



L'isolation Thermique de L'enveloppe des Bâtiments Par L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Necib. Hichem^{*1}, Saifi. Nadia^{#2}, Damene. Djamila^{#2}, Settou. Noureddine^{#2}

^{*} Université de Kasdi Merbah Département de Génie des Procédés, BP 511, 30000 Ouargla

¹n.hichem1@gmail.com

[#] Université de Kasdi Merbah, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (LVPRS) BP 511,
30000 Ouargla

Résumé —: L'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments se traduit par la réduction de la consommation de l'énergie électrique utilisée pour la climatisation pendant les mois d'été, surtout dans les régions chaudes telles que la région de Ouargla. Dans cet article une étude du comportement thermique ainsi que l'optimisation par simulation numérique d'une brique contenant un matériau à changement de phase (MCP) est réalisée. Des conditions climatiques réelles, de température et de radiation solaire de la région de Ouargla sont utilisées comme conditions aux limites. Plusieurs paramètres influant sur l'efficacité d'isolation thermique de cette brique tel que ; le type de MCP, la géométrie du récipient du MCP, l'effet du rapport surface/volume et l'emplacement du MCP dans la brique sont optimisés. Les résultats montrent que la brique améliorée réduit de 86.87% le flux de chaleur entrant au milieu intérieur et par conséquent réduit, d'une même portion, le besoin à la consommation de l'énergie électrique utilisée par la climatisation, et diminue le pic de la consommation de cette énergie dans le réseau national pendant les périodes de charge de pointe.

Mots-clés : Confort thermique, Matériaux à Changement de Phase (MCP), isolation thermique, Maitrise d'énergie.

I. INTRODUCTION

Actuellement, le confort thermique constitue une demande reconnue et justifiée dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant passant les trois quarts de son temps à l'intérieur. Cette demande est soutenue par des normes et des réglementations qui permettent d'assurer la conformité des ambiances intérieures aux exigences du confort thermique. Or, la recherche des ambiances thermiques intérieures uniformes et confortables, conformément aux normes, tout au long de l'année et sans tenir compte des particularités du climat, du site, des bâtiments... est accompagnée par une multiplication des installations climatiques, entraînant ainsi des fortes consommations d'énergie, d'origine fossile essentiellement, épuisable et polluante.

D'après SONALGAZ le pic de consommation d'énergie électrique, qui atteint 7718 MW [1] pendant la période estivale est due à l'utilisation massive de la climatisation dans le Sud-Algérien ; à cause des conditions climatiques spécifiques caractérisé par des températures élevées pendant plusieurs mois de l'année. L'une des meilleures façons utilisée pour diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment demeure la réduction des pertes et par conséquent, l'amélioration de l'isolation thermique des parois.

L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) introduits dans l'enveloppe des bâtiments absorbe une grande quantité de chaleur durant les heures chaudes de la journée et se transforme progressivement de l'état solide à l'état liquide d'une façon isotherme, ce qui empêche l'entré du flux de chaleur à l'intérieur des habitats et favorise l'isolation thermique. Durant les heures de la nuit la température baisse au-dessous de la température de fusion du MCP, ce dernier dégage de la chaleur dans l'enveloppe du bâtiment et redevient solide pour qu'il recommence le cycle de fusion/solidification durant les 24 heures suivantes.

Les matériaux à changement de phase (MCP) utilisés en isolation thermique sont enfermés dans des briques ou encapsulés et mélangés avec les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment [2]. Necib .H et al [3] ont optimisés une brique améliorée contenant trois couches de MCP de type différentes dans des creux cylindriques, ils ont utilisés des conditions climatiques réelles de la région de Ouargla. Ils ont réussi à améliorer l'isolation thermique de la brique jusqu'à 71.53%. Le type, l'emplacement et l'effet de la quantité et de la géométrie des récipients de MCP ont été étudiés par Esam M. Alawadhi [4, 5], il a comparé plusieurs types de géométries : cylindrique et conique et il atteint une réduction maximale du flux entrant au milieu intérieur jusqu'à 39%. D'une autre part, la micro-encapsulation des MCP à permet d'introduire ces dernier dans les matériaux de construction des bâtiments jusqu'à un rapport de masse de 60% [6]. Athienitis et al. [7] a comparé le comportement thermique de deux types



de revêtement mural en gypse, avec et sans MCP. Il a conclu que le gypse avec MCP réduit la température maximale aux milieux interne jusqu'à 4°C et réduit, par conséquent le besoin en chauffage pendant la nuit. Une étude expérimentale similaire de Kuznik F et Virgone J [8] à montrée une diminution de 4.2 °C de la température maximale.

