



## Comportement thermique d'un mur en mortier intégrant un matériau à changement de phase binaire

Yahia Abdelhamid LAKHDARI<sup>1</sup>, Salah CHIKH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> USTHB, Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés, LTPMP,  
B.P.32, El Allia, Bab-Ezzouar 16111, Alger, Algérie  
[yaya-69@hotmail.fr](mailto:yaya-69@hotmail.fr), [schikh@usthb.dz](mailto:schikh@usthb.dz)

### Résumé

Une analyse du changement de phase non isotherme d'une paraffine binaire mélangée avec du mortier est menée dans cette étude. Le phénomène est résolu numériquement avec un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis avec un schéma totalement implicite. Nous analysons l'influence du taux de MCP dans le mur ainsi que les données climatiques du sud et nord Algérien sur le comportement thermique du mur de MCP dont le but est d'améliorer l'efficacité énergétique dans le bâtiment. L'intégration du MCP étudié affecte le comportement thermique du mur, le stockage par chaleur latente dans le cas de la ville d'Adrar est plus élevé que celui d'Alger. Le MCP utilisé permet ainsi d'améliorer le confort thermique d'un bâtiment en Algérie.

### Mots clés

Matériau à changement de phase (MCP), changement de phase non isotherme, stockage de chaleur.

### Introduction

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus dynamiques dans les pays émergents, résultat d'un rythme élevé de croissance de la population et d'urbanisation. L'Algérie ne fait pas exception, dont la croissance de sa population est spectaculaire, passant de 7.4 millions d'habitants en 1970 à 40 millions en 2015. Par conséquent, la demande de logements augmente considérablement et fait de la construction l'un des principaux moteurs de la croissance du pays. La consommation énergétique dans le secteur du bâtiment résidentiel algérien représente 35% du total de l'énergie, tous secteurs confondus [1]. En outre, d'après les projections de référence de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie (OME), la consommation d'électricité a plus que triplé au cours des trois dernières décennies et que cette tendance se poursuivra d'ici à 2025. L'Algérie, après l'indépendance, a lancé de vastes programmes de construction, sans se préoccuper de l'efficacité énergétique des bâtiments. En effet, les habitats traditionnels ruraux et urbains, caractérisés par leur grande efficacité énergétique, ont peu à peu été substitués par ces bâtiments, dont la performance énergétique s'est avérée très mauvaise, puisque les professionnels ont construit en ignorant les conditions climatiques et le niveau de performance thermique requis. L'autre point à soulever ; est celui de l'augmentation du niveau de vie des habitants ; ces derniers entraînent une demande de confort plus élevée, due notamment à la généralisation de l'accès à l'électricité et se traduisant par une demande plus forte en appareils électroménagers. Ainsi l'accroissement de la demande d'énergie est en phase de devenir un problème crucial. L'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments est un moyen intéressant pour réduire les consommations énergétiques ou pour améliorer le confort d'été au sein des bâtiments. Les MCP considérés dans le bâtiment sont des matériaux qui changent d'état physique dans une plage de température restreinte, entre 18 et 28°C selon le MCP. Ces températures sont les plus utiles pour leur utilisation lors de la vie courante (climatisation, chauffage, etc.). Le changement de phase utilisé sera défini selon l'usage. Pour rappel, lors d'un changement de phase, une quantité d'énergie sous forme de chaleur est captée ou transmise par le matériau. C'est cette propriété qui est utilisée dans le cas d'un isolant composé de MCP pour stocker de la chaleur. Intégrés dans les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment, sous forme de microbilles par

