

Stockage d'énergie d'origine solaire dans un MCP inséré sur le toit d'un local soumis aux conditions météorologique de Casablanca.

Yassine BOUZLOU¹, Amina MOURID¹, Mustapha EL ALAMI¹, Mostafa NAJAM¹ and Mustapha FARAJI¹

¹Laboratoire de Physique des Matériaux, Microélectronique, Automatique et Thermique (LPMMAT),
Département de Physique, Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II
Casablanca, Maroc

*(auteur correspondant : bouzlouyassine@gmail.com)

Résumé

Ce travail présente les premiers résultats d'un ensemble d'études expérimentales pour tester le stockage de chaleur d'origine solaire dans un matériau à changement de phase placé sur le toit d'une construction type pièce d'habitation à Casablanca. Pour ce faire, une cellule a été construite à la Faculté des sciences Ain Chock (FSAC), Université Hassan II, Casablanca (utilisant la brique conventionnelle et alvéolaire). La performance thermique de la cellule a été mesurée pour une période estivale. Les flux thermiques absorbés et stockés par le MCP ont été calculés pour cette période, et le coefficient d'échange thermique par convection a été également évalué.

Nomenclature

e	Epaisseur de la toiture, m
$h_{int,m}$	Coefficient convectif interne moyen, $W/m^2.K$
H	Hauteur du mur sud, m
Q_{st}	Flux stocké dans le MCP, W/m^2
Q_{st}	Rayonnement solaire incident sur la toiture, W/m^2
T_1	Température face externe MCP, K
T_2	Température face interne MCP, K
T_3	Température plafond de la cellule, K
T_e	Température d'extérieur, K
T_a	Température ambiante de la cellule, K
T_p	Température de la paroi, K
T_z	Température à 2mm de la paroi, K
v	Vitesse du vent, m/s
z	Hauteur du point i , m

Symboles grecs

λ	Conductivité thermique, $W/m.K$
ΔX	Epaisseur, m
α	Coefficient d'absorption thermique

Indices et exposants

i	Points 1,2,3,4,5,6
int	interne
st	stocké
p	paroi

1. Introduction

La consommation d'énergie a augmenté de façon significative au cours des dernières décennies, en particulier dans le secteur du bâtiment. Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures. Ainsi, réduire la consommation d'énergie du bâtiment est devenu une priorité mondiale majeure. Afin d'atteindre cet objectif, des nouvelles technologies seront nécessaires pour les bâtiments neufs et rénovés. Une des meilleures façons de réduire la demande énergétique d'un bâtiment est d'améliorer son enveloppe. Beaucoup d'efforts ont été faits pour atteindre cet objectif, en s'attaquant à la fois à l'isolation thermique [1] et [2] et à l'inertie thermique [3] et [4]. Cabeza et al. [1] ont évalué expérimentalement l'économie d'énergie qui peut être obtenue grâce à l'isolation thermique dans un climat méditerranéen continental. Leurs résultats ont montré qu'une bonne isolation est cruciale pour réduire la consommation d'énergie pendant les deux périodes d'été et d'hiver. Di Perna et al. [5] ont conclu que l'utilisation de murs de forte inertie thermique dans les bâtiments se traduit généralement par une réduction des besoins en énergie à la fois pour le chauffage et le refroidissement. Bond et al. [6] ont étudié l'effet de l'inertie thermique et de matériaux isolants à l'intérieur de la paroi du bâtiment. Les résultats ont montré que l'utilisation des matériaux d'isolation et d'inertie thermique est la meilleure solution pour réduire la consommation énergétique d'un bâtiment et pour améliorer leur confort thermique.

