

SIMULATION NUMÉRIQUE DU STOCKAGE THERMIQUE SENSIBLE ET LATENT DANS UN CANAL VERTICAL POREUX: PERFORMANCE ET COMPARAISON

Walid **FOUDHIL**^{a,b}, Belgacem **DHIFAOU**^{a,c}, Sadok **BEN JABRALLAH**^{a,d},
Yvan **DUTIL**^{*,e}, Daniel R. **ROUSSE**^e

^aLaboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermique et Massique de Tunis, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie

^b Faculté des Sciences de Gafsa, Gafsa, Tunisie

^c Institut Supérieur d'Informatique de Mahdia, Mahdia, Tunisie

^d Faculté des Sciences de Bizerte. Bizerte, Tunisie

^e Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e),
École de technologie supérieure, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Le comportement thermique d'un canal vertical poreux rempli de billes sphériques (en verre ou contenant un matériau à changement de phase), chauffé à la paroi et soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, a été étudié. La complexité de cette modélisation réside en la combinaison de la physique des milieux poreux avec celle du changement de phase. La résolution numérique de ce problème est basée sur la méthode des éléments finis et a été réalisée en utilisant le code de calcul Comsol Multiphysics. Cette étude montre que si l'utilisation de matériaux à changement de phase améliore les performances du système de stockage (inertie thermique et densité de stockage), les gains apportés ne sont que partiels, car le matériau à changement de phase ne fond pas dans la partie inférieure du canal, car la température s'y maintient sous le point de fusion.

Mots Clés : Canal poreux, Stockage Thermique, MCP, Comsol Multiphysics

NOMENCLATURE

Symboles :

a_{fp}	surface de contact fluide-solide [m ²]
c_p	chaleur spécifique [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
$C_{p,eq}$	chaleur volumique effective [Jm ⁻³ K ⁻¹]
d	diamètre des particules [m]
F	fonction locale de fusion du MCP [-]
g	accélération de gravité [N kg ⁻¹]
H	hauteur du canal [m]
h	coefficient d'échange convectif [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
K	perméabilité [m ²]
L	largeur du domaine [m]
$LSHS$	stockage sensible et latent
L_{fus}	chaleur latente de fusion [Jkg ⁻¹]
P	pression [Pa]
q_w	densité de flux de chaleur [W m ⁻²]
t	temps [s]
SHS	stockage sensible
T	température [K or °C]
u, v	composantes de la vitesse [m s ⁻¹]
U	module du vecteur vitesse [m s ⁻¹]
V	volume [m ³]
(x, y)	coordonnées cartésiennes [m]
X_{VF}	fraction du volume fondu [-]

Indices / Exposants :

a	ambient
d	domaine
e	entrée
eq	effective (MCP)
eff	effective (Milieu poreux)
f	fluide (air)
i	indice
l	liquide (MCP)
m	moyenne
p	particules
s	solide (MCP)
w	paroi

Lettres grecques :

α	fraction de la phase du MCP
ε	porosité [-]
β	coefficient d'expansion thermique [K ⁻¹]
λ	conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]
μ	viscosité dynamique [Pa·s]
ν	viscosité cinématique [m ² s ⁻¹]
ρ	masse volumique [kg m ⁻³]
χ	densité énergétique [kg m ⁻³]

* auteur correspondant

Adresse électronique : yvan@t3e.info

1. INTRODUCTION

Une des principales difficultés auxquelles on doit faire face avec les énergies renouvelables est leur grande variabilité et leur répartition dans le temps qui n'est pas toujours appariée aux besoins. Dans le cas de l'exploitation de l'énergie solaire pour le chauffage, le stockage thermique s'impose naturellement. Toutefois, les masses nécessaires au stockage thermique sous forme sensible peuvent être impraticables.

Face à ce problème, Maria Telkes proposa peu après la Seconde Guerre mondiale l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) afin de réduire les masses et les volumes nécessaires [1]. Aujourd'hui, l'utilisation de MCPs dans un bâtiment fait l'objet de recherches considérables [2–3]. Cependant, les difficultés de caractérisation et de modélisation du comportement des MCPs intégrés aux bâtiments limitent encore largement leur diffusion [4].