exemple, les MCP permettent d'augmenter l'inertie thermique des murs et ainsi de pallier aux fluctuations de températures journalières. Par exemple, pour un matériau dont le changement de phase se fait à 23°C, les températures supérieures seront stockées par le matériau pour passer d'un état solide à un état liquide. Il limitera mécaniquement l'augmentation de la température. Cette énergie sera ensuite restituée lorsque la température ambiante redescendra sous la barre des 23°C. Dans les années 1940, Talkes [2] a étudié l'utilisation du sulfate de sodium déca hydrate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) pour stocker l'énergie solaire et l'utiliser pour le chauffage des locaux pendant la nuit et les jours nuageux. Ces travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts, et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80. L'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment fait l'objet d'études très poussées pour les constructeurs de bâtiments afin de limiter les consommations d'énergie. Plusieurs travaux sur l'intégration de MCP dans les matériaux de construction ont été réalisés. Diaconu *et al.* [3]. Ont proposé un nouveau type de système de mur composite incorporant des MCP. Son potentiel d'économies d'énergie de climatisation / chauffage en climat tempéré continental a été évalué. Le nouveau système de paroi contribue aux économies d'énergie annuelles et réduit la valeur de crête des charges de refroidissement / chauffage. Silva, T., *et al.* [4]. Ont évalués l'effet de l'incorporation de MCP macro encapsulé dans un mur typique d'enceinte de maçonnerie en briques d'argile portugaise. Les résultats expérimentaux ont révélé que l'incorporation de la MCP est une potentialité utilisée comme stockage de l'énergie solaire thermique contribuant à l'atténuation de la température de l'espace intérieur, en réduisant de 10 °C à 5 °C l'amplitude thermique et en augmentant le délai de environ 3 h. La validation de la modélisation numérique présente des contraintes identifiées et influence l'étalonnage du modèle, mais l'étude d'optimisation de la quantité de MCP a été réalisée. Izquierdo-Barrientos, *et al.* [5]. ont étudié l'influence des MCP dans les murs externes de bâtiments, avec un modèle de transfert de chaleur transitoire unidimensionnel utilisant une technique de différence finie. L'intégration d'une couche MCP dans une paroi de bâtiment a diminué l'amplitude du flux thermique instantané à travers la paroi lorsque la température de fusion du MCP est correctement sélectionnée en fonction de l'orientation du mur et la saison. Zwanzig *et al.* [6]. Ont montrés que la performance composite MCP dans l'enveloppe du bâtiment est fortement dépendante de l'emplacement dans la paroi choisie ainsi que le climat. Une modélisation d'un mortier de ciment contenant un matériau à changement de phase a été réalisée par Franquet *et al.* [7]. La comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux donne un très bon accord, que ce soit pendant le chauffage ou le refroidissement du matériau composite en supposant un profil d'enthalpie non pur. Le but de l'étude de Joulin *et al.* [8]. Est de déterminer la chaleur latente et la température du MCP étudié pour fournir des solutions de référence permettant de valider des simulations numériques. Un nouvel isolant thermique MCP a été développé par Jin *et al.* [9]. Sa performance thermique a été étudiée en fonction de l'emplacement du MCP dans la cavité d'un mur résidentiel nord-américain typique. Les résultats expérimentaux ont montré que, par rapport à une paroi sans MCP, les flux de chaleur de crête ont été réduits jusqu'à 11% lorsque le blindage thermique a été placé dans l'emplacement situé à l'intérieur, à côté de la face interne du panneau mural de gypse, la couche la plus proche du Climatisation. Ghedamsi *et al.* [10]. ont déterminé la concentration d'isolation optimale pour différentes orientations de paroi dans les conditions climatiques de la ville d'Ouargla (au sud de l'Algérie). Il est possible d'obtenir une concentration optimale de 15% de  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  pour toutes les orientations des murs. De plus, les orientations ouest et sud fournissent des charges de transfert de chaleur à refroidissement égal qui sont les plus fortement comparées aux orientations est et nord. La charge de refroidissement la plus faible est donnée par le mur exposé au nord et la période de récupération est pour toutes les orientations murales sud / Ouest, est et nord sont respectivement : 10,51, 9,14 et 8,51 ans. La concentration MCP optimale pour chaque orientation est de 15%. Tittlein *et al.* [11]. ont évalué trois modèles de changement de phase différents utilisés pour prédire le comportement énergétique d'un échantillon de mortier de ciment MCP. Le modèle d'enthalpie basé sur l'hypothèse d'un mélange binaire donne des résultats très satisfaisants aussi bien dans le cas du changement de phase total que partiel. examine le potentiel annuel d'économies d'énergie et de coûts d'ajout d'un matériau de changement de phase micro encapsulé aux murs extérieurs en béton d'une maison unifamiliale de taille moyenne dans les zones climatiques de Californie 3 (San Francisco, CA) et 9 (Los Angeles, CA) a été examinés par Thiele *et al.* [12]. L'ajout de MCP miro-encapsulé aux parois extérieures en béton d'une résidence unifamiliale de taille moyenne, peut conduire à des économies d'énergie annuelles significatives à San Francisco et à Los Angeles. Dans l'ensemble, la réduction annuelle de la charge de refroidissement variait de 85% à 100% et de 53% à 82% à San Francisco et à Los Angeles, respectivement, la fraction volumique de MCP passant de 0,1 à 0,3. Une simulation numérique du comportement thermique transitoire d'une paroi de mortier contenant un matériau de changement de phase micro encapsulé (MCP) utilisant une méthode hybride volumes finis/enthalpie a été réalisé par Younsi *et al.* [13].