Le but de cette étude est l'optimisation et l'analyse thermique d'une brique contenant un matériau à changement de phase pour mieux isoler les habitats dans les régions chaudes et arides. Pour cela, une simulation numérique bidimensionnelle est réalisée à travers le logiciel commercial Fluent, d'une brique contenant un MCP dans des récipients de géométries différentes. Le type, la géométrie, le rapport surface/volume ainsi que l'emplacement du MCP sont optimisés pour obtenir une réduction maximale de flux de chaleur traversant la brique et par conséquent réduire l'échauffement à l'intérieur des habitats.

II. PROBLEMATIQUE ET ANALYSE

La Figure. 1 montre les différentes géométries du récipient du MCP dans une brique de dimensions : 48cm x 30cm x 25cm. Le rayon du trou cylindrique contenant le MCP

(Figure.1.e) est égal à 3cm, ce qui signifie que le volume du cylindre est égal à 706.86 cm³. Quatre autres géométrie, en plus du cylindre ont été étudiées, ils ont le même volume du cylindre. Une variation du rapport de longueur L1/L2 fait varié le type de la géométrie du récipient d'un rectangle (parallélépipède) pour L1/L2 = 1 à un triangle (Tétraèdre) pour L1/L2 =0. La hauteur des récipients « b » reste constante pour les quatre géométries, elle est égale à 6 cm. La surface externe de la brique est exposée simultanément à un flux convectif (hout = 20 w/m²°C) et une radiation solaire; les deux varient en fonction du temps. Le taux total du transfert thermique entre l'air et la paroi extérieure de la brique est la somme du flux convectif et la radiation solaire [9]. La paroi intérieur est exposée à un flux convectif naturel (hin = 10 w/m²°C) dont la température de l'air en contact avec la face interne de la brique doit satisfaire les conditions de confort. Il faut noter que, basé sur le principe du confort thermique, les occupants des bâtiments dans un endroit sec et à des conditions climatiques chaudes restent a l'aise, même à une température élevée jusqu'à 30°C [10, 11]. Dans cette étude on a imposé une température interne égale à 27°C.

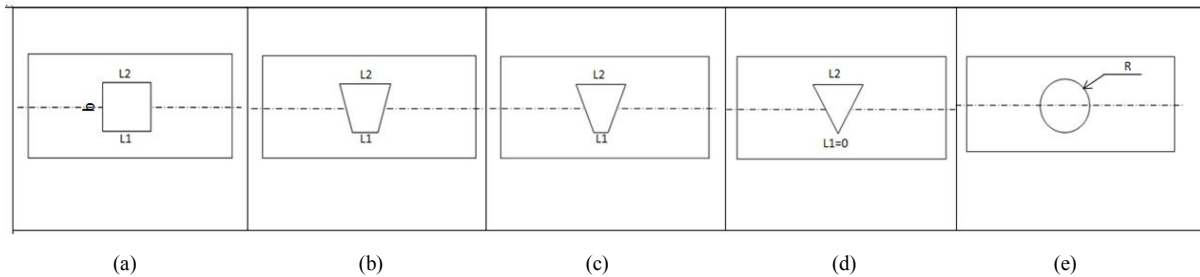


Figure. 1 Géométrie de la brique contenant le MCP dans différents forme de récipients

A. Description des Conditions Climatiques d'Ouargla

Les mesures de température et de radiation solaire sont réalisées en mois de Juillet à la ville de Ouargla, ils sont présentés sur la Figure 2. Cette ville est située à 31,56 ° N de latitude, 5.24 ° E de longitude, et avec une altitude de 139 m. En fait, Ouargla est caractérisée par un climat chaud et sec pendant la période estivale. En été, les mois les plus chauds sont Juillet et Août avec une température maximale variant entre 47 °C et 52 °C et une température minimale variant entre 26 °C et 27 °C. L'oscillation des températures de l'air en Juillet entre le jour et la nuit peut atteindre 20 °C. Dans cette période de l'année, l'air est sec avec une humidité minimale de 14,1%.