Une application particulière des MCP est leur intégration dans un mur Trombe, ce qui faciliterait leur intégration aux bâtiments en réduisant les masses et les volumes [5–6]. Néanmoins, les performances des matériaux à changement de phase intégrés aux murs sont limitées par leur faible conductivité thermique.

Afin de faciliter l'échange thermique, d'autres géométries peuvent être exploitées. Ainsi, l'utilisation d'un milieu poreux améliore considérablement le rapport surface volume. Dans une série d'études [7–9], les auteurs analysent le comportement des matériaux à changement de phase encapsulés dans une unité de stockage thermique. Dans le cas d'un lit poreux cylindrique parcouru par l'eau et constitué par des capsules remplies de MCP, Regin et al. [10] ont montré que la durée de solidification complète est plus importante que la durée de fusion et ceci est dû au faible coefficient de transfert de chaleur durant la solidification. Ce comportement asymétrique de la transition de phase a été observé par plusieurs auteurs [4,11] avec plusieurs géométries.

Dans le cadre de ce travail, le stockage thermique sensible et latent dans le domaine poreux est étudié. Dans le premier temps, l'accumulation de chaleur sensible dans un milieu poreux formé de billes de verre est étudiée. Dans le second cas, on examine le stockage de la chaleur dans des capsules contenant un MCP. La complexité de cette modélisation réside en la combinaison de la physique des milieux poreux avec celle du changement de phase en considérant les fractions des volumes fondus et non fondus du MCP.

2. MODÈLE MATHÉMATIQUE

2.1. Définition du problème

Le système physique représente un milieu poreux vertical constitué de deux matériaux : un fluide (air) et un solide indéformable (billes sphériques). Ce milieu

poreux est un canal chauffé à la paroi et soumis à une ventilation d'air à faible vitesse. Le transfert de chaleur s'effectue par convection et conduction : le rayonnement est négligé. Deux dispositions seront considérées. La première disposition constitue un milieu poreux formé par des billes en verre. Dans la seconde, on remplace les billes de verre par des capsules contenant un matériau à changement de phase (Figure 1).

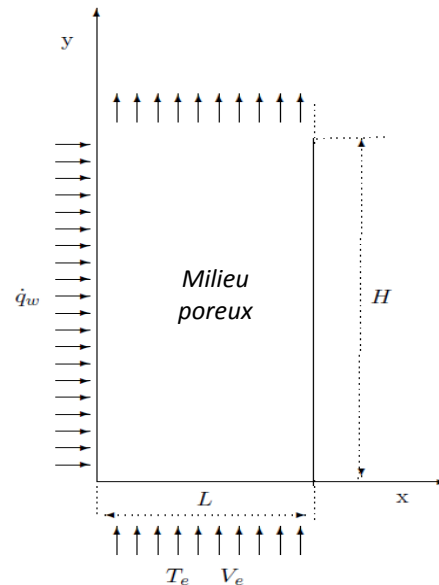


Figure 1 : Géométrie du problème

La convection naturelle dans un canal poreux vertical chauffé par la paroi a fait l'objet d'une étude expérimentale élaborée par Dhifaoui et al. [12]. Les auteurs ont traité le stockage d'énergie par chaleur sensible, et ils ont montré que le système étudié présente une grande inertie thermique.

2.2. Mise en équations

Les équations suivantes décrivent le comportement du système. Dans le cas où nous utilisons des capsules contenant un MCP, les propriétés thermophysiques de ce matériau diffèrent selon qu'on est en phase solide ou en phase liquide. L'équation de l'énergie pour les billes en verre (4), sera remplacée par l'équation (5) (capsule contenant un MCP).

