

Etude tridimensionnelle de la performance du stockage latent solide-liquide dans le secteur bâtiment

Auteurs : Nidhal Ben Khedher , Sassi Ben Nasrallah
*Université de Monastir, École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Laboratoire d'Études des Systèmes
Thermiques et Énergétiques LESTE, Avenue Ibn El Jazzar 5019, Monastir, TUNISIE
Nidhal.ben.khedher@gmail.com*

Résumé : L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les matériaux de construction est considérée comme innovation pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments. Le choix du MCP le plus approprié est fondé sur certain nombre des facteurs incluant sa chaleur latente, sa conductivité, la nature de matrice poreuse des parois du bâtiment (porosité, propriétés thermophysiques), les conditions météorologiques du lieu et le prix de MCP. L'objectif de cette étude est l'analyse numérique tridimensionnelle de la performance thermique comportement d'un local bâti par des briques poreuses contenant un matériau à changement de phase (MCP-brique). Ce local se situe dans la ville de Gafsa du sud tunisien. Le MCP-brique est supposé être un milieu poreux saturé avec du MCP. L'équation d'énergie de changement de phase dans le milieu poreux est discrétisée par la méthode de volume de contrôle à base des éléments finis (CVFEM). L'équation algébrique obtenue est résolue par le solveur itératif Gradient Bi-Conjugué Stabilisé.

Mots clés :

MCP-brique, milieu poreux, simulation tridimensionnelle, changement de phase, CVFEM

1. Introduction

Un moyen de réduire la consommation d'énergie est d'utiliser des dispositifs de stockage. Les caractéristiques des bâtiments conçus pour faire usage du stockage thermique doivent inclure différents moyens ou dispositifs techniques permettant d'accroître la masse thermique. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour le stockage seul ou peuvent servir également d'éléments de structure. La capacité thermique d'un bâtiment devrait être suffisante pour stabiliser de grandes variations quotidiennes de température et pour augmenter le déphasage entre les pics des températures intérieure et extérieure.

Les constructions en matériaux massifs tels que la pierre peuvent permettre de s'approcher de cet objectif. Cependant, les bâtiments actuels utilisent de plus en plus des structures légères et il serait intéressant que ces structures puissent servir aussi d'éléments de stockage. Ceci peut être réalisé en y incorporant des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en profitant de leur chaleur latente de changement d'état qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. Intégré dans les parois de bâtiment, la présence de matériau à changement de phase (MCP) joue le rôle de régulateur de température grâce à sa capacité à stocker et restituer la chaleur de manière déphasée : durant la saison estivale ses caractéristiques permettent de ralentir la montée en température intérieure d'un local par le stockage de la chaleur au fur et à mesure de la journée permettant d'éviter les pics de chaleur. Le confort thermique est ainsi amélioré.

L'utilisation des MCP pour la climatisation et le chauffage des bâtiments a donné lieu à de nombreux travaux de recherche durant les dernières décennies et on peut trouver les principaux résultats dans plusieurs articles de revue [1], [2], [3].

L'incorporation de MCP dans les composants de construction a déjà été réalisée de plusieurs façons :

- par incorporation directe ou par imprégnation du matériau de construction
- par incorporation de capsules remplies de MCP dans les éléments de construction
- par une fabrication de panneaux contenant des MCP pour remplacer les murs ou les cloisons classiques
- par incorporation dans un échangeur pour améliorer les performances d'un système de climatisation.

Ce travail s'inscrit dans cette thématique et a l'objectif d'évaluer la performance d'une brique poreuse contenant un matériau à changement de phase (MCP-brique). Une Série de simulations numériques tridimensionnelles ont

été effectuées afin d'analyser le potentiel de la MCP-brique. Lors de la sélection d'un MCP approprié, la température intérieure moyenne doit être proche de la plage de fusion / solidification. En outre, les fluctuations de température (jour et nuit) doivent permettre le changement de phase du matériau. De nombreux facteurs interviennent dans le choix du MCP: les conditions météorologiques du lieu de bâtiment, la structure du bâtiment et les propriétés thermo physiques. Dans ce sens, Des simulations numériques ont été alors effectuées permettant l'étude des effets du type MCP sur la température intérieure du local.

