

Amélioration des caractéristiques thermiques et inertielles de l'enveloppe du bâtiment à des fins de rafraîchissement des bâtiments par les MCP

Amine LAAOUATNI^{1,2}, Nadia MARTAJ^{1,*}, Rachid BENNACER³, Mohamed EL OMARI², Mohamed EL GANAOU⁴

¹ EPF Campus de Troyes 2, rue F. Sastre 10430 Rosières-près-Troyes, France ;

² Université Cadi Ayyad, Laboratoire LAEPT, Marrakech, Maroc ;

³LMT CNRS UMR 8535, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, 61 Av du Président, Wilson 94235 Cachan Cedex, France ;

⁴Université 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 – L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) en vue de l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments est devenue une application attractive contribuant à l'augmentation de l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment, ainsi que la réduction de la consommation d'énergie. Un élément de construction rempli d'un MCP et doté de tubes de ventilation est proposé pour, à la fois augmenter l'inertie et contribuer au rafraîchissement de l'enveloppe. Une simulation numérique en 3D est menée par la méthode des éléments finis sous Comsol Multiphysics, dont l'objectif est de suivre le comportement thermique de cette solution. Ainsi, Une étude expérimentale est réalisée sur un parpaing contenant du MCP avec des tubes de ventilation. Le but est de voir l'effet du couplage du MCP avec la ventilation sur l'augmentation de l'inertie du parpaing. Les résultats obtenus montrent l'aptitude de cette nouvelle solution pour augmenter l'inertie thermique d'un bâtiment.

Mots clés : Matériaux à Changement de Phase, MCP, Inertie thermique, rafraîchissement, bâtiment.

Nomenclature

C_p chaleur spécifique à $p=cte$, J/kgK
 k conductivité thermique, W/mK
 L chaleur latente, J/kg
 T température, K
 t temps, s
 T_{sl} température de changement de phase s-l, K
 u champs de vitesses, m/s

Indices

e extérieur
 f face
 i intérieur
 l liquide
 MCP matériau à changement de phase
 s solide

Symboles grecs

ρ masse volumique, kg/m³
 θ fraction volumique du MPC solide, -

1. Introduction

De nos jours, le problème énergétique dans le bâtiment suscite de plus en plus d'intérêt. La conception, le choix des matériaux de construction, ainsi que les systèmes énergétiques et thermiques utilisés évoluent très rapidement. Il est en effet nécessaire de mettre en œuvre des nouvelles solutions et structures permettant un équilibre entre l'énergie disponible et le confort de l'occupant. Dans les nouvelles constructions, de multiples raisons, à savoir le coût et l'optimisation de l'espace, exigent la diminution de l'épaisseur des parois; cela affecte considérablement l'inertie thermique et la rend insuffisante pour amortir les oscillations dues à la variation des températures extérieures [1]. Ainsi, la plupart des systèmes de contrôle climatiques des locaux consomment une grande quantité de l'énergie électrique.

L'utilisation du stockage par chaleur latente avec des matériaux à changement de phase (MCP) peut répondre en grande partie à plusieurs problèmes. Ces matériaux fournissent une capacité de stockage élevée de l'énergie et aussi une grande quantité de chaleur pendant le processus de changement de phase avec une faible variation du volume et de la température. En effet, de nombreuses études ont été menées, parmi lesquelles, l'incorporation des matériaux à changement de phase dans les parois. Avec ce couplage, l'amortissement des pics de températures peut aller jusqu'à 4 °C [2].

L'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment doit faire face à certaines contraintes, d'une part, le problème de fuite lors de la fusion du matériau. Plusieurs études proposent des méthodes d'incorporation plus innovante et adaptée à chaque application [3-12]. D'autre part, les MCP présentent une asymétrie entre l'énergie stockée et déstockée, cette différence de la quantité d'énergie nécessite une solution pour extraire davantage d'énergie lors du déstockage. Le choix de MCP est aussi important car il faut que sa température de fusion soit proche de celle de confort et que sa chaleur latente soit suffisamment grande pour stocker plus d'énergie. D'autres contraintes qui s'imposent aussi selon la nature de l'utilisation des MCP à savoir: la surfusion, la ségrégation, le cycle de vie thermique, l'inflammabilité et la corrosion.

