

## Réponse dynamique d'un lit fixe pour le stockage de l'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase

A. Benmansour\*

Laboratoire de Mécanique Appliquée, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,  
B.P. 1505 El-M'Naouer, Oran, Algérie

(reçu le 17 Mars 2009 – accepté le 21 Juin 2009)

**Résumé** - L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement et numériquement les performances transitoires d'un lit fixe rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase, 'MCP'. Un modèle théorique bidimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Considérant à la fois les dispersions thermiques axiales et radiales, ce modèle est résolu par une méthode implicite aux différences finies. Il a permis de prédire la distribution de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur et pour un large domaine de nombres de Reynolds.

**Abstract** - The objective of the present study is to investigate the transient performances of a packed bed thermal energy storage system, which is randomly packed with spheres having uniform sizes and encapsulated the phase change material (PCM). A two dimensional separate phases formulation is used to develop a numerical analysis of the transient response of the bed, considering the influence of both axial and radial thermal dispersion. This model is solved by an implicit finite difference method. It allows predicting the bed performance as well as fluid and phase change material temperature distribution along the bed for both charge and recovery modes and a broad range of Reynolds numbers.

**Mots clés:** Réponse dynamique - Performance - Lit fixe - Matériau à changement de phase - Stockage énergétique - Récupération de chaleur - Sphères.

### 1. INTRODUCTION

Le développement des systèmes de stockage de l'énergie thermique, qui soit à la fois très utile et préservant l'environnement, est devenu une nécessité pour faire face à la demande croissante en énergie.

Depuis quelques années, des efforts considérables ont été orientés vers l'étude du phénomène de stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente utilisant les matériaux à changement de phase. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume.

Cet intérêt a fait l'objet d'un certain nombre de travaux théoriques et expérimentaux [1-8]. La plupart des modèles précédents supposés que la porosité, la vitesse et le coefficient de transport étaient constants dans toute la section du lit [9, 12]. Cependant les mesures ont montré que la porosité et la vitesse moyenne du fluide présentaient des variations radiales significatives [6].

Récemment, dans une analyse de ce type de stockage, nous avons mis en évidence l'influence des paramètres dynamiques et thermiques du fluide sur l'évolution de la

---

\* benmans@univ-usto.dz

température du MCP le long du lit, dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur, [10, 11]. Les spécifications d'une unité de stockage de la chaleur utilisant la cire de paraffine comme support de stockage a été aussi étudiée.

Dans ce travail, notre contribution consiste à étudier expérimentalement et numériquement les performances transitoires, telles que la durée du stockage, l'efficacité et le rendement thermique d'un lit fixe de forme cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune de la cire de paraffine (MCP) comme support de stockage, traversé par un flux d'air.

Des expériences ont été menées afin de mesurer la distribution de la température du fluide et du MCP à l'intérieur du lit, pour différentes positions axiales et radiales et une température d'entrée du fluide constante.

D'autre part, un modèle bidimensionnel à deux phases séparées (où les températures instantanées du fluide et du matériau sont supposées différentes), considérant à la fois les dispersions thermiques axiales et radiales, est appliqué et résolu par une méthode implicite aux différences finies.

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental permettant l'étude du stockage et la récupération de la chaleur utilisée (Fig. 1) est constitué d'un cylindre (le lit) de 0.6 m de hauteur et 0.20 m de diamètre, orienté verticalement, isolé thermiquement par de la laine de verre et rempli de sphères en plastiques de diamètre égal à 0.038 m, disposées au hasard.

La cire de paraffine (température de fusion = 60 °C) est d'abord fondue, puis injectée dans les capsules sphériques. Un ventilateur centrifuge prélève l'air ambiant et le propulse à travers l'enceinte de stockage. Cet air est d'abord chauffé (en mode stockage) et maintenu à une température constante au moyen de résistances électriques.

La vitesse de circulation est mesurée au moyen d'un débitmètre. Douze thermocouples de type K (chromel - alumel) de diamètre 1 mm et de précision 0.5 °C sont placés à l'intérieur et à l'extérieur des capsules afin de mesurer la température du MCP et de l'air environnant (Fig. 2). L'ensemble des thermocouples est relié à un enregistreur à 12 voies.