Le modèle présenté est bien adapté au comportement thermique d'un MCP encapsulé encastré dans un mur de mortier, et il est indiqué pour traiter des problèmes similaires. Dans le contexte de développement et l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment et la diminution de coût de consommation, nous avons étudié numériquement le problème d'un changement de phase non isotherme dans un mur composé d'un mélange de mortier et des microcapsules de MCP. Le MCP étudié est de la paraffine, la substance de ce dernier est non

pure, un mélange organique de C<sub>17</sub> et C<sub>18</sub>. La température de fusion du mélange se fait dans un intervalle  $\Delta T_f = [24,8 ; 26,86] \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## Formulation mathématique

Le système considéré est constitué d'un mur de mortier contenant des microcapsules de MCP. Il est représenté dans la figure ci-dessous.

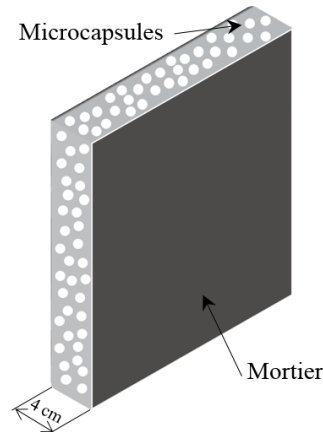


Figure 1 : modèle physique

Les microcapsules sont homogènes et uniformément réparties à l'intérieur du panneau mural. L'épaisseur de la paroi composite est faible par rapport à sa largeur et sa hauteur. Par conséquent, on suppose une variation de température unidimensionnelle. L'effet de convection dans le MCP fondu est négligé dû à la faible dimension des microcapsules. Le changement de phase dans le MCP est non-isotherme et se produit sur un intervalle de température de  $T_1$  à  $T_2$ . Le modèle mathématique est basé sur l'équation transitoire de conduction de chaleur unidimensionnelle.

L'équation d'énergie sous forme générale :

$$\mathcal{R} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{effe} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Où  $\mathcal{R} = (A + B)$

Avec :

$$B = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_1 \\ \rho_{pcm} \varepsilon M 2 T & \text{si } T_1 < T < T_2 \\ 0 & \text{si } T > T_2 \end{cases}$$

$$A = \begin{cases} (\rho_m (1 - \varepsilon) C_{Pm} + \rho_{pcm} \varepsilon C_{ps}) & \text{si } T \leq T_1 \\ (\rho_m (1 - \varepsilon) C_{Pm} + \rho_{pcm} \varepsilon N) & \text{si } T_1 < T < T_2 \\ (\rho_m (1 - \varepsilon) C_{Pm} + \rho_{pcm} \varepsilon C_{pl}) & \text{si } T \geq T_2 \end{cases}$$

$$N = C_{ps} + \frac{2C_{ps}T_1 - 2C_{pl}T_1 + l_f}{T_2 - T_1}$$

$$M = \frac{C_{pl} - C_{ps}}{T_2 - T_1}$$

Les conditions aux limites associées sont :

$$\text{à } x = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{ext}(T_{x=0} - T_{ext}) \quad \text{et à } x = l \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h_{int}(T_{x=l} - T_{int})$$

Les variations de température durant la journée des milieux extérieur et intérieur sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Les températures des milieux extérieur et intérieur

Temps (h)	0 – 4	4 – 10	10 – 14	14 – 20
T <sub>int</sub> (°C)	11.4	11.4 --- 39.4	39.4 --- 11.4°C	11.4
T <sub>ext</sub> (°C)	11.4	11.4 --- 39.4	39.4 --- 11.4°C	11.4

La condition initiale à t = 0  $T(x, 0) = T_0$

Nous adoptons le modèle parallèle comme modèle de conductivité thermique effective du panneau mural (mortier + MCP) :

$$k_{effe} = \varepsilon . k_{pcm} + (1 - \varepsilon) . k_m \quad (2)$$

## Modélisation numérique

L'équation gouvernante régissant le phénomène est résolue numériquement avec un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis avec un schéma totalement implicite. On prend un maillage uniforme composé de 70 nœuds. Le pas de temps est égal à 36s.