Équation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Équations de Darcy-Brinkman

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\mu_f}{K} v = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho_f g + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\mu_f}{K} u = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_f}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Conservation de l'énergie

- Phase fluide (air)

$$\varepsilon(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f \left(u \frac{\partial T_f}{\partial x} + v \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = \varepsilon \lambda_f \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \right) - h_{fp} a_{fp} (T_f - T_p) \quad (4)$$

- Phase solide (billes en verre)

$$(1-\varepsilon)(\rho c_p)_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = (1-\varepsilon) \lambda_p \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) + h_{fp} a_{fp} (T_f - T_p) \quad (5)$$

- Phase solide (capsules de MCP)

$$(1-\varepsilon) C_{p,eq} \frac{\partial T_p}{\partial t} = (1-\varepsilon) \lambda_{eq} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) + h_{fp} a_{fp} (T_f - T_p) \quad (6)$$

où $C_{p,eq}$ et λ_{eq} représentent respectivement la capacité volumique effective et la conductivité thermique effective des deux phases solide et liquide du MCP :

$$C_{p,eq} = \sum \alpha_i (\rho c_p)_i \quad \lambda_{eq} = \sum \alpha_i \lambda_i \quad (7)$$

α est la fraction de la phase i (i =(liquide, solide))

Pour traiter la transition de phase dans le modèle, une variable auxiliaire F prenant la valeur 0 pour la phase solide et la valeur 1 pour la phase liquide, est définie. La transition de F de 0 à 1 nécessite l'utilisation d'une fonction à pas variable définie dans logiciel de calcul.

Les paramètres physiques définis dans les équations précédentes sont la perméabilité K du domaine poreux, le coefficient de transfert convectif h_{fp} , la surface de contact fluide-particules a_{fp} . Ces variables sont exprimées par les expressions [13,14] suivantes :

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (8)$$

$$h_{fp} = \frac{\lambda_f}{d} \left[2 + 1,1 \text{Pr}_f^{0,33} \left(\frac{vd}{v_f} \right)^{0,6} \right] \quad (9)$$

$$a_{fp} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (10)$$

Les conditions initiales pour la vitesse et la température sont données par les expressions suivantes :

$$t=0 : u=v=0, T_f=T_p=T_a$$

Les conditions aux limites thermiques et dynamiques sont :

$$y=0 : u=0, v=U_e, T_f=T_e$$

$$(1-\varepsilon) \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} = h_{fp} (T_p - T_e) \quad (11)$$

$$y=H : \frac{du}{dy} = \frac{dv}{dy} = 0, \frac{\partial T_f}{\partial y} = \frac{\partial T_p}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$x=L : u=v=0, \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$x=0 : u=v, q_m = -\lambda_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right)_w = -\lambda_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial x} \right)_w \quad (14)$$

2.3. Énergie stockée - Densité énergétique

2.3.1 Stockage sensible

Pour exprimer la chaleur stockée dans le milieu poreux, les particules en verre et l'air sont considérées en équilibre thermique. L'énergie stockée est définie comme :

$$dE_{SHS} = mc_{p,eff} dT = (\rho c_p)_{eff} V dT \quad (15)$$

où $(\rho c_p)_{eff}$ représente la chaleur volumique effective du milieu poreux, donnée par :

$$(\rho c_p)_{eff} = (1-\varepsilon)(\rho c_p)_p + \varepsilon(\rho c_p)_f \quad (16)$$

L'énergie sensible stockée dans le milieu s'obtient par :

$$E_{SHS} = \int_{T_a}^{T_{md}} V (\rho c_p)_{eff} dT \quad (17)$$

2.3.2 Stockage sensible et latent

En présence de changement de phase, le calcul de l'énergie stockée doit tenir compte de la chaleur sensible et de la chaleur latente. En effet, lors du chauffage, une fraction du milieu poreux subit un changement de phase alors que la température du reste augmente sans atteindre la température de fusion. Pour l'exprimer, une variable caractérisant la fraction du volume fondu du domaine poreux est employée et elle est définie par :

$$X_{VF} = \frac{V_{MCP(fus)}}{V_{MCP}} \quad (18)$$

a- Énergie stockée dans les capsules

- Dans la fraction du volume fondu X_{VF}

$$E_1 = \int_{T_a}^{T_{fus}} (\rho c_p)_s (X_{VF} X_{MCP}) dT + \rho_l (X_{VF} X_{MCP}) L_{fus} + \int_{T_{fus}}^{T_{m1}} (\rho c_p)_l (X_{VF} X_{MCP}) dT \quad (19)$$