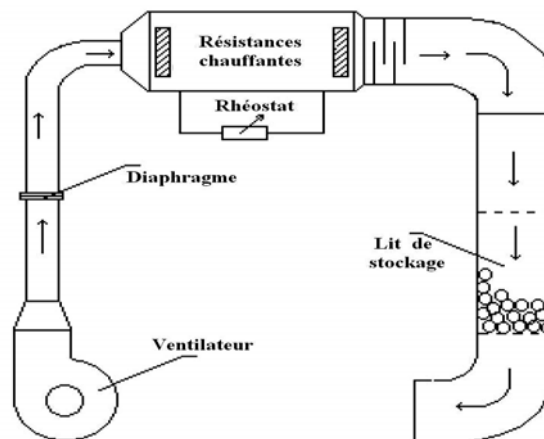


Fig. 1: Montage expérimental

### 3. MODELE MATHEMATIQUE

Le système proposé est un cylindre orienté verticalement contenant des particules sphériques remplies chacune de MCP et traversé par un flux d'air (Fig. 2).

Les équations de l'énergie qui régissent le phénomène de stockage / déstockage de la chaleur pour un modèle bidimensionnel à deux phases séparées s'écrivent pour un lit fixe [2]:

- pour le fluide

$$\rho_F C_F \varepsilon \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_F C_F \varepsilon u \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon k_{ef}^x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varepsilon k_{ef}^r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + h_a (\Theta - T) \quad (1)$$

- pour le MCP

$$\rho_{MPC} \times C_S \times (1 - \varepsilon) \times \frac{\partial \Theta}{\partial t} = h_a \times (T - \Theta) \quad \text{phase solide} \quad (2)$$

$$\rho_{MPC} \times L_{fl} \times (1 - \varepsilon) \times \frac{\partial \Phi}{\partial t} = h_a \times (T - \Theta^*) \quad \text{deux phases} \quad (3)$$

$$\rho_{MPC} \times C_l \times (1 - \varepsilon) \times \frac{\partial \Theta}{\partial t} = h_a \times (T - \Theta) \quad \text{phase liquide} \quad (4)$$

Ces équations tiennent compte à la fois des effets de la dispersion thermique axiale et radiale. A ce système d'équations aux dérivées partielles, nous devons associer des conditions initiales et aux limites.

#### 3.1 Conditions initiales et aux limites

A l'instant initial

$$T(x, r, t=0) = \Theta(x, r, t=0) = T_a$$

En  $x = 0$

$$T(x = 0, r, t) = T_e$$

En  $x = H$

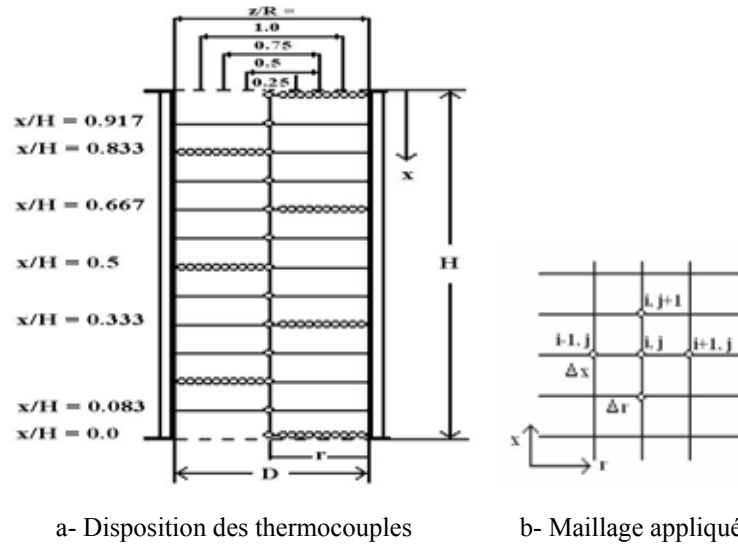
$$T(x = H, r, t) = T(x = H, r, t - \Delta t)$$

En  $x = 0$

$$\varepsilon \cdot k_{ef}^r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) = 2\varepsilon \cdot k_{ef}^r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$$

En  $r = R$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0$$



a- Disposition des thermocouples

b- Maillage appliqué

Fig. 2: Système proposé

### 3.2 Performances du lit

#### 3.2.1 Durée du stockage

La durée du stockage est définie comme le temps nécessaire au lit pour atteindre l'état de saturation thermique.