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons effectuer une étude sur l'efficacité du rafraîchissement des bâtiments par des matériaux à changement de phase (MCP) avec ventilation intégrée. À cet effet, un élément de construction "parpaing" rempli d'un composite polymère-paraffine et doté de tubes de ventilation est proposé. Ce mélange est stable mécaniquement et permet d'éviter le problème de fuite. Le choix de la paraffine a écarté à la fois les sels hydratés connus par leur tendance corrosive, ainsi que les acides gras qui sont inadaptés car le MCP est directement en contact avec le béton qui possède un pH basique. À travers ce module, nous visons l'étude de l'impact sur l'inertie thermique d'une paroi en parpaings dans des conditions d'inconfort d'été. Le but est de réduire l'effet de l'amplitude diurne des températures externes, quantifier la capacité de ces matériaux, à stocker, restituer l'énergie et contrôler la température intérieure du bâtiment. L'amélioration du déstockage est assurée par l'intra-ventilation nocturne.

La première partie de ce travail est consacrée à une simulation numérique en 3D effectuée sous Comsol Multiphysics. Une étude comparative des différentes configurations permet d'analyser l'effet de l'intégration des MCP et les tubes de ventilation sur le comportement thermique du parpaing. En deuxième partie, une étude expérimentale sera décrite pour montrer le comportement de cette solution sur le plan réel.

2. Présentation du problème étudié

2.1. Description du module physique

Le module physique étudié est basé sur un parpaing creux de commerce de dimension : 50 cm x 20 cm x 9.5 cm. Constitué de 3 cavités parallélépipédiques dont les caractéristiques géométriques : longueur, largeur et hauteur sont respectivement de 13 cm, 6.5 cm et 17 cm. Les trois cavités sont remplies d'un mélange d'une paraffine et un polymère de type styrène, caractérisé par sa stabilité mécanique (gel) dans les intervalles de températures utilisées dans le bâtiment. Le système est doté de six tubes en PVC, qui traversent le MCP et permet le passage de l'air à travers le module (Fig. 1). Le choix des tubes en PVC répond en grande partie aux contraintes liées à la réalisation du dispositif expérimental. L'augmentation de la surface d'échange et l'injection de l'air de l'extérieur au sein du MCP, permettent d'améliorer la réponse du système lors du déstockage. La température de fusion du composite utilisé est égale à 28 °C, qui correspond à la valeur limite fixée pour le confort d'été dans les climats chauds, l'objet de cette étude est de montrer l'efficacité de cette configuration développée pour lisser l'influence solaire sur la température de l'enveloppe du bâtiment.

Pour ce faire, des conditions d'inconfort d'un climat méditerranéen en été sont imposées. À l'extérieur, un flux solaire et une température sinusoïdale (variant entre 20 et 39 °C), à l'intérieur, l'ambiance est supposée maintenue à une température de confort de 25 °C par un dispositif de conditionnement (Fig. 2).

Les échanges par convection avec les milieux environnants sont pris en compte sur les deux surfaces, interne et externe, avec des coefficients convectifs supposés constants ($h_e = 17 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$). L'injection de l'air par ventilation se fait à partir du moment où la température extérieure est strictement inférieure à 28 °C (température de fusion du MCP), car une ventilation pendant toute la journée va charger davantage le MCP.

