

Study of storage thermal energy of latent heat Application to the solar collector

Salwa Bouadila*, Mehdi Fteiti, Mouhamed Mehdi Ouslati,
Amen Allah Guizani and Sassi Ben Nasrallah

Process Engineering Laboratory, Research and Technologies Center of Energy
Technopole Borj Cedria, P.O. 95 Hammam Lif, Tunisia

(reçu le 28 Octobre 2010 – accepté le 25 Mars 2011)

Abstract - *The energy production provided by a heat excess or discontinuous source (solar, waste heat...) involve the utilization of a thermal storage in the thermodynamic or recuperation chain. These last years, studies on thermal storage systems have been developed in order to bring technical and economic elements. The study includes two parts. The first one concern a numerical analysis of a latent-heat thermal energy storage unit is conducted. The element of storage is a rectangular closed cavity filled with a phase change material (PCM) initially at the solid state. At $t = 0$ a heat flux is applied through one of the vertical walls of the cavity. Other one, experimental steady treats a new type of solar collector was developed and tested to valid numerical models.*

Résumé - *Les nouvelles techniques de stockage et d'utilisation des matériaux à changement de phase sont nécessaires pour la récupération des différentes énergies alternatives (récupération de l'énergie des installations industrielles géantes, stockage d'énergie électrique pour le chauffage pendant les heures de pointe,...). Nous sommes intéressés au stockage thermique latent dans le but d'améliorer le rendement thermique des capteurs solaires pour le chauffage de l'eau sanitaire. Le travail effectué comprend une étude numérique des problèmes de la fusion et de la solidification des matériaux à changement de phase, complétée par une application expérimentale qui consiste à la réalisation d'un capteur solaire stockeur.*

Keywords: Storage - Solar collector - MCP - latent heat - Melting - Solidification.

1. INTRODUCTION

Les systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente, dans lesquels on utilise des matériaux à changement de phase, font l'objet de nombreux travaux. De nouvelles techniques de stockage et d'utilisation sont nécessaires pour la récupération des différentes énergies alternatives (énergie solaire, géothermique, éolienne,...).

Sharmaa *et al.* [1], a récapitulé des travaux de recherche sur ce sujet en examinant les systèmes de stockage avec des matériaux à changement de phase 'MCP' et leurs applications dans le domaine de solaire, de l'isolation des bâtiments et l'aérospatiale. Il a aussi présenté les techniques de mesure de la chaleur latente et de la température de fusion.

Kurklu *et al.* [2], ont réalisé un nouveau type de capteur solaire qui présent deux sections: la première est remplie avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase dont la température de fusion est située entre 45 - 50 °C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée avec un ensoleillement élevé, la température du réservoir est maintenue à 30 °C pendant toute la nuit. De plus les valeurs de l'efficacité thermique instantanée étaient entre environ 22 % et 80 %.

* salwa.bouadila@crten.mrt.tn

Mettaweea *et al.* [3], ont présenté une conception, une réalisation et une étude expérimentale d'un système compact de capteur solaire- matériaux à changement de phase 'MCP'. L'énergie solaire a été stockée dans la paraffine solide, et a été déchargée dans l'eau froide entrant dans des tubes à l'intérieur de la cire. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient moyen de transfert thermique augmente avec l'épaisseur de la couche de paraffine fondue, qui est dû à la convection naturelle.

Les problèmes de changement de phase solide-liquide présente un intérêt remarquable dans de nombreux secteurs. Pour des configurations réelles, généralement plus complexes, la résolution exacte est pratiquement impossible. Par conséquent, le recours à des méthodes de calcul numérique devient indispensable.

Une attention particulière a été accordée à ce genre de problèmes, on peut citer les travaux de Lacroix *et al.* [4], concernant une étude numérique et analytique d'un système de stockage d'énergie thermique, où les éléments de l'accumulation d'énergie sont formés par des tubes cylindriques.

Laouadi *et al.* [5], également, ont étudié numériquement un système basé sur une fusion et la solidification cyclique du matériau à changement de phase.