2. Modélisation

2.1 Modèle mathématique

Le système considéré dans ce travail est une brique supposée être un milieu poreux constitué d'une phase solide inerte et rigide (matrice brique), initialement saturée par un matériau à changement de phase.

Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'échange de chaleur entre la brique poreuse remplie avec MCP et le milieu environnant.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont prises en considération :

- le milieu poreux est homogène et isotrope.
- La matrice poreuse et le MCP sont en équilibre thermique local
- Le changement de volume causé par le changement de phase de MCP est négligeable.
- Toutes les propriétés thermophysiques de toutes les phases sont indépendantes de la température, mais elles diffèrent d'une phase à une autre.
- La conduction est le mécanisme fondamental qui régit le transfert de chaleur pour les systèmes de stockage d'énergie thermique latente [4], [5].

Le système d'équations aux dérivées partielles décrivant le changement de phase du milieu poreux est obtenu par prise de moyenne volumique des équations microscopiques sur le volume élémentaire représentatif.

- L'équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho C_p T}) + \overline{\rho_1 C_{pl}} \overline{v_1} \text{grad}(T) = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) - \overline{\rho_1} L_H \varepsilon \frac{\partial f}{\partial t} \quad (1)$$

L_H est la chaleur latente de fusion de MCP et ε la porosité de la brique

Compte tenu du changement de phase isotherme, la fraction liquide est mise à jour de manière itérative à chaque volume de contrôle P en utilisant cette formule [6].

$$f^{k+1} = f^k + \frac{A_p (T_p - T_m)}{\rho_l L_H \varepsilon} \quad (2)$$

Avec la condition

$$f^{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } f^{k+1} > 1 \\ 0 & \text{if } f^{k+1} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

où A_p est le coefficient qui apparait dans l'équation d'énergie discrétisée et T_m la température de fusion.

La densité moyenne et de la chaleur spécifique sont définies comme suit:

$$\overline{\rho} = \sum_k \varepsilon_k \rho_k \quad \text{et} \quad \overline{C_p} = \frac{1}{\overline{\rho}} \sum_k \varepsilon_k \rho_k C_k \quad (4)$$

Pour la conductivité thermique effective λ_{eff} , le modèle de conductivité pondérée (ou modèle de résistance parallèle) définie ci-dessous est employé.

$$\lambda_{\text{eff}} = \sum_k \varepsilon_k \lambda_k \quad (5)$$

Le code développé est destiné pour évaluer la température intérieure. Cette dernière est déterminée à partir de l'équation de la conservation d'énergie de l'air à l'intérieur du local :

$$\rho_a C_p V_a \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^N Q_{p,\text{int}} + Q_{\text{app}} + Q_{\text{Renouvel}} + Q_{\text{fenêtre}} \quad (6)$$

Avec :

$Q_{\text{fenêtre}}$: Le flux de transfert de la chaleur à travers la fenêtre

Q_{Renouvel} : Déperditions par renouvellement d'air

$Q_{p,\text{int}}$: Le flux de chaleur convectif échangé entre l'air et les faces intérieurs des murs

Q_{app} : Les apports thermiques internes

V_a : volume de local

Les expressions de ces termes sont les suivantes :

$$Q_{p,int} = h_{int}(T_{p,int} - T_{int})A_{p,int} \quad (7)$$

$$Q_{Renouvel} = \frac{\rho_a C_p \cdot \beta \cdot (T_{ext} - T_{int})}{3600} \quad (8)$$

avec β le taux de renouvellement d'air

$$Q_{fen\hat{e}tre} = U_{int} (T_{ext} - T_{int}) A_{fen\hat{e}tre} \quad (9)$$

Avec U_{int} coefficient de transmission global à travers la fen\hat{e}tre.

