

Walid FOUHIL<sup>1</sup>  
 Sadok BEN JABRALLAH<sup>2</sup>  
 Belgacem DHIFAOU<sup>3</sup>  
 Yvan DUTIL<sup>4</sup>  
 Daniel ROUSSE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LETTM, Faculté des Sciences de Tunis, Tunis, Tunisie

<sup>2</sup> Faculté des Sciences de Bizerte, Bizerte, Tunisie

<sup>3</sup> Institut Supérieur des Sciences et de Technologie de l'Énergie, Gafsa, Tunisie

<sup>4</sup> Chaire industrielle en technologie de l'énergie et efficacité énergétique, Département de génie mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada

\* Auteur correspondant  
 (yvan@t3e.info)

## SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE DANS UN CANAL POREUX : ANALYSE DES PERFORMANCES ET COMPARAISON

**Résumé :** Dans ce travail, les performances d'un système de stockage énergétique thermique (inertie thermique et densité énergétique) dans un canal poreux vertical sont analysées pour deux modes de stockage : sensible et latent. Le canal poreux, qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constante alors que l'autre est supposée adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Les résultats indiquent que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82 % lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40 °C.

**Mots clés :** matériaux poreux ; stockage sensible ; stockage latent

### Nomenclature

$A$   $H/L$  facteur de forme géométrique  
 $a_{fs}$  surface d'échange solide-fluide,  $m^2$   
 $C_p$  capacité calorifique,  $Jkg^{-1}K^{-1}$   
 $D$  diamètre des particules,  $m$   
 $g$  accélération de la pesanteur,  $ms^{-2}$   
 $H$  hauteur du canal,  $m$   
 $h_{fs}$  coefficient de transfert solide-fluide,  $Wm^2K^{-1}$   
 $K$  perméabilité,  $m^{-2}$   
 $L$  largeur du canal,  $m$   
 $P$  pression,  $Pa$   
 $q$  densité de flux de chaleur à la paroi,  $Wm^{-2}$   
 $t$  temps,  $s$   
 $T$  température,  $K$   
 $u, v$  composantes de la vitesse,  $ms^{-1}$   
 $x, y$  coordonnées cartésiennes,  $m$

### Lettres grecques

$\varepsilon$  porosité  
 $\beta$  coefficient d'expansion thermique,  $Wm^{-1}K^{-1}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $Wm^{-1}K^{-1}$   
 $\mu$  viscosité dynamique,  $Pa \cdot s$   
 $\nu$  viscosité cinématique,  $m^2s^{-1}$   
 $\rho$  masse volumique,  $kgm^{-3}$

### Indices / Exposants

$MCP$  matériau à changement de phase  
 $SCS$  stockage par chaleur sensible  
 $SCL$  stockage par chaleur latente  
 $0$  référence  
 $f$  fluide (air)  
 $s$  solide  
 $o$  sortie  
 $eff$  effective

## 1. Introduction

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. En effet, souvent le besoin de l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ces problèmes est le stockage de l'énergie.

Cette énergie peut être stockée sous forme de chaleur dans des réservoirs thermiques. Ces derniers diffèrent par la géométrie du lit et par la nature du matériau servant à stocker l'énergie [1-3]. Ainsi, l'énergie thermique peut être alors stockée sous forme de chaleur latente, ou bien sous forme de chaleur sensible ou même les deux à la fois [4].

Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent jouer un rôle important dans l'optimisation de ces réservoirs. En effet, les MCP présentent une grande densité de stockage de l'énergie en faisant intervenir la chaleur latente. L'utilisation de ces matériaux pour le stockage de l'énergie a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [5]. Une étude expérimentale et numérique menée par Younsi [6] a permis de construire une base de données sur leurs comportements et leurs

caractéristiques propres. La majorité de ces problèmes ne présentent pas de solution analytique. Dans ce contexte, l'utilisation de la modélisation numérique s'avère un outil essentiel à l'optimisation de tel système. Par exemple, une étude numérique proposée par Benmansour [7] a montré que l'utilisation de trois MCP au lieu d'un seul se traduit par un gain notable en performances.

Dans la plupart des travaux, le MCP occupe tout le domaine et est considéré homogène. Cependant, dans les systèmes plus récents, il est placé dans des capsules afin de maximiser les échanges de chaleur. Dans ce cas, une partie du volume est occupé par le fluide caloporteur. Dans cette étude, le cas d'un canal vertical rempli de billes, borné par deux parois et soumis à un flux de chaleur pariétal est examiné. L'une des parois est soumise à un flux de chaleur constant, l'autre est maintenue adiabatique. Un écoulement d'air, du bas vers le haut, parcourt le canal (voir Fig. 1).