Bellecci *et al.* [6], considéré comme un module de stockage de chaleur latente thermique où le PCM est rempli entre deux tubes cylindriques coaxiaux. D'autres travaux liés à ce sujet existent dans les références suivantes [7-9].

2. ETUDE THEORIQUE

Les processus de fusion et de solidification sont caractérisés par la présence d'une interface mobile entre les phases solide et liquide. Pour des configurations réelles, généralement plus complexes, la résolution exacte est pratiquement impossible. Par conséquent, le recours à des méthodes de calcul numérique devient indispensable.

Au cours de cette partie, nous allons présenter la formulation mathématique et la discrétisation des différentes équations par la méthode des volumes de contrôles à base d'éléments finis 'MVCEF' en utilisant un maillage structuré.

2.1 Formulation du problème

2.1.1 Géométrie du problème étudié

Le problème considéré est schématisé sur la figure 1. Il s'agit d'une enceinte rectangulaire contenant un matériau à changement de phase pur initialement à l'état solide. Trois parois sont adiabatiques (en contact avec un isolant thermique) et la paroi verticale gauche est exposée à un flux de chaleur uniforme.

2.1.2 Hypothèses générales

La formulation de ce problème est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices: hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et aux problèmes de changement de phase. Nous avons considéré les hypothèses suivantes:

H1: Le problème est de géométrie bidimensionnelle.

H2: Les propriétés physiques sont supposées constantes, sauf la masse volumique dans les forces de volumes (approximation d'Oberbeck-Boussinesq).

H3: Le liquide est supposé newtonien et incompressible.

H4: L'écoulement est laminaire.

- H5: Les dissipations visqueuses et les travaux de compression sont négligeables.
 H6: Le transfert de chaleur par rayonnement est supposé négligeable.
 H7: Les propriétés physiques sont les mêmes dans les deux phases.
 H8: Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables.
 H9: Le matériau à changement de phase est supposé parfaitement pur (pas de bulles d'air emprisonnées).
 H10: Le changement de phase est isotherme.
 H11: Le matériau à changement de phase est homogène et isotrope.
 H12: Aucune fraction solide du matériau à changement de phase ne se détache dans l'écoulement (pas de particules en suspension).

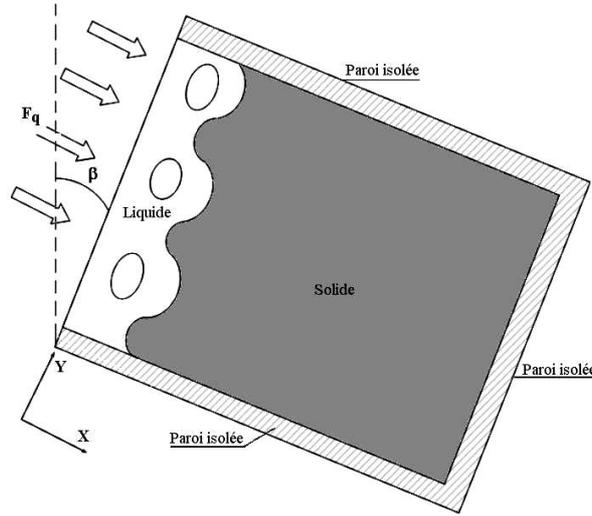


Fig. 1: Représentation du domaine

2.1.3 Système d'équations adimensionnelles

Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

Equation de conservation de quantité de mouvement

$$\frac{\partial U}{\partial F_0} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} - S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial F_0} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + \text{Ra} \times \text{Pr} \times \theta - S_v \quad (3)$$

Equation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) - \frac{1}{\text{Ste}} \frac{\partial f_I}{\partial F_0} \quad (4)$$