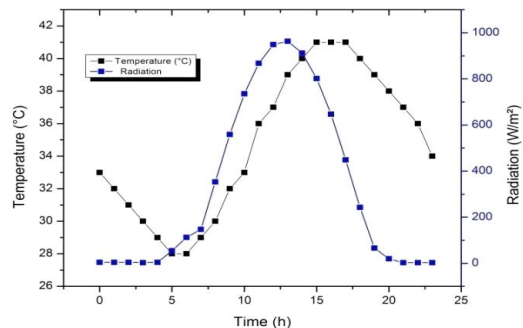


Figure. 2 Variation horaire de la radiation solaire et de la température ambiante pour le mois de Juillet dans la région de Ouargla.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



B. Model Numérique et Conditions aux Limites

La simulation numérique est effectuée par le code commercial Fluent. Le maillage est optimisé en variant le nombre des volumes fins. Le flux de chaleur traversant la brique avec MCP de trois maillages de densités différentes ; 4982, 14936, et 19035 volumes sont comparés et les résultats indiquent que la différence entre le premier et le troisième maillage est inférieure à 1%. Par conséquent, le premier maillage est adopté pour toutes les simulations numériques. Le schéma de second ordre Upwind a été utilisé pour résoudre l'équation de l'énergie. La condition à la limite de la paroi extérieure de la brique qui représente une variation temporelle de température et de radiation solaire est introduite dans le code Fluent par l'utilisation de la fonction « *User Defined Function UDF* ». Les propriétés thermophysiques des MCP et de la brique utilisés dans cet article sont présentées dans tableau 1. Le modèle d'enthalpie-porosité utilisée pour résoudre les problèmes de solidification et de fusion dans Fluent a été validé préalablement par plusieurs études [12-14].

Les équations mathématiques qui régissent le phénomène physique de la fusion/solidification dans le MCP sont:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S \quad (1)$$

Où h est l'enthalpie, T la température, ρ la densité, u_i les composant de la vitesse de fluide, et S le terme source.

L'enthalpie du matériau en cas de changement de phase est calculée par la somme de l'enthalpie sensible et la chaleur latente:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT + \beta L_f \quad (2)$$

Dont h_{ref} est l'enthalpie de référence mesurée à une température de référence T_{ref} . C_p représente la chaleur spécifique et L_f la chaleur latente de fusion.

La fraction liquide β peut être définie comme :

$$\beta = 0 \quad \text{Si } T < T_i \\ \beta = 1 \quad \text{Si } T > T_{liq} \\ \beta = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \quad \text{Si } T_{sol} < T < T_{liq} \quad (3)$$

Où

T_i : température de solidification et T_{liq} : température de fusion du MCP

Les hypothèses suivantes sont prises en considération :

- Pas de production de chaleur donc $S = 0$.
- La dilatation thermique des MCP et de la brique n'est pas prise en considération dans la simulation.
- La densité et la conductivité thermique du MCP sont considérés constantes pour la phase solide et liquide. Une valeur moyenne est assumée pour le cas où on a un changement de phase [13].
- La convection naturelle du MCP en état liquide est négligés. Cependant toutes les particules ont une vitesse nulle.

Alors l'équation (1) peut être écrite comme suit:

$$\left[\rho C_p + \frac{\rho L_f}{T_{liq} - T_{sol}} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

TABLEAU. 1
PROPRIETE THERMOPHYSIQUE DE LA BRIQUE ET DES MCP UTILISES DANS CET ARTICLE

Compound	Melting temp, T_m (°C)	Heat of fusion, (kJ kg-1)	Specific heat capacity, C_p (kJ kg-1 K-1)	Thermal conductivity, k (Wm-1 K-1)	Density, (kg m-3)
Brick	-	-	0.84	0.7	1600
P116-Wax	47	225.0	2.4 (solid), 1.9 (liquid)	0.24 (solid), 0.24 (liquid)	830 (solid), 773 (liquid)
n-Eicosane	37	241.0	2.01 (solid), 2.04 (liquid)	0.15 (solid), 0.15 (liquid)	778 (solid), 856 (liquid)
Paraffin wax	32	251	1.92(solid) 3.26(liquid)	0.514 (solid) 0.224 (liquid)	830
CaCl ₂ .6H ₂ O	29.9	187	2.2 (liquid) 1.4 (solid)	0.53 (liquid) 1.09 (solid)	1530 (liquid) 1710 (solid)
n-Octadecane	27.7	243.5	2.66 (liquid) 2.14 (solid)	0.148 (liquid) 0.190 (solid)	785 (liquid) 865 (solid)