Deux cas sont étudiés :

- Les billes sont entièrement en verre (billes pleines)
- Les billes sont remplacées par des capsules contenant un MCP.

Dans le premier cas, la chaleur est stockée par chaleur sensible. Dans le second, il y a aussi stockage par chaleur latente. Les deux cas furent analysés afin de faire apparaître l'éventuelle amélioration d'efficacité due à l'utilisation d'un MCP.

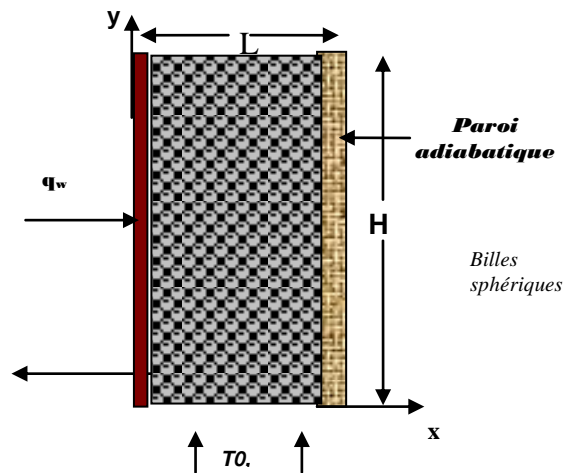


Figure 1 : Géométrie du problème

## 2. Modèle mathématique

L'objectif consiste à suivre l'évolution de la température du domaine poreux en fonction du temps. D'abord, le cas du stockage thermique par chaleur sensible a été étudié. La validation de ce modèle a été effectuée par comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus avec la convection naturelle dans un canal poreux vertical chauffé par la paroi [8]. Dans ce travail, les auteurs ont traité le stockage d'énergie par chaleur sensible, et il a montré que le système étudié présentait une grande inertie thermique. De même, l'efficacité du système, définie par le rapport, de l'énergie stockée sur l'énergie fournie, augmente avec le volume de stockage et diminue avec la durée de décharge. Ce modèle a par la suite été modifié en remplaçant les billes par des capsules contenant un MCP.

Dans le modèle mathématique décrivant le phénomène, les équations macroscopiques sont moyennées suivant la technique des prises en moyennes :

Équation de continuité

$$\nabla \cdot \langle V \rangle = 0 \tag{1}$$

Équation de Darcy-Brinkman

$$\nabla \langle p \rangle^f = \rho_f g - \frac{\mu_f}{K} \langle V \rangle + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \nabla^2 \langle V \rangle \tag{2}$$

Équation de l'énergie – phase solide

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{s,eff} \nabla \langle T_s \rangle^s) + h_{fs} a_{fs} (\langle T_f \rangle^f - \langle T_s \rangle^s) \tag{3}$$

Équation de l'énergie – phase fluide

$$\varepsilon \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_{pf} \langle V \rangle \cdot \nabla \langle T_f \rangle^f = \nabla \cdot (\lambda_{f,eff} \nabla \langle T_f \rangle^f) - h_{fs} a_{fs} (\langle T_f \rangle^f - \langle T_s \rangle^s) \quad (4)$$

où  $K$ ,  $h_{fs}$  et  $a_{fs}$  représentent respectivement la perméabilité du domaine poreux, le coefficient de transfert fluide-solide et la surface d'échange entre les deux phases.

Les conditions aux limites initiales thermiques et dynamiques sont :

$$t = 0 : u = v = 0, T_f = T_s = T_0$$

$$y = 0 : u = 0, v = V_0, T_f = T_0, \lambda_{s,eff} \frac{\partial T_s}{\partial y} = h_{fs} (T_s - T_0) \quad y = H : \frac{du}{dy} = \frac{dv}{dy} = 0, \frac{\partial T_s}{\partial y} = \frac{\partial T_f}{\partial y} = 0$$

$$x = L : u = v = 0, \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0$$

$$x = 0 : u = v = 0, q_w = -\lambda_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial x} \right)_w = -\lambda_s \left( \frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_w = 0$$