Dans les dernières décennies, l'attention a été attirée sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) dans le secteur du bâtiment, car ils sont considérés comme un bon moyen pour augmenter l'inertie thermique des enveloppes. Plusieurs études expérimentales ont été réalisées pour démontrer les avantages de l'utilisation des MCPs. Cabeza et al. [7] ont développé et testé un béton amélioré contenant le MCP micro-encapsulé. Leurs expériences sont réalisées afin de comparer le comportement des nouveaux matériaux composites avec du béton conventionnel. Les résultats des mesures expérimentales ont montré que le nouveau béton a permis de lisser les oscillations de température intérieure pendant la journée. Dans une approche similaire, Castell et al. [8] ont évalué le comportement du MCP macro-encapsulé dans la construction de briques pour le refroidissement passif d'été. Les expériences ont été réalisées dans des conditions météorologiques réelles et les résultats ont démontré le potentiel du MCP de réduire les fluctuations de température intérieure et la consommation d'énergie.

Dans cette présente étude, nous mettons l'accent sur la quantité de chaleur stockée dans un MCP incorporé dans le toit d'une cellule construite à la Faculté des sciences Ain Chock (FSAC), Université Hassan II de Casablanca (Fig.1). Cette configuration est choisie pour l'été car le flux de chaleur transmis par le toit est le plus important, en particulier pour les maisons à un seul niveau. Le rayonnement solaire incident sur un toit peut dépasser 1000 W/m^2 . Il peut être constaté que le MCP pourrait être utilisé pour stocker de l'énergie thermique, et également pour améliorer l'effet d'isolation thermique de la structure du bâtiment. Nous évaluons également le coefficient convectif interne pour l'utiliser dans l'évaluation du flux convectif au sein du local.

2. Etude expérimentale

2.1. Description du dispositif expérimental.

La cellule d'essai est une chambre de logement typique construite à l'échelle 1 et exposée aux conditions météorologiques de Casablanca (in-situ) (Fig.1). Le matériau à changement de phase utilisé est encapsulé, dans des panneaux dimensions $1 \times 1,2 \times 0.0052 \text{m}^3$, à l'aide d'une couverture d'aluminium très mince ($75 \mu\text{m}$). Le panneau MCP est composé d'un mélange de polymère à base d'éthylène et de paraffine à 60% laminée de chaque côté par deux feuilles d'aluminium. Les bords sont recouverts de ruban adhésif en aluminium.

Les dimensions de la cellule d'essai sont de $3 \text{m} \times 3 \text{m} \times 3 \text{m}$. Les murs sont constitués de quatre couches, de l'intérieur vers l'extérieur: Mortier (1cm), briques alvéolaires (de 7cm), une lame d'air (14cm), briques alvéolaires (de 7cm), Mortier 1cm. Le plafond objet d'étude est constitué de quatre couches, de l'intérieur vers l'extérieur: Mortier (2 cm), Béton (15 cm), Mortier (2cm), MCP (0,5 cm). Le mur nord est équipé d'une porte en bois massif ($1 \text{m} \times 2.10 \text{m}$) et une fenêtre, verre (5 mm) avec cadre en aluminium ($1 \text{m} \times 1 \text{m}$). Le toit est recouvert par environ 9m^2 de MCP (environ 40.5 kg de MCP).

La cellule est équipée par 44 thermocouples répartis d'une manière adéquate sur les murs et dans l'air intérieur. Une station météorologique a été installée à proximité. Elle mesure des températures d'entrée et de sortie, la vitesse du vent, le rayonnement solaire global, l'humidité relative et la direction du vent. Tout l'appareillage est relié à une chaîne d'acquisition de données connectée à un ordinateur.