#### 3.2.2 Efficacité du lit

L'efficacité du lit est donnée par la relation suivante:

$$\pi(t) = \frac{\bar{\Theta} - T_a}{T_e - T_a}$$

#### 3.2.3 Rendement du lit

Le rendement du lit est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie stockée pendant le temps  $t$  et la capacité de stockage théorique.

$$\eta(t) = \frac{\rho_{MCP} \cdot V \cdot C_{MCP} [\bar{\Theta}(t) - T_a]}{\int_0^t D_F \cdot C_F [T(t) - T_a] \cdot dt}$$

## 4. METHODE DE RESOLUTION

Le système d'équations du MCP et du fluide associé aux conditions initiales et aux limites est résolu en discrétisant l'équation du fluide par la méthode implicite des directions alternées (A.D.I), tandis que les équations du MCP sont discrétisée par la méthode implicite des différences finies. La discrétisation des équations à partir d'un

maillage spatial et temporel de pas respectivement égaux  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  permet d'écrire [13], pour le MCP:

$$\Theta_{i,j}^{n+1} = \frac{\left( \Theta_{i,j}^n + \omega \cdot \Delta t \cdot T_{i,j}^{n+1} \right)}{(1 + \omega \cdot \Delta t)} \quad (5)$$

Où

$$\omega = \frac{h_a}{\rho_s C_s (1 - \varepsilon)} \quad \text{phase solide}$$

$$\omega = \frac{h_a}{\rho_l C_l (1 - \varepsilon)} \quad \text{phase liquide}$$

Dans la région des deux phases

- avec un processus de changement de phase isotherme:

$$\omega = 0 \quad , \quad \Theta = \Theta^* \quad (\text{saturation})$$

et

$$\Theta_{i,j}^{n+1} = \omega' \cdot \Delta t \cdot \left( T_{i,j}^n - \Theta_s \right) + \Theta_{i,j}^n \quad (5')$$

Où

$$\omega' = \frac{h_a}{\rho_s L_f (1 - \varepsilon)}$$

- avec un processus de changement de phase non isotherme:

$$\omega'' = \frac{h_a}{\rho_s C_p (1 - \varepsilon)}$$

$i$  et  $j$  indiquent respectivement la position axiale et la position radiale du noeud approprié et avec  $n$  qui indique le pas du temps présent.

En substituant l'équation (5) ou (5)' du MCP à un pas de temps  $n + 1$  dans l'équation du fluide (1) écrite sous forme de différences finies, on obtient l'expression générale pour la température fluide au noeud  $i, j$ :

$$A T_{i,j}^{n+1} + B T_{i,j+1}^{n+1} + C T_{i,j-1}^{n+1} + D T_{i+1,j}^{n+1} + E T_{i-1,j}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} T_{i,j}^n + F \Theta_{i,j}^n \quad (6)$$

Où:

$$A = (u/\Delta t) + 2k_{ef}^x / (1 + \rho_f C_f (\Delta x)^2) + 2k_{ef}^x / (1 + \rho_f C_f (\Delta r)^2) + \frac{h_a}{\rho_f C_f} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{\omega \cdot \Delta t}{1} + \omega \cdot \Delta t \right) \right\}$$

$$B = u/2 \cdot \Delta x - k_{ef}^x / 1 + \rho_f C_f (\Delta x)^2$$

$$C = -u/2 \cdot \Delta x - k_{ef}^x / 1 + \rho_l C_l (\Delta x)^2$$

$$D = \left( k_{ef}^r / \rho_f C_f \right) \cdot \left\{ (1/2 \cdot r \cdot \Delta r) + \left[ 1/2 \cdot (\Delta r)^2 \right] \right\}$$

$$E = \left( k_{ef}^r / \rho_f C_f \right) \cdot \left\{ (1/2 \cdot r \cdot \Delta r) - \left[ 1/2 \cdot (\Delta r)^2 \right] \right\}$$

$$F = \frac{h_a}{\rho_f C_f} \cdot \{ 1/1 + \omega \cdot \Delta t \}$$

La méthode implicite des directions alternée (A.D.I) est appliquée pour résoudre ce système d'équations linéaires à chaque pas de temps qui a été résolu radialement à  $\Delta t/2$  et axialement à  $\Delta t$ .