Les variables adimensionnelles sont définies comme suit:

$$\theta = \frac{T - T_f}{(Q_0 \times L / k)} \quad , \quad F_0 = \frac{\alpha \times t}{L^2} \quad , \quad (X, Y) = \frac{(x, y)}{L} \quad ,$$

$$(U, V) = \frac{(u, v) \times L}{\alpha} \quad , \quad P = \frac{L \times p}{\alpha^2 \times \rho} \quad \text{et} \quad q = \frac{Q}{Q_0}$$

Les termes source S_u et S_v sont obtenus à partir de la loi de Carman-Koseney et s'expriment respectivement par:

$$S_u = C \times \frac{(1 - f_1)^2}{(\zeta + f_1^3)} \times U \quad \text{et} \quad S_v = C \times \frac{(1 - f_1)^2}{(\zeta + f_1^3)} \times V$$

C et ζ sont des constantes et les valeurs sont: soit $C = 1.6 \times 10^6$ et $\zeta = 10^{-3}$.

3. RESULTATS NUMERIQUES

3.1 Etude de la fusion et la solidification d'un MCP dans une enceinte rectangulaire

Nous étudions la fusion et la solidification d'un matériau à changement de phase 'MCP' dans une cavité inclinée; on va imposer un flux échelon (Fig. 2).

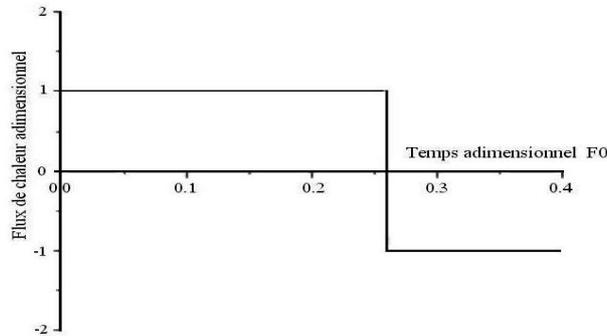


Fig. 2: Flux échelon

A partir des résultats numériques, on constate qu'au cours de la fusion et après avoir dépassé une phase où la conduction est dominante, la convection intervient et joue un rôle dans le déplacement et la déformation de l'interface. En effet, le liquide fondu le plus chaud monte par convection naturelle en haut de la cavité, le transfert de chaleur est ainsi plus important dans les zones les plus hautes de la cavité, ce qui favorise donc la fusion, et par suite l'avancement de l'interface.

Durant le processus de la solidification l'interface solide/liquide se déplace vers le côté supérieur froid de l'enceinte (Fig. 3), le gradient de température dans la phase liquide diminue et la vitesse de la solidification augmente. Finalement, l'interface solide/liquide atteint un maximum en fonction de temps et le transfert de chaleur par conduction à partir de la phase solide diminue progressivement, de même le déplacement du front de fusion

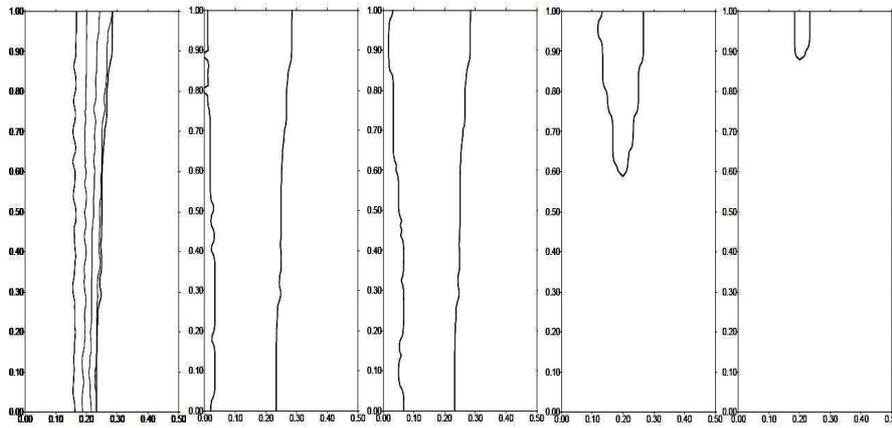


Fig. 3: Front de fusion pour $\beta=45^\circ$, $Ra=10^5$, $Pr=10$, $Ste=1$, $A=2$
 $F_0=0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.26, 0.27, 0.28, 0.30, 0.31, 0.33$

La figure 4 illustre les lignes de courants durant la fusion et la solidification. Elle montre que la convection est accentuée dans la zone liquide et qu'un régime bicellulaire aura lieu au début de processus.