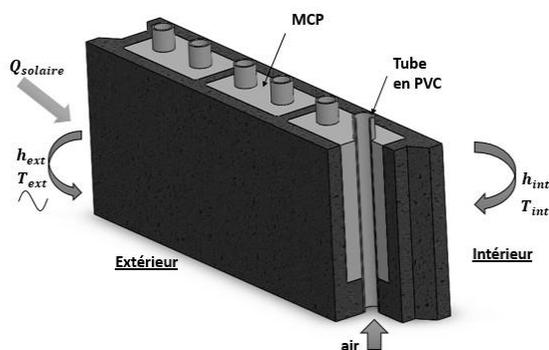


Figure 1: Schéma explicatif du module thermique

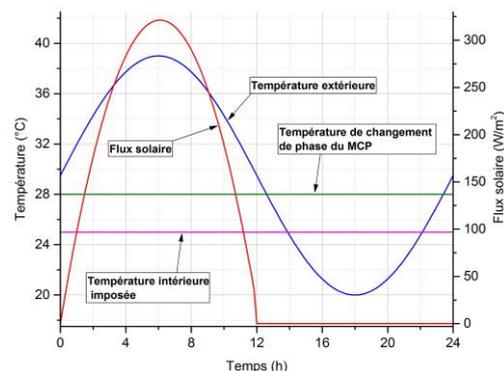


Figure 2: Conditions aux limites

2.2. Modélisation et paramètres de la simulation

La modélisation du système thermique décrit a été entreprise à l'aide du logiciel de simulation basé sur la méthode des éléments finis, Comsol Multiphysics. Afin d'étudier le comportement du système, une modélisation tridimensionnelle (3D) a été développée. L'équation aux dérivées partielles qui gouverne le modèle est alors :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

Où ρ , C_p et k sont les caractéristiques intrinsèques du matériau concerné, u est le champ de vitesse dans le milieu. Le changement de phase est pris en compte à travers la capacité massique

du matériau. Comsol Multiphysics utilise la méthode du Cp apparent dans la résolution de l'équation de la chaleur dans le MCP. Les propriétés thermo-physiques du MCP sont régies par les expressions suivantes :

$$k_{MCP} = \theta k_s + (1-\theta)k_l, \quad \rho_{MCP} = \theta \rho_s + (1-\theta)\rho_l \quad (2)$$

$$C_{p_{MCP}} = \frac{\theta(\rho C_p)_s + (1-\theta)(\rho C_p)_l}{\rho_{MCP}} + L \frac{\partial \theta}{\partial T} \quad (3)$$

Avec θ la fraction volumique de la phase solide du MCP, T_s et T_l sont respectivement les températures du MCP à l'état solide et liquide.

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{si } T < T_s \\ \frac{T - T_l}{T_s - T_l} & \text{si } T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & \text{si } T > T_l \end{cases} \quad (4)$$

L'évolution de la température au sein des différents milieux est contrôlée par des sondes placées essentiellement sur les faces, externe et interne, du parpaing ainsi que dans le MCP.

Le maillage utilisé est un maillage triangulaire non uniforme appliqué sur la surface haute du parpaing et extrudé sur le reste de la géométrie, l'épaisseur des tubes de PVC (égale à 1 mm) a influencé le choix du maillage car cette petite dimension oblige que la région des tubes soit maillée beaucoup plus finement que d'autres régions. Le modèle 3D contient 919115 mailles. Les conditions aux limites sont celles décrites dans la figure 2.

3. Résultats et discussions

Nous présentons l'évolution de la température de la face intérieure du parpaing en fonction de la configuration: parpaing sans MCP, avec MCP, avec MCP et tubes de ventilation, l'influence de la vitesse de l'air, l'effet de la géométrie des tubes, l'état de la transition de phase dans le MCP ainsi que le besoin énergétique en climatisation pour maintenir la température de confort.

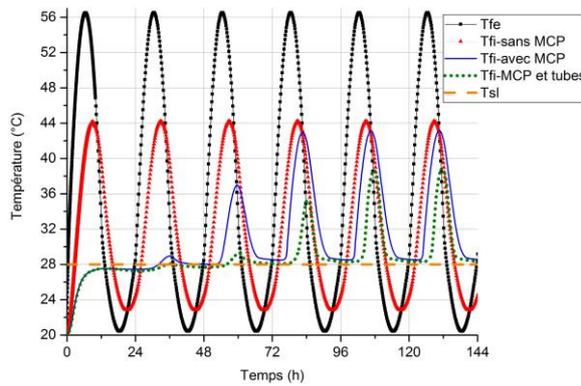


Figure 3: Evolution de la température sur la face intérieure du parpaing pour chaque modèle