L'application de cette méthode (A.D.I) exige la décomposition de ce système d'équations linéaires en deux systèmes tridiagonaux d'équations linéaires. Soit un système de (N-1) équations linéaires à matrice tri diagonale. Le système est résolu en appliquant la méthode d'élimination de Gauss.

### 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La figure 3 illustre la comparaison en mode charge (stockage), des valeurs prédites de la température du fluide et du MCP et ceux mesurées expérimentalement pour un débit d'air donné.

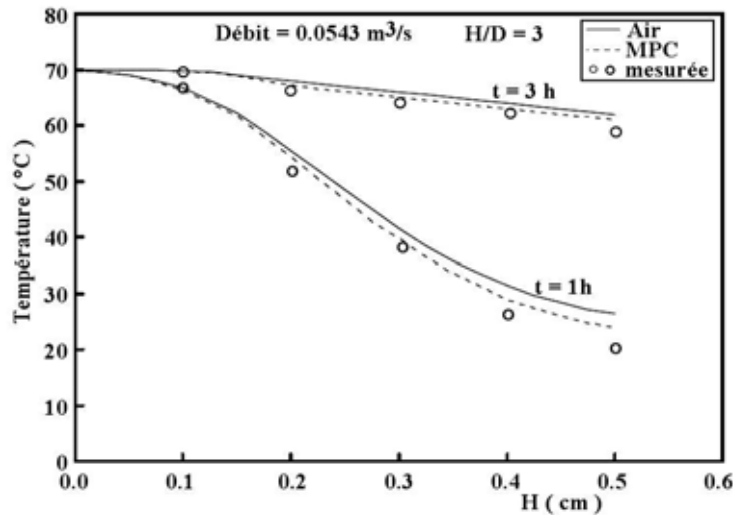


Fig. 3: Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées

La comparaison montre un bon accord entre les valeurs calculées et les résultats expérimentaux. Aussi on constate sur cette figure que du fait d'un coefficient de

transfert de chaleur important entre l'air et le matériau constituant le lit, la zone du lit située près de l'entrée est chauffée alors que la température de la partie du lit située près de la sortie demeure inchangée.

La température de l'air, à la sortie reste par conséquent très proche de la température initiale du lit. A mesure que le temps augmente, on remarque l'onde thermique se déplace vers les couches les plus profondes du lit.

Nous avons représenté sur les figures 4-a et 4-b, l'efficacité du lit durant la période de stockage pour un rapport hauteur/diamètre du lit ( $H/D$ ) variant de 1 à 3 et un débit d'air ( $Re$ ) variable. La tendance générale de ces deux figures est que l'efficacité du lit durant le stockage diminue avec  $H/D$ .

C'est dû au fait que le volume de stockage augmente avec  $H/D$  et par conséquent plus de chaleur est nécessaire au lit pour augmenter sa température et son efficacité de stockage.

Aussi, on peut remarquer que pour un temps donné et une même valeur de  $H/D$ , l'efficacité augmente avec  $Re$  (débit d'air).

De plus, ces figures indiquent que pour toutes les valeurs de  $H/D$ , la durée du stockage diminue avec  $Re$  (débit d'air). C'est dû au fait que comme plus d'air chaud est introduit dans le lit, plus de chaleur est stockée dans le système et ce qui par conséquent, fait croître le coefficient de transfert de chaleur entre le fluide en mouvement et les particules sphériques.