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Choix du Type de MCP

Pour un récipient de géométrie cylindrique situé au centre de la brique on a comparé cinq types de MCP de différents température de fusion (voir tableau.1). Le flux de chaleur en (W/m^2) entrant au milieu intérieur à travers la brique en 24 heures est montré dans la figure.3. Les résultats montrent que le CaCl₂ 6H₂O d'une température de fusion de 29.9°C donne la meilleure isolation. La fusion de ce dernier au cours des heures chaudes de la journée empêche une grande quantité de

chaleur à traverser le mur en brique et par conséquent réduit la température de la surface interne de la brique. Pour ses deux phases liquide ou solide le CaCl₂ 6H₂O reste un bon isolant. La brique contenant ce type de MCP garde ses capacités d'isolation même s'il n'y aura pas un changement de phase.

B. Effet de la Géométrie du Conteneur du MCP

La figure.4 montre la variation du flux de chaleur entrant à travers une brique creux de différentes géométries situé au centre, remplis avec du CaCl₂ 6H₂O. Une cavité cylindrique (cercle) est comparée avec d'autres géométries (trapèze isocèle) dont le rapport de longueur $L1/L2$ vari de 1, 0.5, 0.25,



et 0. Les résultats montrent que la cavité d'un rapport $L1/L2 = 0.25$ donne la meilleure isolation. La réduction du flux total en 24 heures par rapport à une brique sans MCP pour cette géométrie est de 53.33% (voir figure.5), par contre elle est de 50.35% pour un cercle (cylindre) et 52.92% , 50.91%, 49.89% pour les rapports de longueur $L1/L2 = 0, 0.5$ et 1 respectivement.

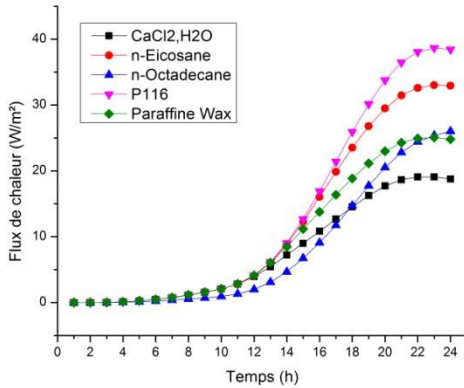


FIGURE. 3 L'effet de différents types de MCP sur l'isolation thermique de la brique

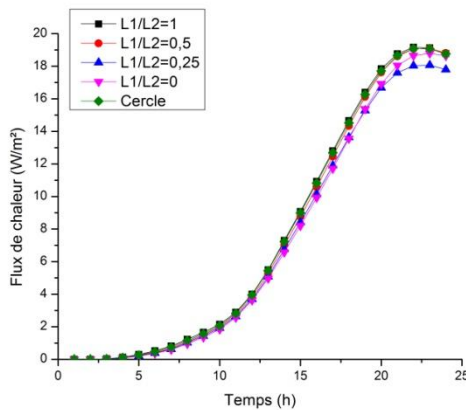


Figure.4 Flux de chaleur entrant au milieu interne pour différents géométries du conteneur du MCP

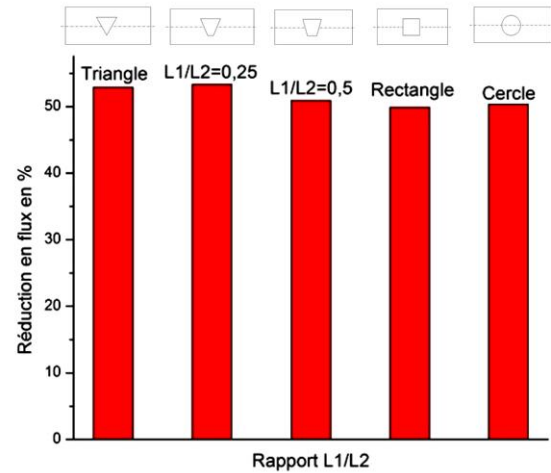


Figure.