Q_{apport} : L'apport thermique du b\hat{a}timent est la somme des flux de chaleur d\hat{e}gag\ee par les appareils et par les occupants.

3. Simulation num\erique :

Les \e{quations \e{tablies, avec les conditions initiales et aux limites ont \e{t\ee r\esolus num\eriquement en utilisant la m\ethode de volume de contr\ole \`a base des \e{l\ements finis (CVFEM) ([7], [8]). Le volume de contr\ole V_c est la r\eeunion de tous les subvolumes Ω_b correspondant \`a chacun des \e{l\ements finis triangulaires entourant le n\oeud consid\er\ee

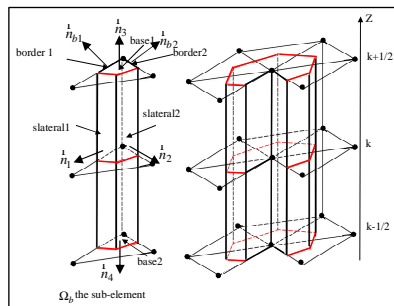


Figure 1 : Volume de conrole et le subvolume

4. R\esultats num\eriques

L'efficacit\ee de brique imbib\ee avec MCP est \e{valu\ee en r\eepr\esentant l'\e{volution de la temp\erature int\erieure durant trois jours d'\e{t\ee (Juillet 2011) d'une pi\eece typique qui se trouve dans une ville du sud tunisien (Gafsa). Les dimensions de cette pi\eece sont 5.0m (longueur) \times 3.0m (largeur) \times 3.0m (hauteur). Les dimensions de brique poreuse sont r\eepr\esent\ees sur la figure 2. Le taux de chaleur d\hat{e}gag\ee par les \e{quipements et les occupants sont estim\ees \e{gale \`a 100W.

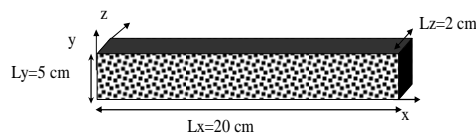


Figure 2 : Repr\esentation de la MCP brique poreuse

Les donn\ees m\eteorologiques d'une journ\ee estivale typique de mois de juillet pour une ville de sud tunisien (Gafsa) sont prises de la station m\eteorologique de Gafsa et utilis\ees pour la simulation num\erique. La variation de la temp\erature de l'air ext\erieur et la radiation solaire sont r\eepr\esent\ees au niveau de la Figure 3.

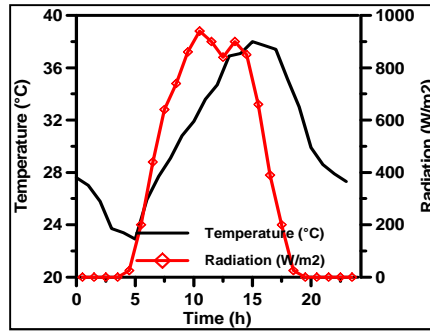


Figure 3 : La variation de la température de l'air extérieur et la radiation solaire pour une journée estivale typique de mois de juillet (Gafsa 2011)

4.1 L'influence de MCP type

La figure 4 montre l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du local pour trois types de MCP. La température de fusion de chacun de ces MCPS se trouve dans la plage de température de fonctionnement. Chlorure de Calcium hexa hydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), n-Eicosane, n-Octadécane sont choisis dans cette étude comme des MCPs potentiels. Les propriétés thermo physiques de ces derniers sont illustrées dans le tableau 1. La température extérieure d'une journée estivale typique varie entre 23°C et 50°C. La température de l'air intérieur pour une pièce bâtie avec des briques ordinaires (sans MCP) est voisine à la température extérieure, avec un petit décalage du temps dû à l'inertie thermique basse de la pièce. Alors que l'ajout de MCP aux briques permet une réduction remarquable des fluctuations de température de la pièce. Les températures de fusion de N-octadécane et Chlorure de calcium hexahydraté (CCHH) sont proches de la limite inférieure de températures de fonctionnement. Ce pendant la température de fusion de N-Eicosane se trouve au milieu de plage de température de fonctionnement. Il est montré que bien qu'ils aient tous presque la même chaleur latente de fusion, la brique de N-Eicosane est thermiquement plus performante que les deux autres types de MCPs.