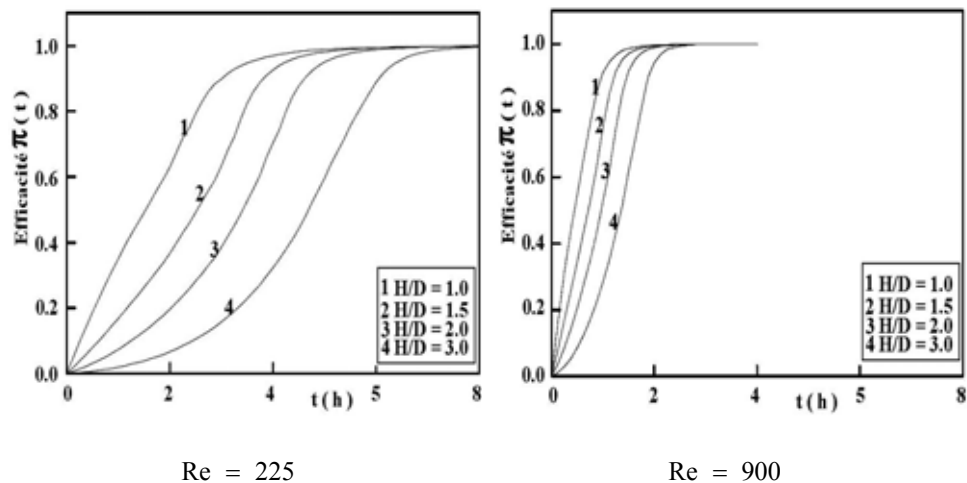


Fig. 4: Variation de l'efficacité du lit au cours du stockage pour différents ( $H/D$ ) et  $Re$

Sur la figure 5, nous avons représenté à la fois le rendement thermique du lit et son efficacité au cours de la période de stockage, pour un rapport hauteur/diamètre ( $H/D$ ) du lit variant de 1 à 3 et deux débits d'air ( $Re$ ) différents.

On constate que pour les faibles débits, le rapport hauteur/diamètre du lit ( $H/D$ ) influe sur les performances du lit, tandis que pour des débits plus importants, son effet est insignifiant.

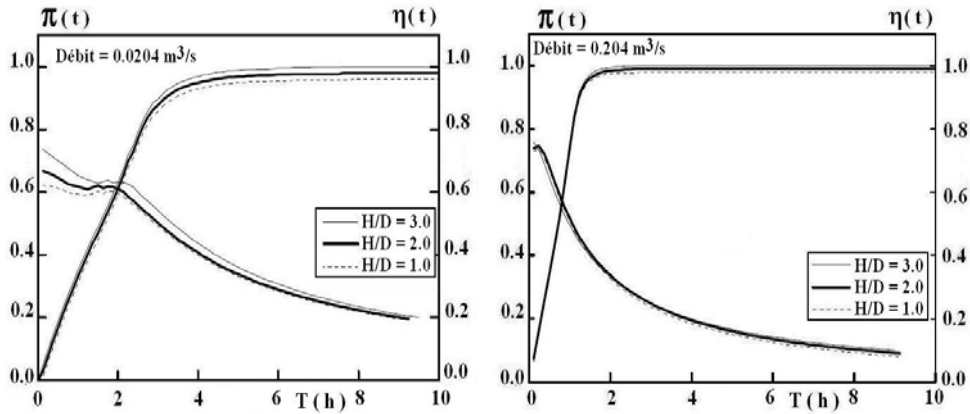


Fig. 5: Performances du lit au cours du stockage pour différents  $Re$  et ( $H/D$ )

## 6. CONCLUSION

De cette étude numérique et expérimentale, il ressort que:

- 1- Le modèle numérique utilisé nous a permis d'obtenir un bon accord entre les valeurs prédites et les résultats expérimentaux.
- 2- Pour un volume de stockage constant, le rapport hauteur/diamètre du lit influe peu les performances du lit.
- 3- Le rapport entre le débit d'air et le volume de stockage est un paramètre important dans la conception d'un lit fixe de stockage de l'énergie thermique.