L'équation algébrique obtenue après discrétisation de l'équation de l'énergie est :

$$a_p T_p = a_W T_W + a_E T_E + a_p^0 \quad (3)$$

$$\text{Où } a_p = (a_W + a_E) + a_p^0; \quad a_E = \frac{k_{effe(e)}}{\delta x_e}; \quad a_W = \frac{k_{effe(w)}}{\delta x_w}; \quad a_p^0 = R \frac{Dx}{Dt}$$

Pour résoudre l'équation (3) on utilise l'algorithme de Thomas [14].

La sensibilité au maillage est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Sensibilité au maillage

Nombre de nœuds	40	50	60	70
T <sub>(2)</sub> (°C)	18.47317	18.48017	18.48431	18.48747
Erreur relative (%)	-	0.03789	0.0224	0.017

L'étude de sensibilité au maillage nous indique qu'un nombre de 70 nœuds est suffisant pour avoir un bon rapport précision/temps de calcul.

Une étude de validation qualitative avec des résultats expérimentaux [8] a été faite dans les mêmes conditions opératoires. Les résultats de cette étude nous montrent un bon accord qualitatif des densités de flux de chaleur. Du point de vue quantitatif, on remarque une différence qui est due aux propriétés utilisées dans le modèle numérique qui sont différentes des valeurs expérimentales (Fig.2).

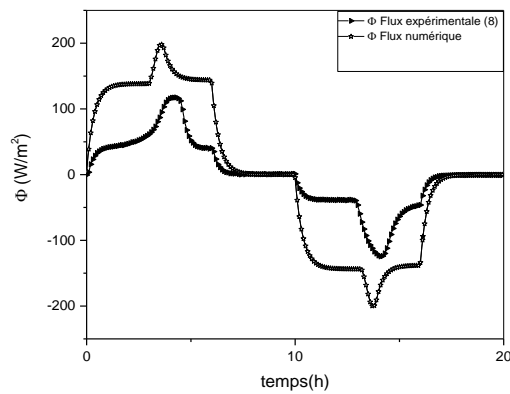


Figure 2 : Comparaison des valeurs du flux thermique du présent travail avec celles de [8]

## Résultats et discussion

La figure 3 représente la variation temporelle de la densité de flux ( $\phi$ ) pour différents pourcentages de MCP dans le panneau mural. Pendant les 4 premières heures, la densité de flux est nulle dans le mur puisque les températures de paroi sont égales à celles des milieux. Entre  $t=4$  heures et  $t=12$  heures,  $\phi$  augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale au-delà de laquelle elle diminue jusqu'à atteindre une valeur nulle. Dans ce cas la chaleur est stockée dans le mur. Entre  $t = 12$  heures et  $t = 14$  heures, la densité de flux reste nulle ; cette valeur est due au gradient de température entre la paroi et les milieux extérieur et intérieur qui est nul. Entre  $t=14$  heures et  $t=18$  heures, il y a réduction de la valeur de  $\phi$  suite au refroidissement progressif de la paroi. Entre  $t=18$  heures et  $t = 24$  heures, on remarque une augmentation de la densité de flux jusqu'à une valeur nulle à cause de la diminution du gradient de température entre la paroi et les milieux extérieur et intérieur. Le déstockage du mur, se produit entre  $t = 14$  heures et  $t =22$  heures. Durant les périodes de stockage et déstockage, on remarque des décalages verticaux et horizontaux des courbes. Les déviations horizontales sont dues à la variation de la conductivité thermique effective qui dépend du pourcentage de MCP contenu dans le mur,  $k_{eff}$  est inversement proportionnelle à la quantité de MCP. L'accroissement de la quantité de MCP dans le mur fait augmenter sa résistance thermique qui influe sur le processus de stockage et déstockage. Les déviations verticales sont dues à la variation dans la quantité stockée dans le mur. Cette quantité est liée au terme  $(\rho C_p)_{effe}$ . Le pourcentage de MCP affecte la quantité stockée et sont directement proportionnels.