- Dans la fraction non fondue $(1-X_{VF})$

$$E_2 = \int_{T_a}^{T_{m2}} (\rho c_p)_s [(1-X_{VF}) V_{MCP}] dT \quad (20)$$

L'énergie stockée totale dans le MCP:

$$E_{MCP} = E_1 + E_2 \quad (21)$$

b- Énergie stockée dans la phase fluide

La contribution de l'énergie stockée par chaleur sensible dans l'air qui parcourt le domaine poreux:

$$E_f = \int_{T_a}^{T_{mf}} (\rho c_p)_f V_f dT \quad (22)$$

c- Énergie stockée totale dans les capsules

$$E_{LSHS} = E_{MCP} + E_f \quad (23)$$

2.3.3 Densité énergétique

χ est la densité énergétique de stockage, définie par

$$\chi = \frac{E}{V} \quad (24)$$

V représente le volume total des particules et de l'air. E est l'énergie totale stockée dans le domaine.

3. SIMULATION NUMÉRIQUE

3.1 Code de calcul

La simulation de ce problème et la résolution numérique ont été réalisées en utilisant le code de calcul Comsol Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis avec les paramètres suivants : $\dot{q}_w = 250 \text{ W/m}^2$, $d = 0,01 \text{ m}$; $m_f = 1,2 \times 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$; $T_e = 298 \text{ K}$

3.2 Validation

Après les tests d'usage ayant trait à l'indépendance du maillage et aux taux de convergence, la géométrie considérée est validée par une comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus par Dhifaoui et al. [12]. La figure 2 montre la variation de la température moyenne en fonction du temps près de la paroi chauffée. Une concordance satisfaisante est observée.

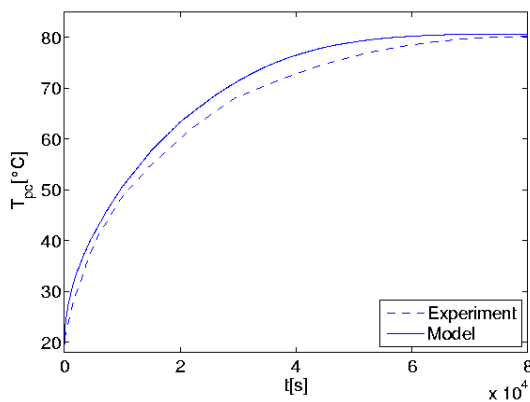


Figure 2 : Comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux [12] ($L=0,07 \text{ m}$; $H=0,4 \text{ m}$)

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Stockage thermique sensible

D'abord, l'accumulation de l'énergie dans un canal poreux vertical, rempli par des billes sphériques pleines en verre est étudiée (Figure 1). Les caractéristiques du domaine poreux sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1: Propriétés physiques du milieu poreux

	λ	ρ	C_p	ν
	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Air	0,026	1,127	1007	$2,4 \times 10^{-5}$
Verre	0,7	2700	840	—

L'évolution de la température moyenne dans le milieu poreux formé par les billes de verre durant le cycle de charge et de décharge est montrée à la figure 3. Le cycle de décharge débute lorsque la température atteint le régime permanent pendant la phase de charge. Cette évolution est décrite à plusieurs hauteurs dans le domaine poreux

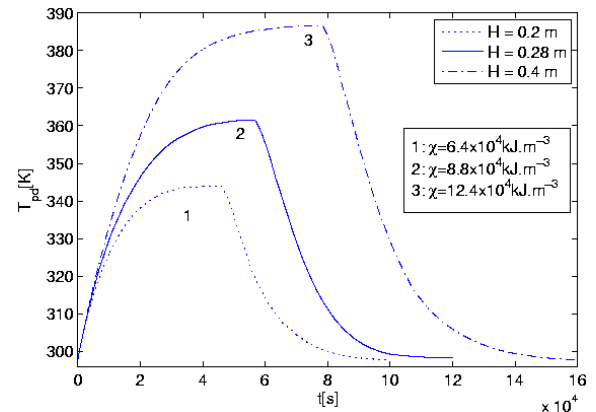


Figure 3 : Évolution de la température moyenne du milieu, durant les deux cycles de charge et de décharge, pour des hauteurs différentes