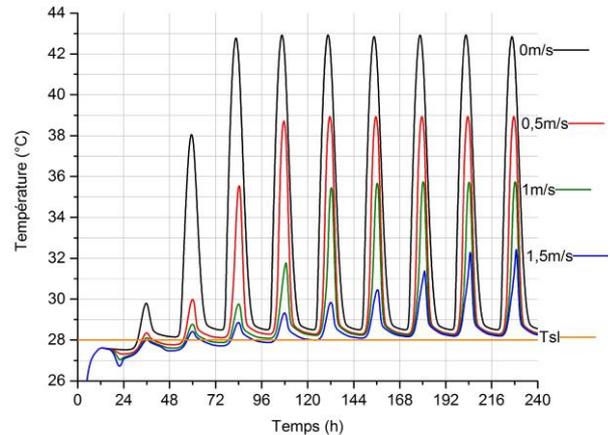


Figure 4: Effet de la vitesse de l'air sur la température de la face intérieure

La première étape de l'étude consiste en une analyse de l'influence de la configuration sur la réponse thermique qui se manifeste sur la face intérieure du parpaing. La figure 3 présente la variation de la température sur la face intérieure pour les trois configurations (parpaing sans MCP, avec MCP et avec MCP et tubes de ventilation) en un point. La comparaison entre le cas sans MCP et avec MCP et tube de ventilation montre que la stabilisation de la température minimale passe d'un jour à 4 jours, l'intégration du MCP impose une régulation de la température autour de la température de changement de phase T_{sl} , ainsi l'intégration du MCP et des tubes de ventilation permet de baisser la température maximale de 6°C sur la face intérieure. La figure 4 montre l'effet de la vitesse de ventilation sur la température de la face intérieure, un écoulement avec une vitesse de 0.5 m/s permet de réduire la température maximale d'environ 4°C .

La forme des tubes est un paramètre important dans cette configuration développée puisqu'elle est basée sur le principe de l'augmentation de la surface d'échange au sein du MCP, ce qui va permettre d'améliorer le déstockage et remédier à la différence d'énergie entre le stockage et le déstockage. Pour cela, nous avons varié le diamètre des tubes utilisés de 15 à 30 mm, la figure 5.a montre que l'augmentation du diamètre affecte considérablement la réponse sur la face intérieure, pour un élargissement de 5 mm la température maximale baisse d'environ 3°C . Ainsi l'augmentation du diamètre est accompagnée par la diminution du volume du MCP, la convergence rapide vers la saturation est influencé en grande partie par l'augmentation de la surface d'échange et non seulement par la diminution du volume.

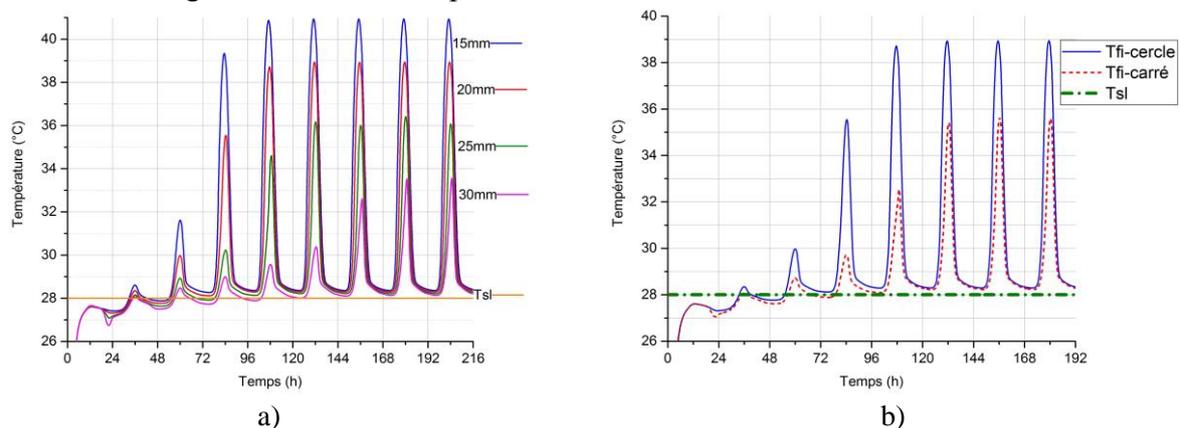


Figure 5: Influence de la géométrie des tubes: a) effet de la variation du diamètre, b) Influence du changement de la section des tubes

La figure 5.b présente l'effet de la variation de la section des tubes, nous avons constaté que l'utilisation d'un tube carré de 2 cm d'arête au lieu d'un tube circulaire ayant un diamètre égal à l'arête des tubes carrés permet de gagner environ 3.5°C sur la face intérieure. Le passage d'un tube circulaire à un tube carré permet à la fois d'augmenter la surface en contact avec le MCP de 30 cm^2 (de 110 à 140 cm^2), ainsi l'intégration d'une géométrie carrée dans la cavité rectangulaire permet d'avoir une distribution plus uniforme lors du transfert de la chaleur.