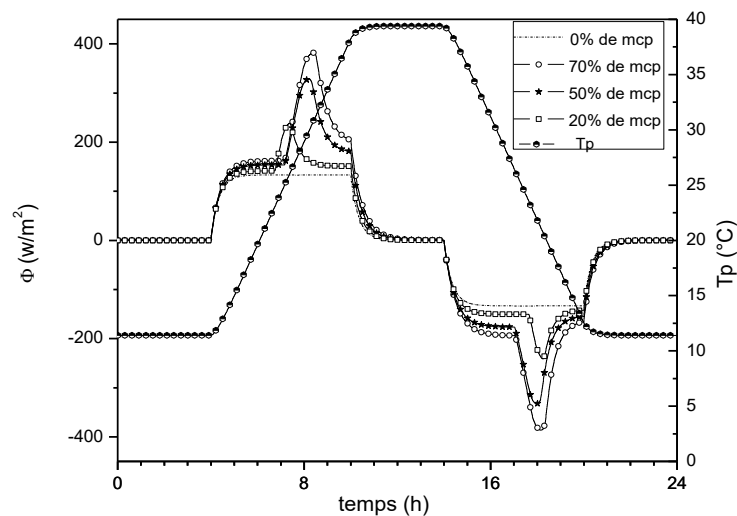


Figure 3. Variation temporelle de la densité de flux pour différents pourcentages de MCP

Pour étudier le comportement thermique de la paroi sous les conditions climatiques Algériennes, on doit simuler cette paroi selon des conditions réelles. La température du milieu intérieur est fixée à 24 °C, la température du milieu extérieur est fournie par les données météorologiques des zones étudiées [15].

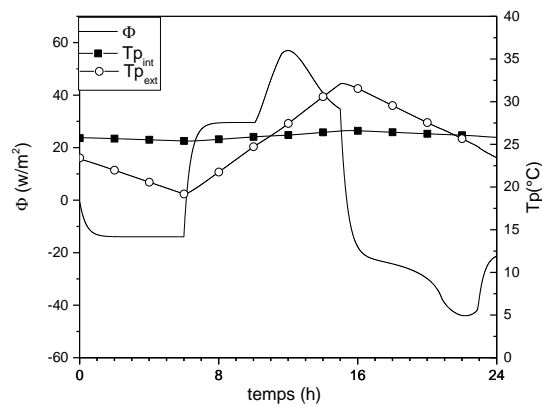


Figure 4. Températures de paroi et la densité de flux à Adrar, le 20 Avril.

La figure 4 représente les températures de paroi et la densité de flux à Adrar, le 20 Avril. De minuit jusqu'à 6 heures du matin le mur évacue de la chaleur à cause de la diminution de la température extérieure. Entre 6 heures du matin et 15 heures, le mur stocke de la chaleur sensible et latente, le stockage sensible est dû à l'augmentation de température durant la journée, le stockage latent causé par le changement de phase. Entre 15 heures et minuit, la température des parois diminue et le mur déstocke de la chaleur, sensible et latente. Le stockage dû au changement de phase se fait durant les heures où la température à travers le mur atteint la température du début de changement de phase, le déstockage se fait durant les heures où la température à travers le mur atteint la température de fin de changement de phase.

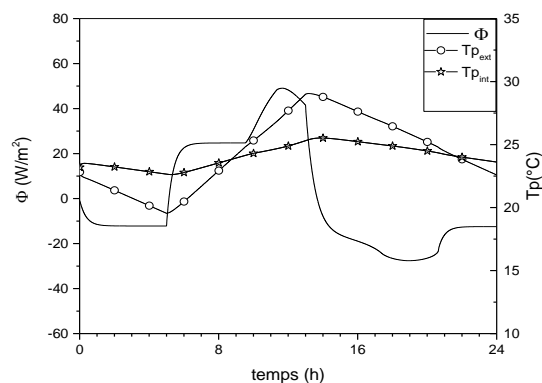


Figure 5. Températures de paroi et la densité de flux à Alger, le 20 Août.

La figure 5 représente les températures de paroi et la densité de flux à Alger pour la journée du 20 Août. Entre minuit et 5 heures du matin, les températures de paroi diminuent, le mur perd de la chaleur sensible. Entre 5 heures du matin et 13 heures, les températures de paroi augmentent, le mur stocke de la chaleur sensible et latente, le stockage sensible est dû à l'augmentation de température durant la journée, le stockage latent est causé par le changement de phase. Entre 13 heures et minuit, les températures de paroi diminuent et le mur déstocke de la chaleur, sensible et latente. Le stockage dû au changement de phase se fait durant les heures où la température à travers le mur atteint la température de début de changement de phase, le déstockage se fait durant les heures où les températures à travers le mur atteignent la température de fin de changement de phase

## Conclusion

Nous avons étudié numériquement le problème d'un changement de phase non isotherme dans un mur composé d'un mélange de mortier et des microcapsules de MCP. Le modèle mathématique que nous avons proposé est basé sur de nombreuses hypothèses. L'équation gouvernante régissant le phénomène est résolue numériquement avec un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis avec un schéma totalement implicite. Avant d'entamer les résultats nous avons validé notre code de calcul avec des résultats expérimentaux pour déterminer les états du système, nous avons utilisé la représentation de l'évolution temporelle de température et de la densité de flux, l'influence de pourcentage MCP ainsi que l'influence des conditions climatiques pour le cas d'un mur avec 20% MCP.