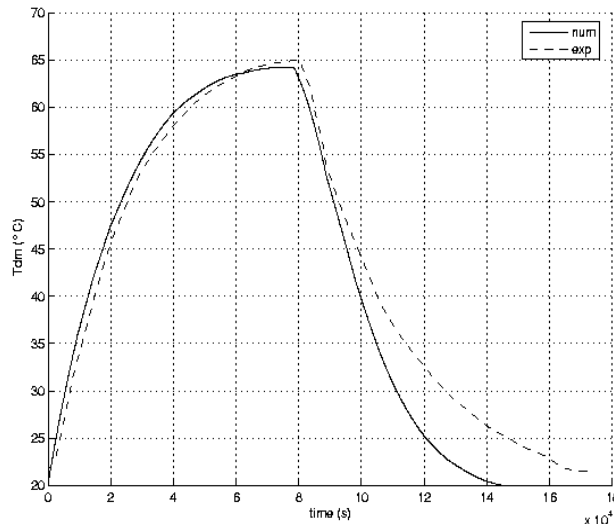
où  $T_0$  et  $V_0$  sont respectivement la température et la vitesse à l'entrée du domaine.

La résolution de ce système d'équations différentielles a été effectuée à l'aide d'une discrétisation de ce dernier et de l'utilisation du logiciel *COMSOL MULTIPHYSICS*, qui se base sur la méthode des éléments finis. Le maillage utilisé est un maillage triangulaire non uniforme qui se resserre au voisinage des extrémités du domaine, là où les gradients sont les plus élevés. Ce problème numérique est résolu spatialement et temporellement.

### 3. Résultat et discussion

#### 3.1 Stockage par chaleur sensible

La Fig. 2 présente la comparaison de la simulation avec l'expérience décrite dans [8] de l'évolution de la température moyenne pour deux cycles de charge et de décharge, d'une matrice poreuse constituée par des billes de verre. L'écart observé entre ces deux courbes peut être expliqué par les pertes thermiques dans le montage alors que le modèle numérique suppose une paroi adiabatique. En effet, dans leur travail [8], les auteurs ont montré que les phases de charge et de décharge ne sont pas parfaitement symétriques en raison de ces pertes.



**Figure 2 :** Comparaison simulation- expérience : Évolution de la température moyenne du domaine poreux, pour les deux cycles de charge et de décharge [ $q=250 \text{ W/m}^2$  ;  $A=5,7$  ;  $d=10 \text{ mm}$  (verre)]

Les performances caractéristiques d'un réservoir d'énergie sont la durée de stockage et son efficacité thermique. L'efficacité thermique dans cette étude est définie par le rapport entre l'énergie stockée  $E_{st}$  et l'énergie fournie au système  $E$  durant le temps de charge  $t_{ch}$  [8] :

$$\eta = \frac{E_{st}}{E} \tag{5}$$

avec  $E = \dot{q}_w S t_{ch}$  et  $E_{st} = V(\rho Cp)_{eff} (T_{dm} - T_0)$  et où  $(\rho Cp)_{eff} = (1 - \varepsilon)(\rho Cp)_s + \varepsilon(\rho Cp)_f$  est la chaleur volumique effective du domaine poreux.

Le tableau 1 présente les valeurs numériques et expérimentales de l'efficacité du système pour deux facteurs de forme différents. Les résultats numériques et expérimentaux sont en accord et montrent que l'efficacité augmente avec le facteur de forme.

Tableau 1 : Efficacité thermique du système

	$\eta$ modèle	$\eta$ expérience
A=5,7	27 %	25 %
A=10	32 %	30 %

### 3.2 Stockage par chaleur latente

Cette partie s'intéresse au stockage thermique par chaleur latente. Le système physique est modifié de sorte que la matrice solide formant le milieu poreux est constituée par des capsules contenant un matériau à changement de phase. Le MCP utilisé dans ce cas est de la paraffine possédant une température de fusion  $T=60\text{ °C}$  et une chaleur latente de fusion  $L_{fus} = 213\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Puisque les propriétés thermiques diffèrent entre les phases solide et liquide du MCP, une variable  $H_f$  qui prend la valeur 0 pour la phase solide et la valeur 1 pour la phase liquide est définie. La transition de  $H_f$  de 0 à 1 nécessite l'implantation d'une fonction à pas variable. Cette fonction est intégré au logiciel par COMSOL et notée 'flc2hs', est telle que  $H = flc2hs(T - T_{fus}, dT)$ . La variable  $H_f$  est représentée sur la figure 3 pour des pas de temps variables, commençant par l'état initial ( $t=0\text{ s}$ ), jusqu'au régime permanent  $t=8 \times 10^4\text{ s}$ .