Figure 1 : Cellule avec MCP sur le toit

2.2. Exploitation des données

2.2.1 Flux stocké dans le MCP

Les températures mesurées par les thermocouples placés sur les différentes couches de toiture (Fig. 2), ainsi que le flux solaire incident et la vitesse du vent mesurée par la station météo sont utilisées pour déterminer le flux de chaleur stocké dans le MCP à l'aide de l'équation 1. Nous avons négligé les pertes par flux radiatif devant les pertes par flux convectif.

$$Q_{st} = \alpha Q_{sol} - h_{ext}(T_1 - T_e) - \frac{\lambda}{e}(T_2 - T_3) \quad (1)$$

Le flux de chaleur stocké dans le MCP est égal au flux reçu par rayonnement solaire moins les déperditions par convection, moins le flux qui entre à la cellule par conduction, le coefficient convectif externe est calculé à chaque instant par l'équation 2 [9] qui se base sur la vitesse du vent mesurée par notre station météo.

$$h_{ext} = \begin{cases} 8.053 \cdot v^{0.605} & \text{si } v > 2(m/s) \\ 12.249 \cdot v^{0.605} & \text{si } v < 2(m/s) \end{cases} \quad (2)$$

2.2.2 Coefficient convectif interne

Les parois légères contenant des matériaux à changement de phase (MCP) constituent une solution au manque d'inertie des bâtiments à structure légère. Cependant, peu d'études ont été faites sur la valeur du coefficient d'échange convectif aux abords de ce type de parois. C'est pourquoi nous avons réalisé une étude des échanges convectifs le long de la paroi sud de la cellule contenant le MCP sur la toiture. L'approche suivie pour l'évaluation du coefficient convectif interne est basée sur l'égalité entre le flux conductif à proximité de la paroi (dans la couche limite conductive de 2mm à 4mm environ) et le flux convectif entre la paroi et l'air ambiant. Pour ce faire, 12 thermocouples sont placés à 6 points de hauteurs différentes, avec le même écart suivant la normale à cette paroi (Fig. 3).

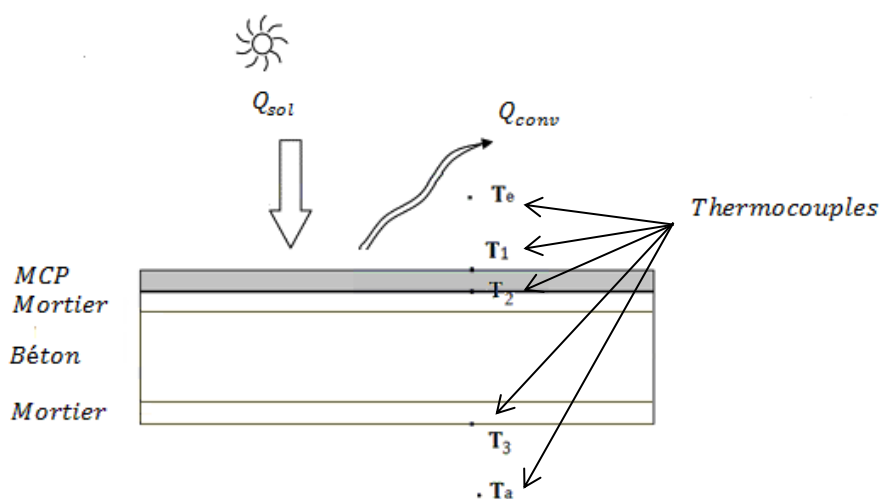


Figure 2: Emplacement des thermocouples au niveau du plafond

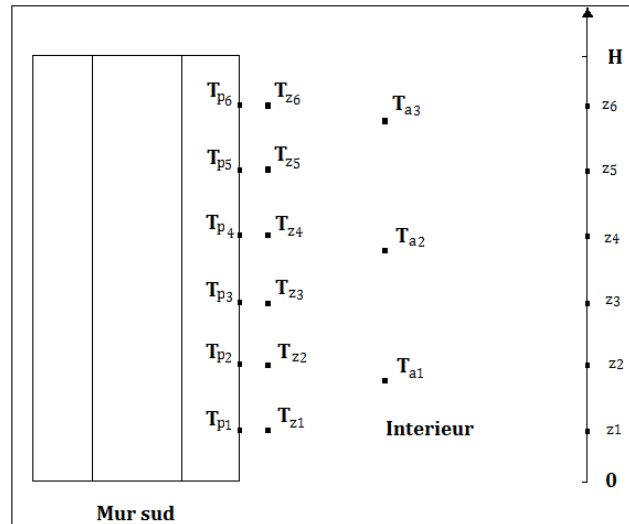


Figure 3: *Emplacement des thermocouples pour l'évaluation de h_{int}*

Le coefficient convectif interne h_{int} est calculé à chaque point à l'aide de l'équation 3. L'équation 4 nous permet de calculer le coefficient convectif interne moyen à chaque instant.

