d'un nouveau type de dalles pouvant être utilisées en plancher de façon industrielle. Ce dispositif devrait permettre une régulation passive de la température intérieure d'un bâtiment en augmentant artificiellement la capacité thermique équivalente des matériaux utilisés, par utilisation d'un MCP.

Un des problèmes pratiques cruciaux de l'utilisation de MCP est la possibilité d'exsudation et de fuites du produit, en particulier lorsque qu'il est à l'état liquide. La solution retenue est l'emploi d'un composite polymère – MCP et son incorporation dans les cavités d'une dalle en béton. Le MCP choisi est une paraffine dont la température de fusion est environ 27 °C. Les propriétés physiques du matériau composite ont été mesurées et sa chaleur latente trouvée égale à 110 kJ/kg.

Un dispositif expérimental a permis de simuler l'apport d'un flux de chaleur sur la face inférieure de la dalle pour étudier sa réponse thermique sur l'autre face. Les résultats mettent en évidence d'une part la diminution de la température sur la face supérieure de la dalle avec MCP comparée à celle de la dalle sans MCP, d'autre part l'atténuation de l'amplitude des oscillations de température lorsqu'un signal périodique est appliqué.

La modélisation en cours reproduit avec précision les résultats expérimentaux et sera un outil pour optimiser ce type de dalle.

Références

- [1] Khudair, A.M., Farid, M.M., A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 45 (2004), 263 – 275.
- [2] Tyagi, V.V., Buddhi, D., PCM thermal storage in buildings: A state of the art, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007), 1146 – 1166
- [3] Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y., Review on energy storage with Phase Change Materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, 92 (2012) 593-605.
- [4] Koschenz, M. and Lehmann, B. Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings, *Energy and Buildings* 36 (2004) 567-578.
- [5] Xu, X. Zhang, Y. Lin, K. Di, H. Yang, R. Modeling and simulation on thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, *Energy and Buildings* 37(2005) 1084-1091
- [6] Yahaya, N.A. and Ahmad, H. Numerical investigation of indoor air temperature with application of PCM gypsum board as ceiling panels in buildings, *Procedia Engineering*, 20 (2011) 238 - 248
- [7] Mazo, J. Delgado, M. Marin, J.M. Zalba, B. Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump, *Energy & Buildings* 47(2012) 458-466

Remerciements

Les auteurs remercient le Pôle Ingénierie Matériaux de Bouygues Construction pour son soutien financier au projet ainsi que M. P. Gégout et F. Barberon pour leurs nombreux conseils et discussions fructueuses.