Au fur et à mesure que le temps augmente, le front de fusion se déplace vers la paroi froide et vers le bas du domaine. La fusion du MCP ne s'effectue pas dans la moitié inférieure du domaine poreux, car l'air à l'entrée du canal est maintenu à la température ambiante qui est nettement inférieure à la température de fusion du MCP (Fig. 3). En régime permanent, la température de l'air est en équilibre thermique avec celle du MCP.

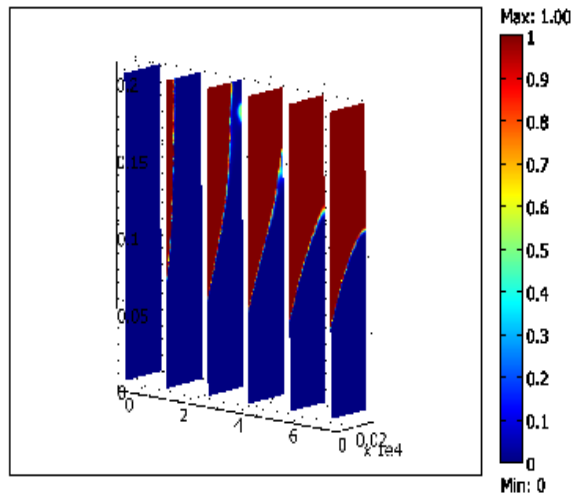


Figure 3 : Fraction massique solide dans le MCP ( $q=250\text{ W/m}^2, A=5$ )

Comme il n'y a qu'une fusion partielle du MCP dans ce système, une variable caractérisant la fraction du volume liquide  $F_f$  dans le domaine poreux est introduite.

$$F_f = \frac{V_{MCP(fus)}}{V_{MCP}} \tag{6}$$

où  $V_{MCP(fus)}$  et  $V_{MCP}$  représentent respectivement le volume fondu et le volume total du MCP. Il est possible de distinguer trois phases distinctes de stockage de l'énergie dans le MCP.

- Phase 1: Elle consiste à un stockage par augmentation de la température du MCP depuis sa température initiale jusqu'à ce que, une partie du MCP  $F_f V_{MCP(fus)}$  atteinte la température de fusion. Il s'agit donc d'un stockage par chaleur sensible.
- Phase 2: Cette phase correspond au stockage dominé par le changement de phase du MCP  $F_f V_{MCP(fus)}$ , plus la contribution de la chaleur sensible emmagasinée dans la phase solide  $(1-F_f)V_{MCP(fus)}$ .
- Phase 3 : À la fin de cette phase, le volume  $F_f V_{MCP(fus)}$  est liquide, sa température est au-dessus de la température de fusion  $T_{m1} > T_{fus}$  tandis que l'autre partie  $(1-F_f)V_{MCP(fus)}$  demeure solide. Cette phase correspond donc aussi à une période de stockage par chaleur sensible.

Par conséquent, l'énergie stockée est:

Dans la fraction du volume fondu

$$E_{st1} = \rho_s C_{ps} (F_f V_{MCP}) (T_{fus} - T_0) + \rho_l (F_f V_{MCP}) L_{fus} + \rho_l C_{pl} (F_f V_{MCP}) (T_{m1} - T_{fus}) \quad (7)$$

avec  $T_{m1} > T_{fus}$

Dans la fraction du volume non fondu :

$$E_{st2} = \rho_s C_{ps} ((1-F_f) V_{MCP}) (T_{m2} - T_0) \quad (8)$$

avec  $T_{m2} < T_{fus}$ .

où  $\rho_s$ ,  $\rho_l$ ,  $C_{ps}$ ,  $C_{pl}$  représentent respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique du MCP pour les deux phases solides et liquides,  $T_{m1}$  et  $T_{m2}$  représentent respectivement les températures moyennes des phases liquide et solide., et où  $T_0$ ,  $T_{fus}$  représentent respectivement les températures ambiantes et de fusion de MCP. Par conséquent, l'énergie stockée totale est  $E_{st} = E_{st1} + E_{st2}$ .

Les simulations montrent que lorsque la température de l'air à l'entrée augmente, le volume liquide augmente et par le fait même l'énergie stockée dans le domaine. De même, une variation du diamètre des capsules n'affecte pas la fraction du volume fondu. Par conséquent, cela n'affecte pas la quantité d'énergie stockée. Cependant, il est à noter que la convection dans les capsules n'a pas été prise en compte, mais qu'elle peut devenir importante à de plus grands diamètres.