$$\frac{\lambda_{air}}{\Delta x} (T_{pi} - T_{zi}) = h_{int} (T_{pi} - T_{ai}) \quad (3)$$

$$h_{int(moy)} = \frac{1}{H} \sum_1^6 h_i z_i \quad (4)$$

3. Résultats et discussions

Dans cette section, les résultats de l'expérience sont présentés pour le 17 juin 2014 entre 08h et 20h. Cette période est choisie comme étant la condition la plus défavorable pour la climatisation en été (ciel clair, rayonnement solaire maximal). En outre, dans cette période, à Casablanca, l'apport thermique vers l'intérieur de la cellule est maximal.

3.1. Flux de chaleur stocké dans le MCP

Pour évaluer le flux de chaleur stockée dans le MCP, évalué les différents flux : absorbé, transmis et perdu par le toit. Le flux incident ainsi que la vitesse du vent sont également définis pour pouvoir calculer le coefficient d'échange convectif (Fig.4). Nous avons calculé également les déperditions par convection en utilisant la vitesse du vent mesuré par la station (Fig4). Ainsi que le flux thermique qui entre dans la cellule par conduction. Dans la Figure 5, nous présentons les évolutions des flux : stocké, absorbé, perdu et transmis par le MCP à la cavité, pour une période d'une journée du mois de Juin. Nous constatons que le flux stocké dans le MCP augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale proche de 150 W/m^2 puis commence à diminuer pour devenir stable une fois les déperditions par convection sont devenues considérables. Ce flux stocké subit un déclin rapide vers la fin de la journée, avec le coucher du soleil. Nous constatons, également, que le flux transmis à la cellule, par conduction, est très faible par rapport au flux absorbé par l'MCP, ce qui montre que ce dernier a amélioré considérablement l'effet d'isolation thermique de la structure du bâtiment.

Pour mettre en évidence, l'apport du MCP en matière de stockage d'énergie solaire et d'isolation thermique, nous présentons les variations des températures intérieure de la cavité et celle extérieure, Fig. 6. Notons que l'écart entre ces deux température arrive jusqu'à 2 °C vers la mi-journée. Nous pouvons lire, aussi, sur ces deux profils qu'a après de celle de l'extérieur, thermique un déphasage temporel de trois heures, ce qui prouve que le MCP apporte une forte inertie thermique à l'enveloppe du bâtiment. Cependant, un effet néfaste au refroidissement de la cellule est observé vers la fin de la journée : les deux courbes des températures intérieure et extérieure s'inversent ce qui veut dire que le MCP commence à chauffer le local pendant sa décharge. Nous pensons avoir, déjà, trouvé un procédé passif pour surmonter ce problème (ce procédé sera présenté dans nos travaux futures).