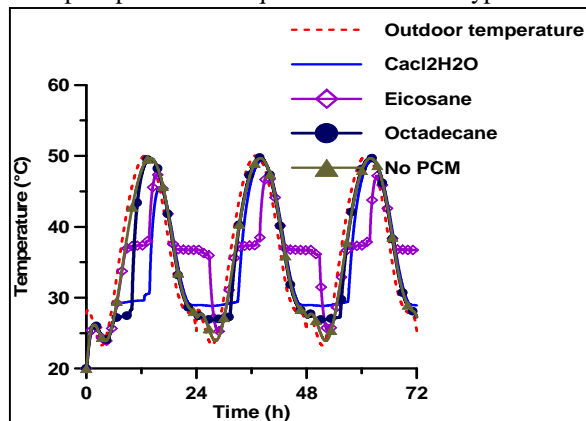


Figure 4: Température de l'air intérieur pour trois types de MCP

Tableau 1 : Propriétés thermiques de la brique et de MCPs

Material	T_m (°C)	λ (W/m°C)	C_p (KJ/Kg°C)	ρ (Kg/m3)	$L_{H\text{MCP}}$ (kJ/°c)
brique	-	0.7	0.84	1600	-
n- Octadecane	27	0.385(solide), 0.148(liquide)	1.934(solide), 2.196(liquide)	865 solide 780 liquide	243.5
n-Eicosane	37	0.15 (solide), 0.15 (liquide)	2.01 (solide), 2.04 (liquide)	778 solide 856 liquide	241
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29	1.09 (solide), 0.54 (liquide)	2.4 (solide), 2.04 (liquide)	1710 solide 1500 liquide	164

Afin de bien comprendre le comportement de N-Eicosane imbibée dans la brique, nous avons présenté les distributions tridimensionnelles de la température et de la saturation pour des différents instants du premier jour (Figure 5).