La distribution non uniforme de la chaleur à l'intérieur de la cavité provoque une augmentation de la vitesse de déplacement du front de solidification de la partie gauche de l'enceinte (paroi refroidie) et se déplace plus lentement à droite.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Plusieurs configurations de systèmes de stockage de l'énergie solaire, nous allons adopter dans cette étude expérimentale celle d'un capteur solaire couplé avec deux éléments de stockage (Fig. 5). Nous avons réalisé, un capteur solaire avec deux cavités de stockage intégrées entre l'absorbeur et l'isolant, l'une contient la paraffine et l'autre contient paraffine avec limaille de fer.

4.1 Effet de la paraffine sur la température de sortie du capteur

Pour illustrer l'effet de l'élément stockeur sur la température de sortie du capteur, nous allons étudier le comportement de la température au cours de la période de la charge à partir du 8 h : 30 min jusqu'à 14 h : 30 min pendant les journées 6 et 7 Mai.

La figure 6 montre la variation de la température de l'eau à la sortie du capteur pour la journée du 7 Mai. On remarque que la température de l'eau atteint sa valeur maximale vers 13 h, et qui est égale à 75°C , tandis que l'ensoleillement atteint son maximum ($E = 860 \text{ W/m}^2$) à 12 h.

Donc, un temps de réponse supplémentaire de l'ordre de 1 heure pour le capteur est nécessaire pour que la température de l'eau soit maximale. Ce retard est dû à l'inertie de la paraffine dans les deux éléments de stockage intégrés dans le capteur.

Sur la figure 7, nous avons représenté l'évolution de la température de l'eau à la sortie du capteur stockeur pour la journée du 6 Mai. Cette figure montre que pendant les intervalles de temps où le ciel est nuageux, la température de l'eau à la sortie du capteur

ne diminue pas avec l'ensoleillement, et cela est dû à l'énergie thermique stockée dans la paraffine, qui a permis de fournir la chaleur à l'eau pendant le temps de fluctuation de l'ensoleillement.