## NOMENCLATURE

$a$  : Taux de surface de contact,  
 $(1 - \varepsilon)/d$ ,  $m^{-1}$

$C$  : Chaleur spécifique,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$d$  : Diamètre des sphères,  $m$

$D_F$  : Débit d'air,  $m^3.s^{-1}$

$h$  : Coefficient d'échange thermique,  
 $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$

$H$  : Hauteur du lit,  $m$

$k$  : Conductivité thermique,  $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$L_f$  : Chaleur latente de fusion,  $J.kg^{-1}$

$r$  : Coordonnée radiale

### *Symboles grecs*

$\Theta$  : Température du MCP,  $^{\circ}C$

$\Phi$  : titre du mélange de phases du MCP

$\varepsilon$  : Porosité

$\rho$  : Masse volumique du fluide,  $m^3.kg^{-1}$

### *Indices et exposants*

$a$  : Ambient

$e$  : Entrée

$ef$  : Valeur effective



R : Rayon du lit, m	F : Fluide
t : Temps, s	l : liquide
T : Température du fluide, °C	MCP : Matériau à changement de phase
u : Vitesse interstitielle du fluide, m.s <sup>-1</sup>	s : solide
V : Volume de stockage, m <sup>3</sup>	r : Direction radiale
x: Coordonnée axiale	x : Direction axiale
	*: Saturation

## REFERENCES

- [1] J. Duffie and W. Beckmann, '*Solar Engineering of Thermal Processes*', John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [2] D.E. Beasley, C. Ramanarayan and H. Torab, '*Thermal Response of a Packed Bed of Spheres Containing a Phase Change Material*'. International Journal Energy Research, Vol. 13, N°3, pp. 253 – 265, 1989.
- [3] R.J. Wood, S.D. Gladwell, P.W. O'Callaghan and S.D. Probert, '*Low Temperature Thermal Energy Storage Using Packed Beds Encapsulated Phase Change Materials*', International Conference of Energy Storage, Brighton, UK, pp. 145 – 155, 1981.
- [4] T. Saitoh and K. Hirose, '*High-Performance Phase-Change Thermal Energy Storage using Spherical Capsules*', Chemical Engineering Communications, Vol. 41, N°1-6, pp. 39 - 58, 1986.
- [5] G.A. Adebiyi, '*A Second-Law Study on Packed Bed Energy Storage Systems Utilising Phase Change Materials*', ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 113, N°3, pp. 146 – 156, 1991.
- [6] L.C.C. Gonçalves and S.D. Probert, '*Thermal Energy Storage: Dynamic Performance Characteristics of Cans Each Containing a Phase-Change Material, Assembled as a Packed-Bed*', Applied Energy, Vol. 45, N°2, pp. 117 – 155, 1993.
- [7] K. Cho and G.Y. Jung, '*Local Cooling Characteristics for the Spherical Capsules With Phase Change Materials in the Thermal Storage System*', International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, California, pp. 12 – 17, 1995.
- [8] R. Velraj, R.V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber and K. Schwarzer, '*Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System*', Solar Energy, Vol. 65, N°3, pp. 171 – 180, 1999.
- [9] D.E. Beasley and J.C. Clark, '*Transient Response of Packed Bed for Thermal Energy Storage*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, N°9, pp. 1659 – 1669, 1984.
- [10] A. Benmansour et M.A. Hamdan, '*Etude des Spécifications d'une Unité de Stockage de l'Energie Thermique Utilisant un Matériau à Changement de Phase*', Congrès Français de Mécanique. Nice, France, 1 - 5 Septembre 2003.
- [11] A. Benmansour, M.A. Hamdan and A. Bengueuddach, '*Experimental and Numerical Investigation of Solid Particles Thermal Energy Storage Unit*', Applied Thermal Engineering, Vol. 26, N°5-6, pp. 513 – 518, 2006.

- [12] G.S. Beavers, E.M. Sparrow and D.E. Rodenz, '*Influence of Bed Size on the Flow Characteristics and Porosity of a Randomly Packed Bed of Spheres*', Journal of Applied Mechanics, Vol. 40, pp. 655 – 667, 1973.
- [13] S.V. Patankar, '*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*', Hemisphere Publishing Corporation, Mc Graw Hill Company, 1980.