Le système présente une grande inertie ($>10 \text{ h}$). De plus, le cycle est symétrique; le système nécessitant presque la même durée pour relâcher la chaleur stockée. L'inertie importante du domaine poreux le rend intéressant comme réservoir thermique. Ce résultat a été confirmé par le travail expérimental antérieur [12].

Bien que la densité énergétique et que l'inertie du système augmentent avec la hauteur du canal, le principal inconvénient de tels systèmes reste l'encombrement. D'autre part, pour des applications dans le domaine du bâtiment, il faut éviter d'atteindre des températures élevées. L'utilisation de matériaux à changement de phase présente donc une solution élégante à ces deux problèmes.

4.2 Stockage thermique sensible et latent

Le système est modifié de sorte que la matrice solide formant le milieu poreux soit constituée par des capsules contenant un matériau à changement de phase. Le tableau 2 présente les caractéristiques physiques de la paraffine pendant les deux phases solide et liquide.

Tableau 2: Caractéristiques physiques de la paraffine

Caractéristiques physiques	Phase solide	Phase liquide
$T_{fus}(K)$		330
$L_{fus}(kJ.kg^{-1})$		213
$\rho (kg m^{-3})$	861	778
$C_p (J kg^{-1} K^{-1})$	1851	2384
$\lambda(W m^{-1}K^{-1})$	0,4	0,15

La dynamique de cette configuration diffère sensiblement de la précédente. Ainsi, la variation de la température dans le MCP en fonction du temps pour des sections différentes (Figure 4) est différente de celle observée pour le stockage sensible (Figure 3).

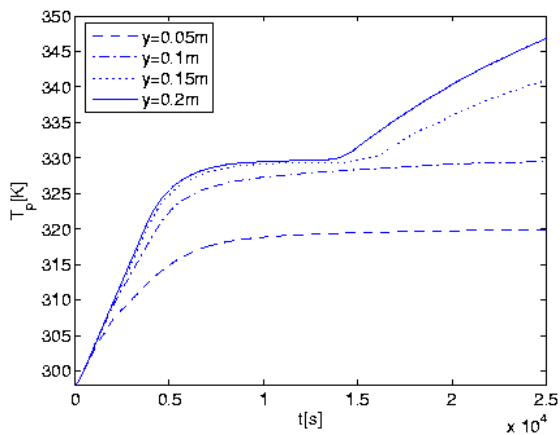


Figure 4 : Évolution de la température du milieu, à mi-largeur, en fonction du temps pour des sections différentes

On note aussi que le MCP ne fond pas en totalité et que le changement de phase s'effectue principalement dans la moitié supérieure du domaine. En effet, l'air introduit à l'entrée du milieu est à la température ambiante, qui est nettement inférieure à la température de fusion du MCP, ce qui empêche la fusion de la paraffine dans la partie proche de l'entrée du canal. Ce n'est qu'à partir de $y=0,15 m$, que l'on observe l'apparition du palier de température due à la fusion indiquant la présence de la transition de phase.

4.3 Comparaisons des performances des deux processus de stockage

a- Chemins empruntés: stockage-déstockage

Les trajectoires suivies lors des processus de charge et de décharge ont été comparées entre elles (Figure 5, stockage sensible) et (Figure 6, stockage sensible et latent).