5 Flux de chaleur réduit par rapport à une brique sans MCP

C. Effet du Rapport Surface/Volume Sur L'isolation de la Brique

Le rapport surface/volume est un facteur très important qui favorise ou non le transfert de chaleur [15]. L'augmentation de la surface de contact entre le MCP et la brique favorise le transfert de chaleur et par conséquent réduit le temps de changement de phase. Un changement de phase rapide de l'état solide à l'état liquide, pendant les heures chaudes de la journée rend le MCP inactif durant un temps important et ne permet pas une isolation efficace (le MCP est déjà en état liquide, au début de la journée, malgré que la température à l'extérieur augmente toujours). Par contre, si le temps de changement de phase est beaucoup plus important à cause de la surface d'échange réduite, la fusion du MCP ne sera jamais complète et une quantité du MCP reste inactif en état solide. Une combinaison entre la surface d'échange et la quantité de MCP définie par le volume du récipient de ce dernier (rapport surface/volume) est très importante pour maximiser l'isolation thermique par chaleur latente de la brique avec l'utilisation d'une quantité minimale du MCP, se qui optimise le coût de la brique améliorée.

Pour augmenter le rapport surface/volume dans la brique on a multiplié le nombre des cavités en gardant le même volume total du MCP introduit dans la brique. Le tableau. 2 montre les cas étudiés.

TABEAU. 2

LES CAS ETUDIÉS DU RAPPORT SURFACE/VOLUME

Nombre de cavité par brique (figure. 1.c)	L1 en cm	L2 en cm	L1/ L2	Surface d'échange totale des cavités en cm ²	Volume total de la cavité contenant le MCP en cm ³	Rapport Surf/Volu cm-1
1	1,88	7,54	0,25	136,14	706,86	0,19
2	0,94	3,77	0,25	204,49	706,86	0,29
3	0,63	2,51	0,25	275,20	706,86	0,39



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



4	0,47	1,88	0,25	346,54	706,86	0,49
---	------	------	------	--------	--------	------

La figure. 6 montre la variation du flux en fonction du temps pour quatre rapports surface/volume qui sont: 0.19 cm^{-1} pour 1 MCP, 0.29 cm^{-1} pour 2 MCP, 0.39 cm^{-1} pour 3 MCP et 0.49 cm^{-1} pour 4 MCP. Les résultats montrent que le flux traversant la brique contenant du $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans des creux d'une forme d'un trapèze isocèle et dont le rapport de ses deux bases est $L_1/L_2 = 0.25$ est minimal lorsque le rapport surface/volume est égal à 0.39 cm^{-1} , ce qui correspond à insérer le MCP dans trois trous dans la brique. Une réduction maximale de 81.11% du flux total entrant au milieu intérieur par rapport à une brique sans MCP est remarquée pour cette configuration (voir figure. 7). Pour un même rapport surface/volume (0.39 cm^{-1}) la configuration cylindrique du récipient du MCP réduit de 74.93% le flux total, plus moins que le trapèze isocèle d'une portion de 6.18%. Il est à noter que l'efficacité d'une brique avec 4 MCP est aussi importante, elle réduit le flux total durant 24 heures jusqu'à 80.63%.