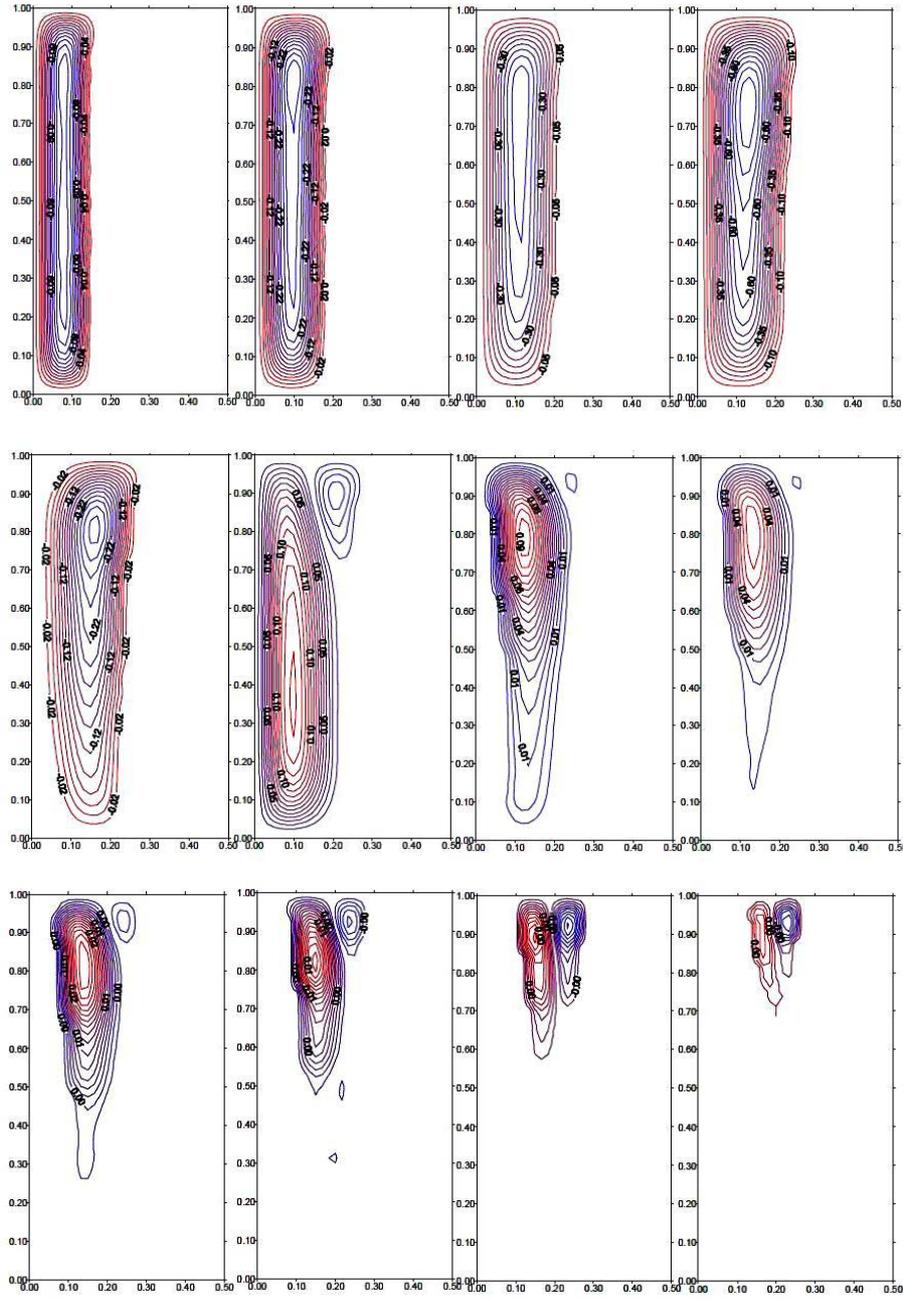


Fig. 4: Ligne de courant pour $\beta=45^\circ$, $Ra=10^5$, $Pr=10$, $Ste=1$, $A=2$
 $F_0=0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.26, 0.27, 0.28, 0.30, 0.31, 0.33$