L'augmentation du pourcentage de MCP implique une diminution de la conductivité effective, donc une augmentation de la résistance thermique du mur. Cette dernière influe sur le processus de stockage et déstockage. La quantité stockée augmente aussi quand le pourcentage de MCP augmente. Le pourcentage de MCP dans le mur ne doit pas dépasser les 20%. D'un point vu thermique, on peut constater que le pourcentage optimal est de 20%.

Pendant l'hiver, l'intégration de MCP n'affecte pas le comportement thermique du mur, alors qu'en été il est affecté. Le stockage par chaleur latente est plus performant à Adrar qu'à Alger. La durée de stockage à Adrar est plus grande que celle d'Alger. Le MCP utilisé peut améliorer le confort thermique d'un bâtiment en Algérie durant l'été.

## Nomenclature :

$C_p$ :	Capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$k$ :	Conductivité thermique, $W.k^{-1}.m^{-1}$
$T$ :	Température, $^{\circ}C$
$\epsilon$ :	% volumique de MCP, -
$\rho$ :	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$g$ :	fraction liquide, -
$l_f$ :	chaleur latente, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Indice :	
1 :	début de fusion
2 :	fin de fusion
$effe$ :	effective
m:	mortier
s:	solide
l:	liquide
int:	Intérieur
ext:	Extérieur
E, P, W :	Respectivement à l'est, au centre et à l'ouest de nœud

## Références

- [1] Amine Boudghene Stambouli. Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15:1169–1181.
- [2] N. Zhu, Z. Ma, S. Wang, Dynamique characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review, *Energy Conversion and management*, vol. 50, pp. 3169-3181, 2009.
- [3] Diaconu, B.M. and M. Cruceru, Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings. *Energy and Buildings*, 2010. 42(10): p. 1759-1772.
- [4] Silva, T., et al., Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with MCP incorporation: A passive construction solution. *Energy and Buildings*, 2012. 49: p. 235-245.
- [5] Izquierdo-Barrientos, M.A., et al., A numerical study of external building walls containing phase change materials (MCP). *Applied Thermal Engineering*, 2012. 47: p. 73-85.
- [6] Zwanzig, S.D., Y. Lian, and E.G. Brehob, Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope. *Energy Conversion and Management*, 2013. 69: p. 27- 40.
- [7] Franquet, E., et al., Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated MCP. *Applied Thermal Engineering*, 2014. 73(1): p. 32-40.
- [8] Joulin, A., et al., Experimental investigation of thermal characteristics of a mortar with or without a micro-encapsulated phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 2014. 66(1-2): p. 171 180.
- [9] Jin, X., M.A. Medina, and X. Zhang, On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction. *Energy*, 2014. 73: p. 780-786.
- [10] Ghedamsi, R., et al., Contribution on Buildings Design with Low Consumption of Energy Incorporated MCPs. *Energy Procedia*, 2014. 50: p. 322-332.
- [11] Tittlein, P., et al., Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-MCP: Influence of the thermodynamical modelling. *Applied Energy*, 2015. 140: p. 269-274.
- [12] Thiele, A.M., et al., *Annual* energy analysis of concrete containing phase change materials for Building envelopes. *Energy Conversion and Management*, 2015. 103: p. 374-386.
- [13] Younsi, Z., H. Naji, and M. Lachheb, Numerical investigation of transient thermal behavior of a wall incorporating a phase change material via a hybrid scheme. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016. 78: p. 200-206.



[14] S.V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow By Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

[15] Archives météo : [https://rp5.ru/Archives\\_m%C3%A9t%C3%A9o\\_%C3%A0\\_Adrar\\_\(a%C3%A9roport\)](https://rp5.ru/Archives_m%C3%A9t%C3%A9o_%C3%A0_Adrar_(a%C3%A9roport))