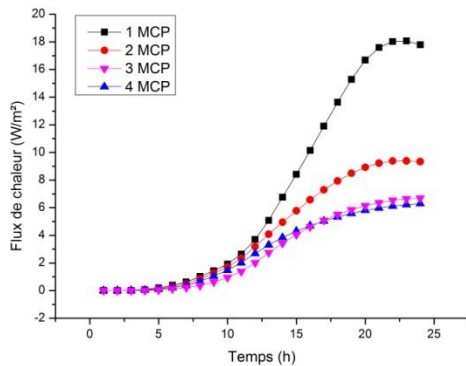


Figure. 6 Effets du rapport surface/volume sur le flux entrant à travers la brique pour $L_1/L_2=0.25$

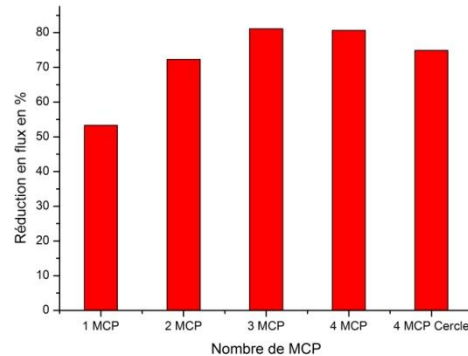


Figure. 7 réduction du flux total entrant à travers la brique améliorée par rapport à une brique sans MCP pour ($L_1/L_2=0.25$)

D. Effet de la position du MCP

L'effet de la position du MCP sur l'isolation thermique de la brique est étudié pour 3 et 4 MCP dont le rapport surface/volume est respectivement : 0.39 et 0.49 cm^{-1} . Les dispositions $H/2$, $H/4$ et $3H/4$ des trous contenant le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ près de l'interface extérieure de la brique ont un effet important sur la réduction du flux total traversant la brique. La position $H/4$ (présentée par des lignes continues dans la figure. 8) pour un rapport surface/volume égal à 0.49 cm^{-1} (4 MCP) donne la meilleure isolation thermique de 86.87% par rapport à une brique sans MCP (voir figure. 9 et 10).

La figure. 11 montre une comparaison de la variation en 24 heures de la température moyenne sur la paroi interne entre :

- la brique optimisée : brique contenant du $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans 4 creux d'une forme d'un trapèze isocèle et dont le rapport de ses deux bases est $L_1/L_2 = 0.25$, disposés à $H/4$ loin de la paroi extérieure
- une brique contenant du $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans 4 creux d'une forme d'un cylindre, disposés à $H/4$ loin de la paroi extérieure
- une brique pleine sans MCP

Pendant que la brique avec des creux cylindriques diminue la température de la paroi interne de 3.1°C par rapport à une brique sans MCP, la brique optimisée diminue cette température de 3.68°C . La température maximale qui est égale à 27.46°C de la face intérieure de la brique optimisée atteinte durant une journée chaude pendant les moins d'été garantie un certain confort à l'intérieur des habitats et par conséquence, la consommation de l'énergie utilisée par la climatisation est minimale.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012