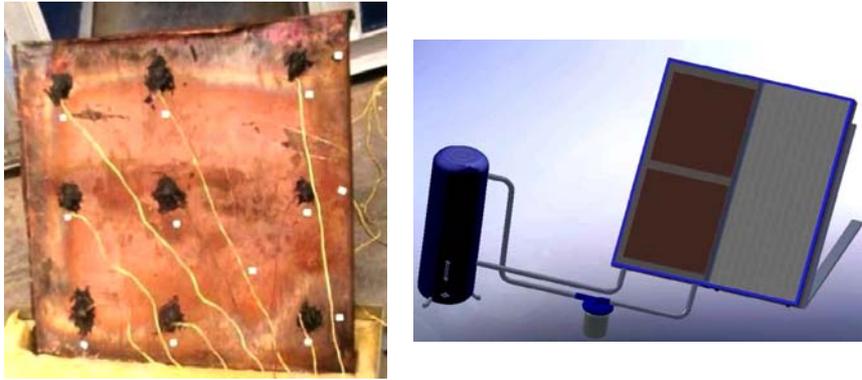


Fig. 5: Dispositif expérimental

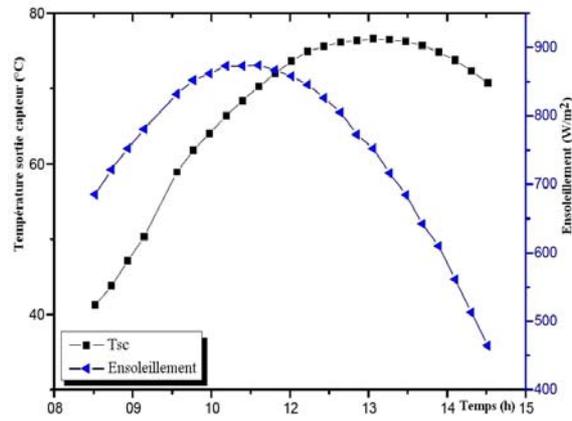


Fig. 6: Ensoleillement et température de sortie capteur (07/05/2010)

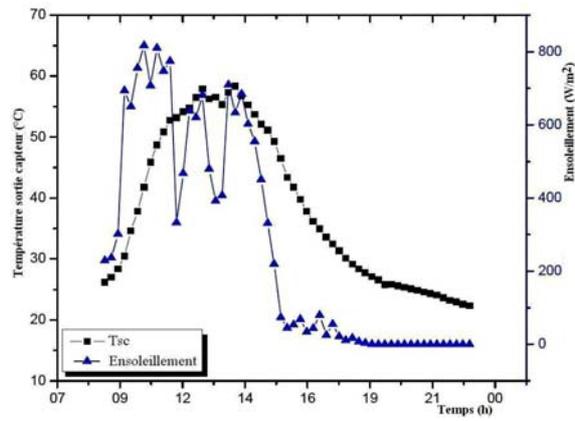


Fig. 7: Ensoleillement et température de sortie capteur (06/05/2010)

NOMENCLATURE

L	Chaleur latente de fusion, kJ.kg^{-1}	T_f	Température de référence, K
K	Conductivité thermique, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Q_0	Flux de chaleur de référence
f_l	Fraction liquide locale	F_0	Temps adimensionnel
Pr	Nombre de Prandtl	α	Diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
Ra	Nombre de Rayleigh	ρ	Masse volumique, kg.m^{-3}
Ste	Nombre de Stefan	ν	Viscosité dynamique, kg.m.s^{-1}
S_u, S_v	Composants de terme source	β	Coefficient d'expansion
$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}$	Coordonnée adimensionnelle	$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix}$	Vitesse adimensionnelle

REFERENCES

- [1] A. Sharma, V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi, 'Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Vol. 13, N°2, pp. 318 – 345, 2009.
- [2] A. Kurklu, A. Ozmerzi and S. Bilgin, 'Thermal Performance of a Water-Phase Change Material Solar Collector', *Renewable Energy*, Vol. 26, N°3, pp. 391 – 399, 2002.
- [3] E.B.S. Mettaweaa and G.M.R. Assassab, 'Experimental Study of a Compact PCM Solar Collector', *Energy*, Vol. 31, N°14, pp. 2958 – 2968, 2006.
- [4] M. Lacroix, 'Study of the Heat Transfer Behavior of Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, N°8, pp. 2083 - 2092, 1993.
- [5] A. Laouadi and M. Lacroix, 'Thermal Performance of Latent Heat Energy Storage Ventilated Panel For Electric Load Management', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, n°2, pp. 275 - 286, 1999.
- [6] C. Bellecci and M. Conti, 'Transient Behaviour Analysis of a Latent Heat Thermal Storage Module', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, N°15, pp. 3851 - 3857, 1993.
- [7] V.G. Jariwala, A.S. Mujumdar and M.E. Weber, 'The Periodic Steady State for Cyclic Energy Storage in Paraffin Wax', *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 65, N°6, pp. 899 - 906, 1987.
- [8] M. Hasan, A.S. Mujumdar and M.E. Weber, 'Cyclic Melting and Freezing', *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, N°7, pp. 1573 - 1587, 1991.
- [9] Z.X. Gong and A.S. Mujumdar, 'Enhancement of Energy Charge-Discharge Rates in Composite Slabs of Different Phase Change Materials', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, N°4, pp. 725 - 733, 1996.