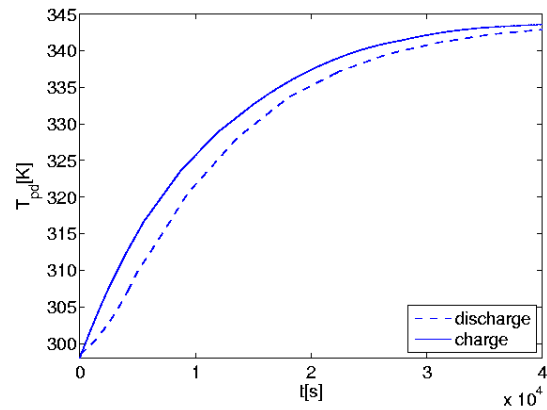


Figure 5 : Évolution de la température des billes de verre en fonction du temps pour les deux processus de charge et de décharge

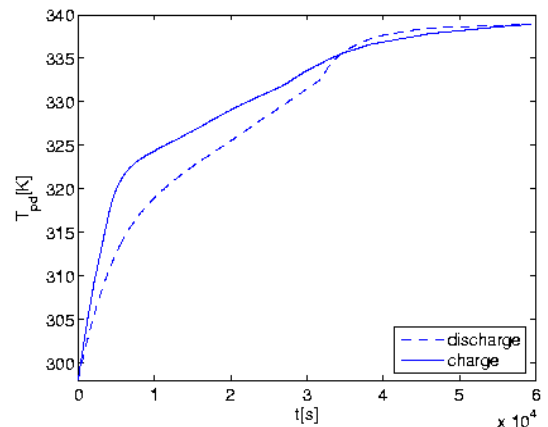


Figure 6 : Évolution de la température du MCP en fonction du temps pour les deux processus de charge (chemin réel) et de décharge (chemin inversé)

Les variations de la température moyenne du système lors de la charge et lors de la décharge ont été représentées en inversant le sens de l'échelle de temps pour la décharge. La phase de décharge consiste à imposer un flux nul à la paroi. On observe une asymétrie de la courbe de température sur un cycle thermique complet. Il s'agit d'un comportement typique des systèmes de stockage à MCP [4,11,15,16]. Le chemin emprunté lors du processus de charge est différent de celui de décharge et la courbe de charge présente une montée un peu plus rapide correspondant à une constante de temps plus faible que pour la décharge [12].

b- Inertie thermique

La figure 7 représente la comparaison des processus de stockage et de récupération par chaleur sensible

(SHS) et par chaleur sensible latente (LSHL). Ces courbes expriment l'évolution de la température moyenne des particules dans tout le domaine poreux. Nous constatons que l'inertie thermique du système est être améliorée par utilisation des capsules contenant un MCP et comparée à un système de stockage par chaleur sensible. Par ailleurs, le stockage par chaleur latente, réduit la température moyenne dans le système ce qui présente un avantage pour le cas des applications dans le domaine du bâtiment.

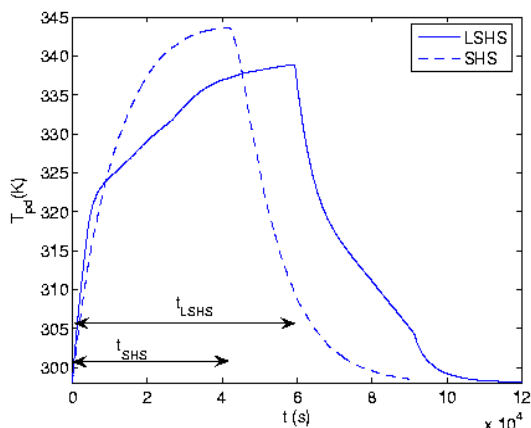


Figure 7 : Comparaison du stockage thermique par chaleur sensible et par chaleur latente

d- Densité de stockage

Pour la géométrie considérée, l'effet du diamètre des billes et des capsules sur la densité d'énergie a été étudié. Dans ce cas particulier, la taille des billes ou des capsules n'a que très peu d'effet. Dans tous les cas, le gain en densité énergétique apporté par l'utilisation du MCP atteint 53 %.