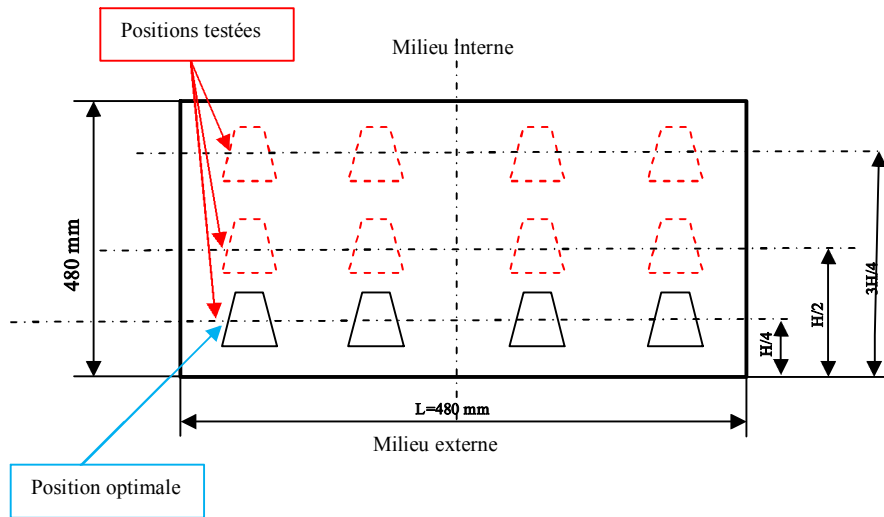


Figure. 8 Position des trous contenant le MCP dans la brique

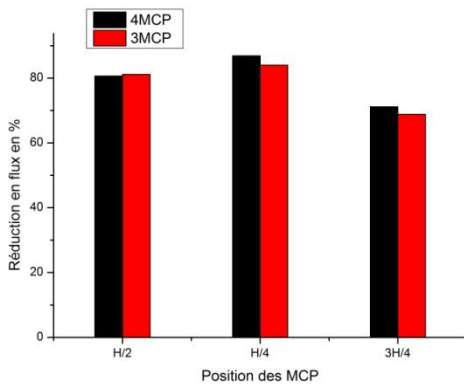


Figure. 9 Effet de la position du MCP dans la brique pour 3 et 4 trous

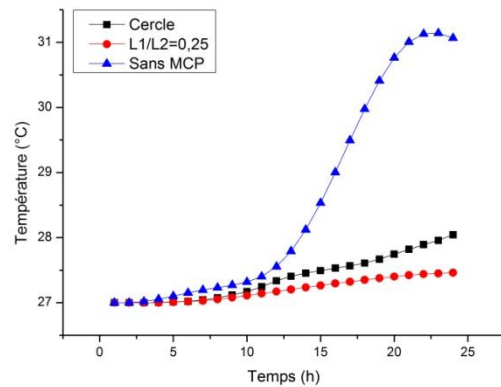


Figure. 11 Variations de la température moyenne sur la paroi interne de la brique optimisée (4 trous remplis du $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disposés à $H/4$ loin de la paroi extérieure)

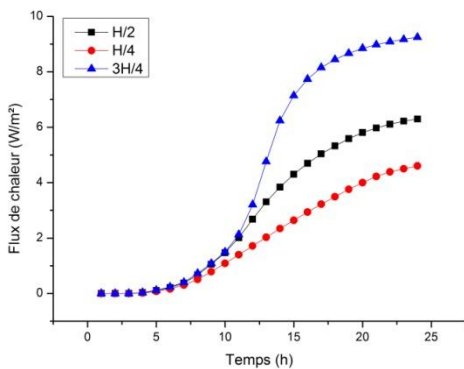
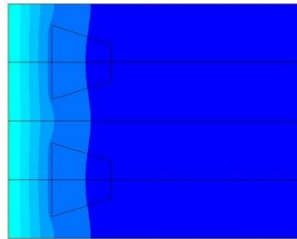


Figure. 10 Variation du flux moyen à travers la surface interne d'une brique contenant du $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dans 4 trous pour trois positions : $H/4$, $H/2$ et $3H/4$

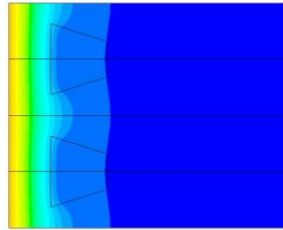
La figure. 12 montre la distribution de la température durant les heures: 9h, 12h, 15h, 18h et 21h à l'intérieur d'une brique munie de quatre creux d'une forme d'un trapèze isocèle et dont le rapport de ses deux bases est $L1/L2 = 0.25$, disposés à $H/4$ près de la surface extérieure de la brique. La face droite dans la figure représente la face extérieure, la face gauche est la partie à l'intérieur et les deux faces supérieures et inférieure sont des axes de symétries. D'après les résultats on remarque que les creux remplis de MCP frein l'augmentation et la pénétration de la température vers le milieu intérieur. Cette remarque est plus claire sur les figures b, c et d pour les



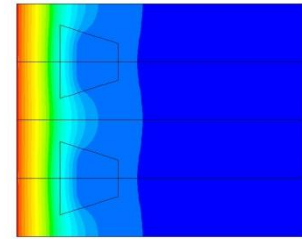
temps 12h, 15h, et 18h respectivement, dont la température à l'extérieur atteint ses valeurs maximales.