### 3.3 Comparaison entre les deux processus de stockage

L'inertie thermique et l'énergie stockée dans le domaine sont les paramètres caractérisant les performances d'une unité de stockage. La Fig.4 montre la comparaison des processus de stockage et de récupération par chaleur sensible (SCS) et par chaleur latente (SCL). Une amélioration de l'inertie thermique du système est constatée lorsque l'on utilise des capsules contenant un MCP comparé au système de stockage uniquement par chaleur sensible ( $t_{SCL} \approx 2 t_{SCS}$ ).

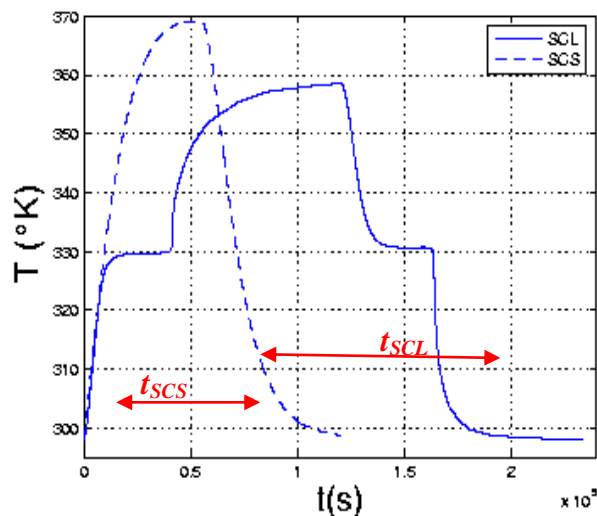


Figure 4 : Comparaison du stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente ( $q=250 \text{ W/m}^2$ ,  $A=5$ )

Une amélioration similaire est observée au niveau de la quantité d'énergie stockée (tableau 2). Le gain augmentant avec la température d'entrée de l'air, car la fraction de volume augmente. En revanche, cette variation de la température d'entrée n'affecte pas l'énergie stockée dans le canal rempli par des billes de verre, car cette dernière ne dépend que du changement de température total, qui lui-même ne dépend que de la capacité calorifique des billes qui est constante ici.

Tableau 2 : Énergie stockée dans le système

Température d'entrée (°C)	Énergie stockée dans les billes de verre (MJ)	Énergie stockée dans les capsules de MCP (MJ)
25	96	139
30	96	150
35	96	162
40	96	175

Les résultats présentés au tableau no.2 indiquent que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82 % lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40 °C.

### 3. Conclusion

Dans cette étude, les performances d'un système stockage (inertie thermique et densité énergétique) dans un canal poreux vertical sont analysées pour deux modes de stockage : sensible et latent. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS fut employé pour implanter le système d'équations discrétisé et obtenir les prédictions numériques.

L'évolution de la température pendant les cycles de charge et de décharge, ainsi l'énergie stockée pendant ces deux processus a été mise en évidence. Une concordance satisfaisante entre les résultats numériques et expérimentaux est démontrée. Les différentes études montrent que les billes de verre formant la matrice poreuse peuvent être avantageusement remplacées par des capsules contenant un matériau à changement de phase. Cette approche permet d'améliorer l'inertie thermique ainsi que la quantité d'énergie totale stockée dans ce type de réservoir thermique.

### Références

- [1] J. DUFFIE, W. BECKMANN, Solar Engineering of thermal Processes, John Wiley and Sons, New York, 1980
- [2] D. E. BEASLEY, C. RAMANARAYAN, Thermal Response of Packed Bed of Spheres Containing a phase change material, *International Journal of Energy Research*, 13, 253-265, 1989
- [3] A. BENMANSOUR, M.A. HAMDAN, Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe de sphères contenant un matériau à changement de phase, *Revue d'Énergie Renouvelable*, 4, 125-134, 2001
- [4] J. MILETTE Conception, instrumentation, modélisation et analyse d'un élément de stockage d'énergie par chaleur latente, Thèse Ph.D., Université de Sherbrooke, Canada, 2000
- [5] H. MEHLING, L.F. CABEZA, Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications, D. Mewes, F. Mayinger, Springer-Verlag, Berlin, Allemagne, 2008.
- [6] Z. YOUNSI, Transferts thermiques entre lame d'air et matériaux à changement de phase. Application à la gestion optimale des performances d'un composant solaire passif. Thèse Ph.D., Université d'Artois 2008.
- [7] A. BENMANSOUR, Étude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouches, 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 27-31 août 2007, Grenoble, France, 2007.
- [8] B. DHIFAoui, S. BEN JABRALLAH, A. BELGHITH, J. CORRIOU, Experimental study of the dynamic behaviour of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat, *International journal of thermal sciences*, 46, 1056-1063, 2007.