Tableau 3: Comparaison entre les deux modes de stockage, pour des particules de diamètres différents

	Diamètres			
	4 mm	6 mm	8 mm	14 mm
$X_{SHS} (10^4 \text{kJ/m}^3)$	5,97	6,29	6,4	6,46
$X_{LSHS} (10^4 \text{kJ/m}^3)$	9,14	9,57	9,8	9,93
$\frac{X_{LSHS} - X_{SHS}}{X_{SHS}} \%$	53,0	52,1	53,1	53,7

5. CONCLUSION

En remplaçant les billes en verre par des capsules renfermant un matériau à changement de phase, il a été montré que les performances de stockage pourront être améliorées sans atteindre des températures excessives. Le canal rempli par des capsules contenant un MCP présente les avantages suivants : une gamme de températures d'opération plus réduite, une amélioration de la densité énergétique et une inertie thermique plus importante.

Cependant, la transition de phase ne se produisant pas dans la partie basse du canal, la présence de MCP dans cette section n'a que peu d'impact sur la dynamique du système de stockage.

RÉFÉRENCES

- [1] TELKES, M. Thermal storage for solar heating and cooling, in: *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville, Virginia, USA (1975)*
- [2] KUZNIK, F., DAVID, D., JOHANNES, K., ROUX, J.J. A review on phase change materials integrated in building walls. *RSER*, vol. 15, pp. 379–391. (2011)
- [3] ZHOU, D., ZHAO, C.Y., TIAN, Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, vol 92, pp.593–605 (2012)
- [4] DUTIL, Y. et al. Modeling phase change materials behaviour in building applications: comments on material characterization and model validation, *Renewable Energy*, (2012) Accepted
- [5] ZALEWSKI, L., JOULIN, A., LASSUE, S., DUTIL, Y., ROUSSE, D. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material, *Solar Energy*, vol. 86, pp 208–219 (2012)
- [6] JOULIN, A., YOUNSI, Z., ZALEWSKI, L., ROUSSE, D.R., LASSUE, S., A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure, *Int. J. Comp Fluid Dynamics*, vol 23 (7) pp. 553–566 (2009)
- [7] BÉDÉCARRATS, J.P., CASTAING-LASVIGNOTTES, J., STRUB, F., DUMAS, J.P. Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2527–2536 (2009).
- [8] BÉDÉCARRATS, J.P., CASTAING-LASVIGNOTTES, J., STRUB, F., DUMAS, J.P., Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part II: Numerical modeling, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp.2537–2546, (2009)
- [9] KOUKSOU, T., BÉDÉCARRATS, J.P., STRUB, F., CASTAING-LASVIGNOTTES, J. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a phase change thermal energy storage, *Int J. Energy Technol. Policy*. vol. 6(1/2), pp. 143–158, (2008).
- [10] REGIN, A.F., SOLANKI, S.C., SAINI, J.S. An analysis of packed bed latent heat thermal energy storage system using pcm capsules: Numerical investigation, *Renewable Energy*, vol. 34, pp.1765–1773, (2009).
- [11] DUTIL, Y., ROUSSE, D.R., BEN SALAH, N., LASSUE, S. A Review on Phase Change Materials: Mathematical Modeling and Simulations, *RSER*, vol.15(1), pp. 112–130 (2011).
- [12] DHIFAOU, B., BEN JABRALLAH, S., BELGHITH, A., CORRIOU, J.P. 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*, vol.46, pp. 1056–1063 (2007)
- [13] AMIRI, A. et VAFAI, K. Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-darcian, variable porosity incompressible flow through porous media, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 939–954, (1994).
- [14] KAVIANY, M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. Second Edition, *Springer-Verlag*, New York, (1999).
- [15] CITHERLET, S. et BONY, J. Combi-Système avec Matériaux à Changement de Phase. Rapport final 2006, l'Office fédéral de l'énergie OFEN, Institution mandaté, *École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD/LESBAT)*, (2006).
- [16] YOUNSI, Z., ZALEWSKI, L., ROUSSE, D., JOULIN, A., LASSUE, S. A novel technique for the experimental thermophysical characterization of phase change materials, *Int. J. Thermophysics*, vol. 32, pp. 674–692, (2011).