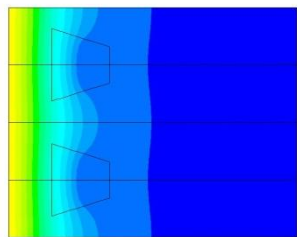
(a) 9h 27.07 à 36.55°C



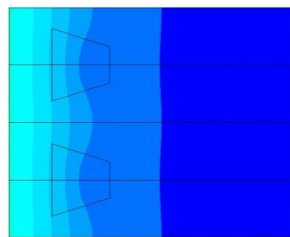
(b) 12h 27.17 à 51.2°C



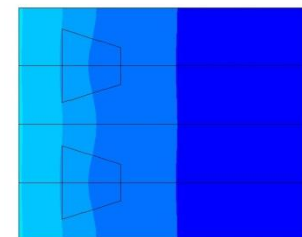
(c) 15h 27.26 à 56.46°C



(d) 18h 27.35 à 48.3°C



(e) 21h 27.42 à 36.35°C



(f) 24h 27.46 à 33.12°C

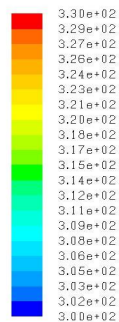


Figure. 11 Distribution de température dans la brique durant les heures (a) 9h, (b) 12h, (c) 15h, (d) 18h et (e) 21h

IV. CONCLUSIONS

Une étude du comportement thermique ainsi que l'optimisation par simulation numérique d'une brique contenant un matériau à changement de phase (MCP) est réalisée. Des conditions climatiques réelles, de température et de radiation solaire de la région de Ouargla sont utilisées comme conditions aux limites. Plusieurs paramètres influant sur l'efficacité d'isolation thermique de cette brique tel que ; le type de MCP, la géométrie du récipient du MCP, l'effet du rapport surface/volume et l'emplacement du MCP dans la brique sont optimisés. Les résultats montrent que la brique améliorée diminue la température de la paroi interne de 3.68°C et

réduit de 86.87% le flux de chaleur entrant au milieu intérieur par rapport à une brique sans MCP. Par conséquent, le besoin à la consommation de l'énergie électrique utilisée par la climatisation est réduit de la même portion, ce qui diminue le pic de la consommation de cette énergie dans le réseau national pendant les périodes de charge de pointe.

REFERENCES

- [1] Société algérienne de l'électricité et du gaz SONALGAZ, "Newsletter presse" N°09- août 2010.
- [2] Medved S, Arkar C. "Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage". Energy and Buildings, 2008;40(4):429-37.



Le 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 2nd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012



- [3] Necib. H, Settou. N, Damene. D, Saifi. N, Kholai. O, “*Brick Enhancement with phase change material (PCM) to improve thermal insulation in the hot and dry south Algerian regions*”, International Renewable Energy Congress, December 20-22, 2011 – Hammamet, Tunisia, in *Proc IREC*, paper ID54, p. 313.
- [4] Esam M. Alawadhi, “*Thermal analysis of a building brick containing phase change material*”, Energy and Buildings 40 (2008) 351–357.
- [5] Esam M. Alawadhi, Hashem J. Alqallaf, “*Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study*”, Energy Conversion and Management 52 (2011) 2958–2964.
- [6] Suresh B. Sadineni, Srikanth Madala, Robert F. Boehm, “*Passive building energy savings: A review of building envelope components*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3617–3631
- [7] Athienitis AK, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D. “*Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage*”, Building and Environment 1997;32(5):405–10.
- [8] Kuznik F, Virgone J. “*Experimental assessment of a phase change material for wall building use*”, Applied Energy 2009;86(10):2038–46.
- [9] Y. A. Cengel, ‘*Heat Transfer: A Practical Approach*’, 2nd ed., McGraw-Hill, 2003. ISBN 0072458933
- [10] N. Fergus, ‘*Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics*’, Energy and Buildings 36 (2004) 628–637.
- [11] N. Fergus, M. Humphreys, ‘*Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*’, Energy and Buildings 34 (2002) 563–572.
- [12] E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan, ‘*Numerical and experimental study of melting in a spherical shell*’, Int. J. Heat Mass Transfer 50 (2007) 1790–1804.
- [13] Gideon Susman, Zahir Dehouche, Tanawat Cheechern., Salmaan Craig, ‘*Tests of prototype PCM ‘sails’ for office cooling*’, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 717e726.
- [14] V. Antony Aroul Raj, R. Velraj, ‘*Heat transfer and pressure drop studies on a PCM-heat exchanger module for free cooling applications*’, International Journal of Thermal Sciences 50 (2011) 1573e1582.
- [15] Satish G. Kandlikar and Michael R. King, “*Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*”, 2006 Elsevier Ltd.