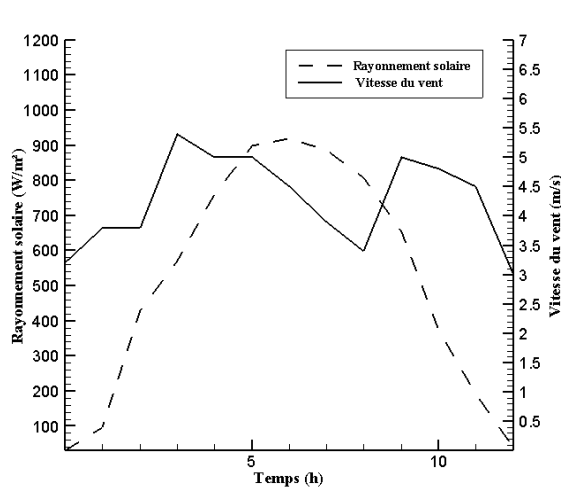


Figure 4 : Flux solaire et vitesse du vent pour le 17 Juin 2014 à Casablanca

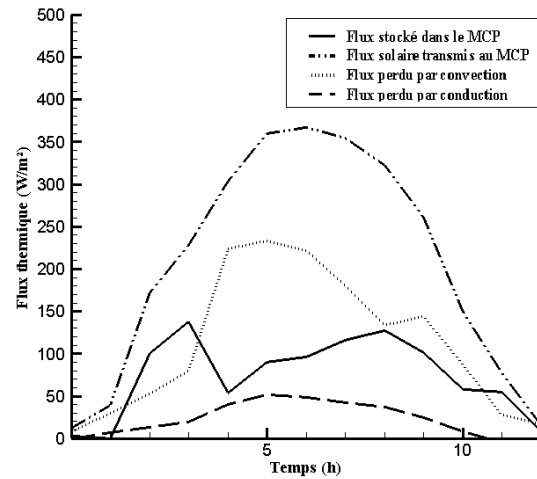


Figure 5: Variation des flux thermiques absorbé, stocké, transmis et perdu par le toit avec MCP

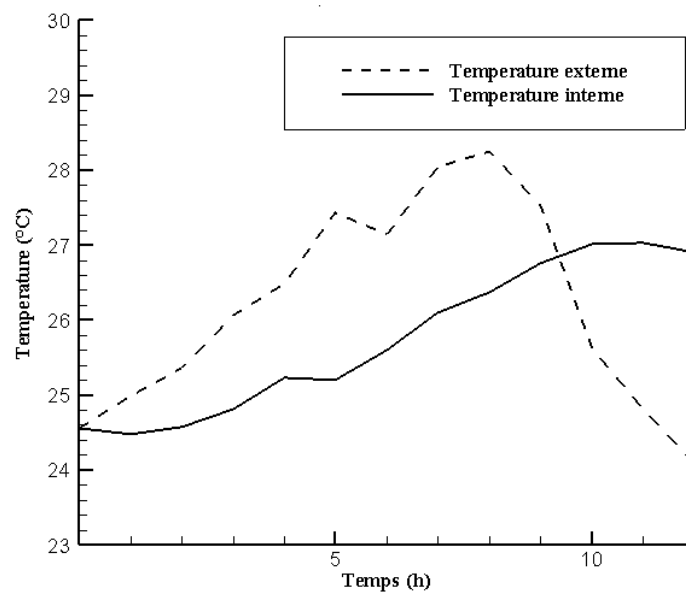


Figure 6 : Variation des températures intérieure et extérieure en fonction du temps

3.2. Coefficient convectif interne

La valeur moyenne du coefficient convectif interne est présentée en fonction de temps dans la figure 7. Le coefficient $h_{int,m}$ reste, pratiquement, constant, égal à $7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, de 0 jusqu'à 150mn, puis, au-delà de $t=150\text{mn}$, commence à fluctuer tout en augmentant de valeur moyenne qui devient presque égale à $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Nous soulignons que cette valeur est proche de celle qui existe dans la littérature (ASHRAE [10]). Nous notons aussi, que les fluctuations du coefficient d'échange convectif $h_{int,m}$ sont liées à l'écart entre les températures intérieure et extérieure de la cellule.