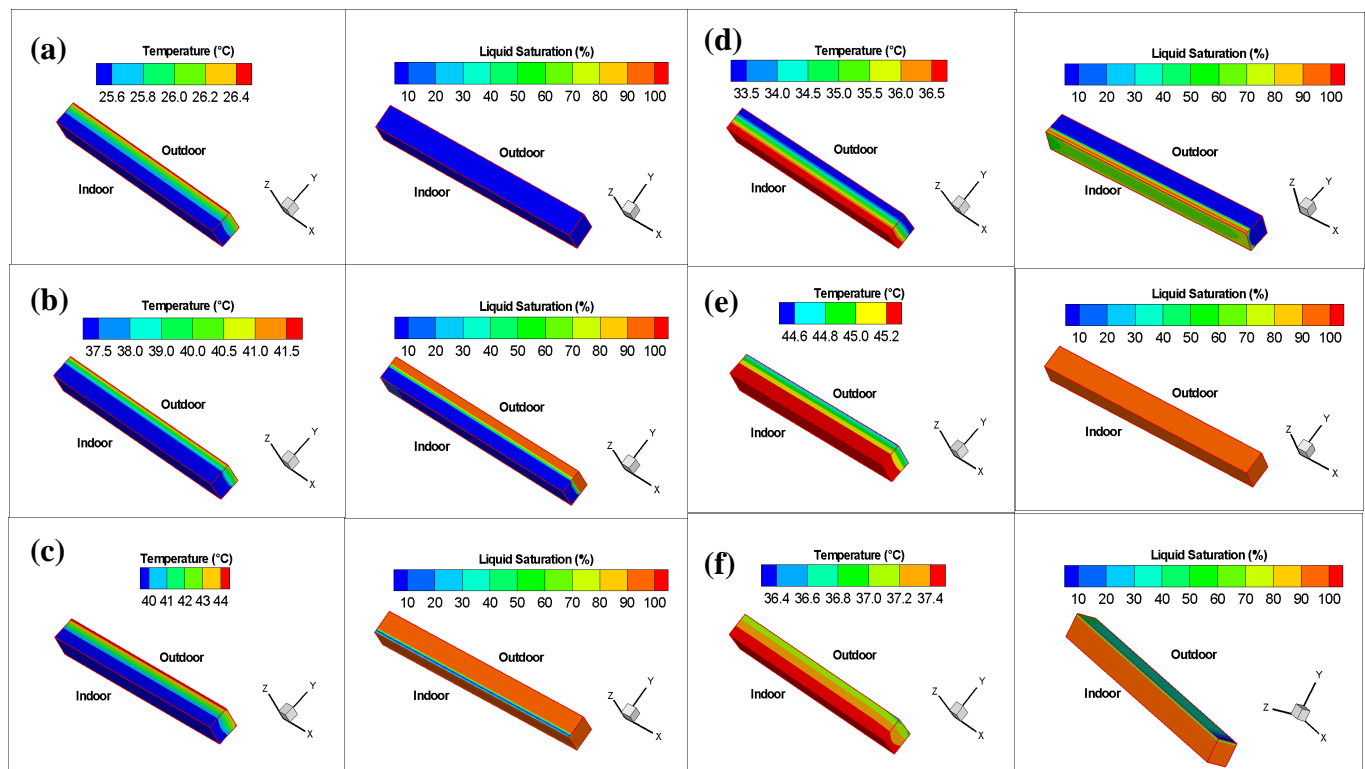


Figure 5 : Champs de Température et de saturation (fusion de MCP), (a) 6h, (b) 10h, (c) 13h
(Solidification de MCP), (d) 6h, (e) 10h, (f) 13h

Conclusion

L'étude décrite dans cette communication fait partie d'un projet dont l'objectif final est de permettre une régulation passive de la température intérieure d'un bâtiment. La solution proposée pour y parvenir est l'incorporation un matériau à changement de phase dans la brique. On a évalué numériquement les performances de MCP imbibé dans des briques poreuses sur l'état de confort de bâtiments. Parmi les conclusions qui peuvent être tirées on a:

- ✓ L'intégration d'un matériau à changement de phase dans les matériaux de construction réduit d'une façon remarquable le flux de chaleur qui traverse le local, et une température intérieure dans la zone de confort est obtenue.
- ✓ la brique avec de l' N-Eicosane, thermiquement, est la plus performante pour les applications de climatisation passive de l'habitat pour le climat du sud tunisien.

Références

- [1] A.M., Khudair, M.M., Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 45, 263 – 275, 2004.
- [2] V.V Tyagi, D. Buddhi, MCP thermal storage in buildings: A state of the art, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11, 1146 – 1166, 2007.
- [3] D. Zhou, C.Y Zhao, Y. Tian, , Review on energy storage With Phase Change Materials (MCPs) in building applications, *Applied Energy*, 92, 593-605, 2012.
- [4]V. Alexiades, A.D. Solomon, *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
- [5] P. Jyan Trelles, John J. Dufly, “Numerical simulation of porous latent heat thermal energy storage for thermoelectric cooling”, *Applied Thermal Engineering*, 23:pp.1647-1664, 2003.
- [6]A.D Brent, V. R Voller, and K.J Reid “Enthalpy-porosity technique for modelling convection-diffusion phase change: application to the melting of pure metal,” *Numerical Heat Transfer*13, 297-318, 1988.
- [7] BR. Balliga, SV. Patankar, “A new finite-element formulation for convection–diffusion problems,” *Numer Heat Transfer*,3:393–409,1980.
- [8] BR. Balliga, SV. Patankar, “A control-volume finite element method for two-dimensional fluid flow and heat transfer”, *Numerical Heat Transfer*, 6: pp.245–256, 1983.