La figure 7 montre la variation de l'état du MCP durant le cycle stockage/déstockage. La grandeur évaluée représente la valeur moyenne de la fraction volumique dans les trois cavités, l'activation de la ventilation permet de déstocker plus d'énergie et nous pouvons arriver à 50% de la transition de phase lors du déstockage.

Le schéma dans la figure 8 décrit un bilan énergétique simplifié dans les deux cas, avec et sans tubes de ventilation, cette évaluation est basée sur les valeurs moyennes des densités de flux échangées pendant une journée. Le calcul est fait à partir du 5ème jour. La face extérieure absorbe plus d'énergie car le système est refroidi davantage avec les tubes par contre avec une vitesse de 1 m/s , le flux entrant est réduit de 30 kJ .

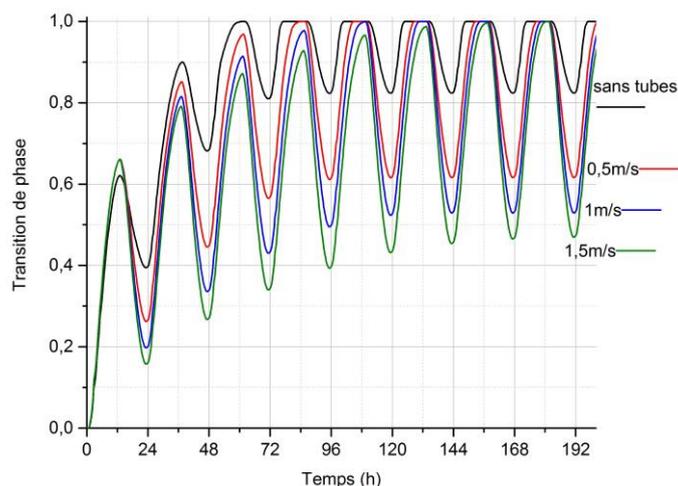


Figure 7 : Evolution de la transition de phase dans le MCP

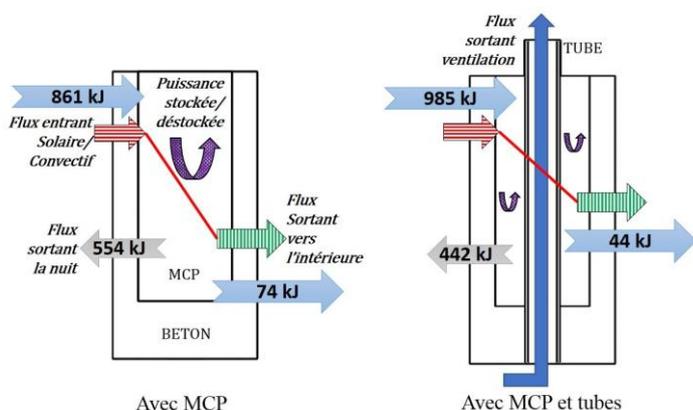


Figure 8 : Bilan énergétique dans le deux cas (avec et sans tubes)

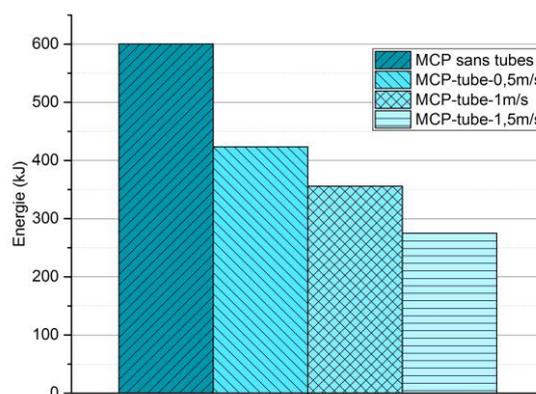


Figure 9 : Besoins énergétiques en climatisation pour maintenir la température intérieure à 25°C (1jour)

En intégrant les courbes de la densité de flux au cours du temps, sur les périodes où la température de la face intérieure est supérieure à la température de confort, il est possible d'estimer les besoins énergétiques en climatisation pour le maintien de la température de confort. L'ambiance intérieure est directement influencée par la température des parois.