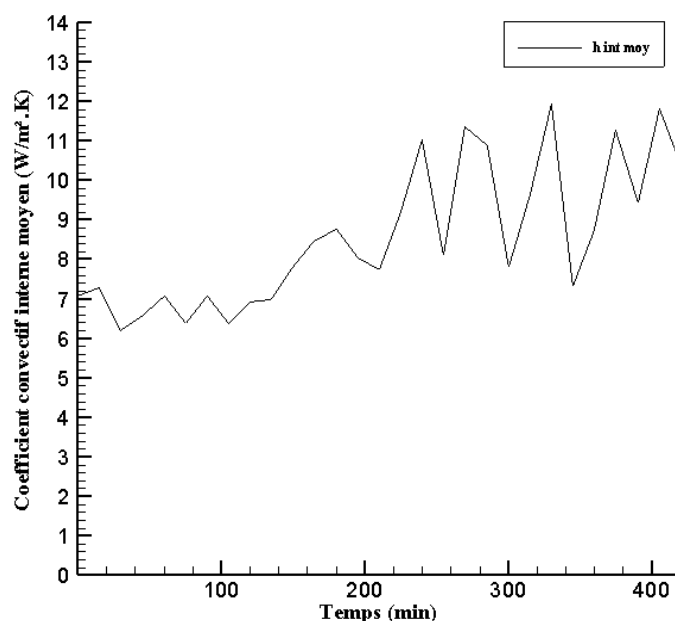


Figure 7 : Variation du coefficient convectif interne moyen en fonction du temps

4. Conclusions

Nous avons mené une étude expérimentale de l'efficacité énergétique d'un bâtiment portant un MCP sur son toit. L'objectif est de stopper les apports solaires entant à travers le plafond, pendant l'été, pour minimiser les consommations en énergie de climatisation de ce local.

Les résultats ont montré une réduction significative du flux de chaleur à travers la toiture avec le MCP, en raison de l'absorption de celui-ci par fusion dans ce dernier. Il peut donc être conclu que le MCP est efficace pour le stockage de chaleur et on même temps il joue un rôle très important dans l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment, que ça soit au niveau de l'isolation thermique ou en termes l'inertie. Le MCP a permet d'obtenir un écart de température important entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ce qui permet de réduire le temps de climatisation, et par ailleurs, réduire la consommation d'énergie électrique. Le coefficient convectif déterminé expérimentalement pour des faibles écarts de température, nous a permis de déterminer le flux entrant par convection entre le plafond et l'air dans la cavité. La connaissance de ce coefficient va nous aider dans nos travaux futurs pour l'évaluation des flux convectif le long de tous les murs de la cavité.

Références

- [1] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, I. Fernández, Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 5, May 2010, Pages 630-636.
- [2] Muhammet Kayfeci, Ali Keçebaş, Engin Gedik, Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications, *Applied Thermal Engineering*, Volume 50, Issue 1, 10 January 2013, Pages 217-224.
- [3] C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena, M. D’Orazio, Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 1, January 2011, Pages 200-206.
- [4] E. Stéphan, R. Cantin, A. Caucheteux, S. Tasca-Guernouti, P. Michel, Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings, *Building and Environment*, Volume 80, October 2014, Pages 241-248.
- [5] C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena, M. D’Orazio, Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 1, January 2011, Pages 200-206.
- [6] Danielle E.M. Bond, William W. Clark, Mark Kimber, Configuring wall layers for improved insulation performance, *Applied Energy*, Volume 112, December 2013, Pages 235-245.
- [7] Luisa F. Cabeza, Cecilia Castellón, Miquel Nogués, Marc Medrano, Ron Leppers, Oihana Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*, Volume 39, Issue 2, February 2007, Pages 113-119.
- [8] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 4, April 2010, Pages 534-540.
- [9] N. Ito, K. Kimura, J. Oka, An experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building, *ASHRAE Transactions* (1972), pp. 78-81
- [10] ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air- conditioning Engineers, Inc, 1993.

Remerciements

Ce travail rentre dans le cadre du projet Stockage d’énergie thermique solaire par fusion des matériaux à changement de phases au sein d’un système hybride Habitat/Capteur solaire /MCP : Application au chauffage passif de l’habitat au Maroc. Les auteurs tiennent à remercier l’Institut de Recherche dans l’Energie Solaire et les Energies Nouvelles (IRESEN) pour son support financier dans le cadre des projets InnoTherm II.