Pour les deux configurations avec MCP, avec MCP et tubes de ventilation, les résultats obtenus pour une journée montrent que pour un parpaing, avec MCP, on aura besoin de 600 kJ comme énergie de climatisation et seulement 355 kJ pour un parpaing avec les tubes (avec une vitesse de l'air de 1 m/s) (Fig. 9). L'ajout des tubes avec une ventilation de 1 m/s permet de gagner à peu près 245 kJ/jour de l'énergie nécessaire pour annuler le flux de chaleur qui rentre de la face intérieure.

4. Etude expérimentale

Un module expérimental, présenté en photo dans la figure 10, est utilisé pour étudier la réponse thermique du parpaing rempli de MCP et doté de tubes de ventilation. Le dispositif expérimental comprend un parpaing constitué de trois cavités, 6 tubes en PVC avec un diamètre de 2 cm, un système de chauffage basé sur une résistance en silicone sous forme de plaque, des thermocouples de type K liés au système d'acquisition, des petits ventilateurs sont raccordés aux tubes, l'air et la température y circulant sont contrôlés par un anémomètre à fil chaud. Un système d'isolation en polystyrène a été mis en place pour limiter les pertes thermiques et

garantir un transfert unidirectionnel (figure 11). Le même montage peut être adapté pour tester la réponse d'un parpaing sans MCP avec les mêmes conditions. Sur le banc expérimental réalisé, deux configurations sont essentiellement étudiées : parpaing sans MCP et parpaing avec MCP et les tubes de ventilation. Selon l'état des tubes, nous pouvons différencier entre 3 modules, tubes fermés (sans écoulement), tubes ouverts (convection naturelle) et tubes avec ventilateurs (convection forcée).

Les deux résistances sont réglées pour générer une puissance de 462 W/m^2 , une puissance suffisante pour porter la face extérieure à une température égale à $65 \text{ }^\circ\text{C}$ au bout de 5 heures de chauffage. Ce film chauffant est adopté pour simuler les apports solaires, il permet de prendre en compte le flux solaire et convectif directement sur la face. Le contrôle de la température est assuré par le système de commande basé sur une carte relais. Une étude dynamique est adoptée sur 24 heures, le protocole expérimental consiste à appliquer une montée de température de 20 à $65 \text{ }^\circ\text{C}$ et ensuite le refroidissement selon le cas étudié (avec ou sans ventilation), pour le cas avec ventilation, l'injection forcée de l'air se fait après l'arrêt du chauffage. La température ambiante varie légèrement entre 20 et $21 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figure 10 : Photographie du dispositif expérimental

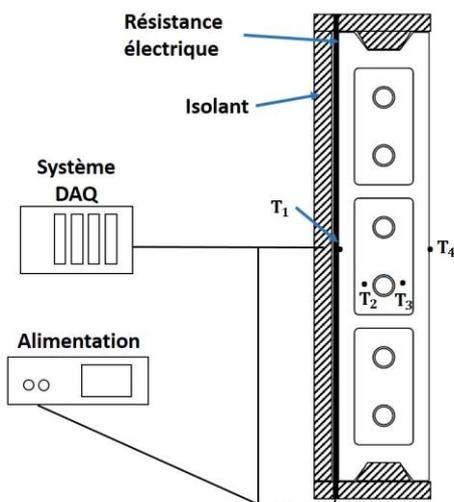


Figure 11 : Représentation schématique du banc expérimental

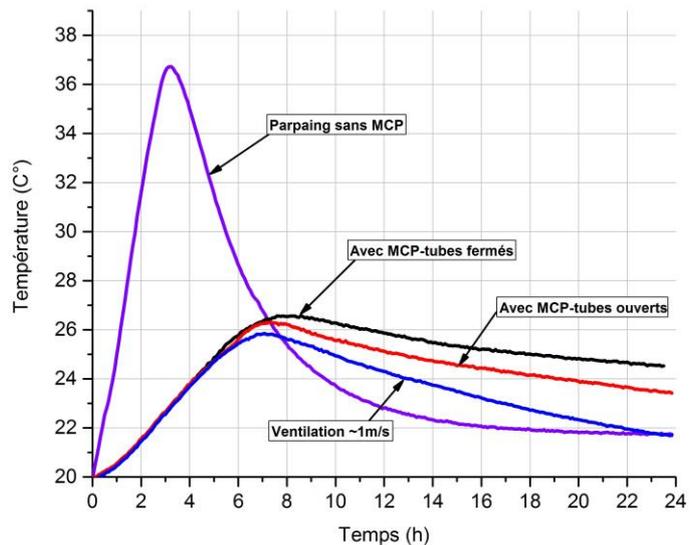


Figure 12 : Evolution de la température sur la face intérieure du parpaing

La figure 12 présente l'évolution de la température de la face intérieure pour les 4 configurations. Le déphasage est de l'ordre de 4 heures. L'échange au sein du MCP à travers l'écoulement de l'air dans les tubes contribue davantage pour atteindre rapidement la saturation. Avec une vitesse d'environ 1 m/s , une faible variation de la température est remarquée. La ventilation permet de baisser la température rapidement sur la face intérieure, la stabilisation finale commence après 22 heures du temps global de l'expérience.

5. Conclusion

Dans ce travail nous avons proposé une étude thermique d'une solution développée pour la régulation de la température intérieure d'un bâtiment à travers l'augmentation de l'inertie thermique d'un matériau de construction. La configuration proposée est basée sur le couplage de la paraffine stable mécaniquement avec des tubes de ventilation au sein d'un parpaing. Pour pouvoir optimiser la réponse du système, une simulation numérique en 3D a été menée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Une analyse comparative et paramétrique des différentes grandeurs qui influencent le système montre l'efficacité de ce couplage pour améliorer la réponse thermique. Cependant, l'analyse de la transition de phase, montre qu'on n'arrive pas à un déstockage total. Afin de limiter la nécessité de l'augmentation de la vitesse utilisée pour accélérer la saturation, il faut prendre en considération l'influence de la géométrie des tubes. Le but est d'arriver à déstocker plus d'énergie. Cette étude permet de tester la faisabilité et la performance de cette solution, par ailleurs la prise en compte de l'énergie utilisée dans la ventilation est nécessaire pour optimiser le système.

Une étude expérimentale a été réalisée pour mettre en évidence le comportement thermique du parpaing contenant du MCP avec des tubes de ventilation. Les résultats confirment que l'insertion de la paraffine avec des tubes permet de stabiliser la température sur la face intérieure et d'augmenter l'inertie thermique. En perspectives, nous envisagerons de tester l'influence de la variation de la vitesse de l'air ainsi que de mieux contrôler la température imposée par le système de chauffage.

Références

- [1] D. Zhou, C.Y. Zhao et Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92, (2012), 593–605.
- [2] M. Ahmad, thèse « nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super isolation, apports solaires », 2004, UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER – GRENOBLE 1.
- [3] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée et D. Quenard, Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a Phase Change Material (PCM) for the light envelope of buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 38, N°4, (2006), 357-366.
- [4] L. Royon, L. Karim, et A. Bontemps, Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 63, (2013), 29–35.
- [5] H. Kadri, S. Aggoun, R. Bennacer et A. Bouvet, Stockage de l'énergie dans les matériaux de construction, Congrès de Mécanique, Marrakech, 2009.
- [6] L. Royon, Amélioration énergétique de dalles alvéolées par l'intégration d'un MCP stable mécaniquement, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie 2012.
- [7] A.M. Khudair et M.M. Farid, A review on energy conservation in building. Applications with thermal energy storage by latent heat using Phase Change Materials, *Energy Conservation and Management*, Vol. 45, (2004), 263-275.
- [8] I. Ceron, J. Neila, et M. Khayet, Experimental tile with phase change materials for building use, *Energy and Buildings*, Vol 43, N° 8, (2011), 1869-1874.
- [9] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia et A. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, N° 3, (2011), 1675-1695.
- [10] F. Kuznik, D. David, K. Johannes et J.J Roux, A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 15, N° 1, (2011), 379-391.
- [11] C. Castellon, M. Medrano, J. Roca, L.F. Cabeza, M.E. Navarro, A.I. Fernandez, A. Lazaro et B. Zalba, Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, *Renawable Energy*, Vol 35, N° 10, (2010), 2370-2374.
- [12] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang et H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and environment*, Vol 42, N° 6, (2007), 2197-2209.