



Etude numérique d'une cuve de stockage thermique par chaleur latente appliquée aux techniques de séchage solaire

B. LAMRANI*, A. KHOUYA**, A. DRAOUI*

*Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Energétique (ETTE– UAE/E14FST) - FST de Tanger - Université Abdelamlek Essâadi (UAE) - Maroc.

**Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI – ENSAtg/L02) - ENSA de Tanger - Université Abdelamlek Essâadi (UAE) - Maroc.

(Email auteur correspondant : blamrani@uae.ac.ma)

Résumé : L'objectif principal de notre étude est de modéliser numériquement une unité de stockage thermique par chaleur latente destinée à être intégrée à un système de séchage solaire du bois. L'étude est réalisée en utilisant la méthode CFD (Computational Fluid Dynamic) à l'aide du code de calcul Fluent. Les simulations ont été effectuées pour trois configurations d'échangeur de chaleur dans la cuve de stockage d'énergie contenant un Matériau à Changement de Phase (MCP) de type (RT82). Nous avons ainsi étudié l'effet d'utilisation des ailettes, l'effet de débit massique et de la température de fluide caloporteur sur la vitesse de la fusion du MCP. Les résultats obtenus nous ont montré que l'utilisation des ailettes dans la cuve de stockage d'énergie permet de favoriser le transfert de chaleur au sein du MCP. Le temps de stockage d'énergie est diminué de plus de 50% en augmentant la température de fluide caloporteur de 85 °C à 95 °C. La vitesse de fusion du MCP est augmentée de 17 % en accroissant le débit massique de fluide caloporteur de 25 kg/h à 200 kg/h.

Mots clés : Stockage latent d'énergie, Matériau à Changement de Phase (MCP), Séchage du Bois, Ailettes, CFD.

1 Introduction

Les techniques de séchage solaire industriel et agricole utilisent l'énergie solaire pendant les périodes ensoleillées. En revanche, pendant les périodes non-ensoleillées, un système de stockage d'énergie pour assurer un séchage continu est nécessaire. Le stockage d'énergie par chaleur latente offre la possibilité de stocker une grande quantité d'énergie par unité de masse [1]–[8] et de la libérer pendant les périodes non-ensoleillées. Cependant, les Matériaux à Changement de Phase (MCP) utilisés ayant une faible conductivité thermique ce qui diminue l'efficacité de système de stockage d'énergie. Dans ce contexte, Zhenyu Liu et al [3] ont présenté une étude numérique sur l'amélioration de transfert de chaleur dans une cuve de stockage d'énergie latente. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la mousse métallique dans la cuve de stockage d'énergie permet d'améliorer le transfert de chaleur dans le MCP. Saeed Riari et al [4] ont effectué une étude numérique sur le stockage thermique d'énergie latente à hautes températures. Un échangeur de chaleur avec ailettes est utilisé pour améliorer le transfert de chaleur dans la cuve de stockage d'énergie. Les résultats obtenus montrent que les dimensions des ailettes ont une influence remarquable sur le temps de stockage d'énergie. Une étude expérimentale sur cinq échangeurs de chaleur utilisés dans le stockage thermique d'énergie latente est présentée par Medrano et al [5]. Les résultats montrent que la combinaison d'un échangeur de chaleur à double tube avec une matrice de graphite contenant le MCP permet d'avoir une vitesse maximale de stockage d'énergie. Dans le but de contribuer à la modélisation numérique des techniques de l'amélioration de transfert de chaleur dans les cuves de stockage thermique d'énergie latente, trois types d'échangeurs de chaleurs sont évalués et l'effet de débit massique et de la température de fluide caloporteurs sur le temps de stockage d'énergie sont présentés.

2 Modélisation mathématique du problème

Le domaine de calcul étudié est une cuve de stockage thermique par énergie latente de dimension (100 mm x 54 mm) contenant un Matériau à Changement de Phase (MCP) de type (RT82) et un échangeur de chaleur avec et sans ailettes (Figure 1). Les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés ainsi que les dimensions des échangeurs de chaleur sont présentées dans le tableau 1 et le tableau 2. Les équations qui gouvernent le problème sont les suivantes :

2.1 Dans le Matériau à Changement de Phase :

✓ Equation de conservation de la masse :

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

✓ Equation de conservation de la quantité de mouvement :

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme :

• Suivant (Ox) :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_x \quad (2)$$

• Suivant (Oy) :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_y \quad (3)$$

p et μ sont respectivement la pression statique et la viscosité dynamique du MCP fluide.

S_x et S_y représentent les termes sources dans les directions x et y , respectivement, utilisés pour modifier les équations de la quantité de mouvement dans la région pâteuse (existence de la phase solide et liquide en même temps). Le modèle de Darcy pour les milieux poreux est utilisé pour modifier les vitesses dans les régions fluide et pâteuse [3]–[10].

$$S_x = A u \quad \text{et} \quad S_y = A v \quad (4)$$

Avec :

$$A = C \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + 0,000001} \quad \text{et} \quad f_l = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \end{cases} \quad (5)$$

C et f_l respectivement la constante du Darcy et la fraction liquide.

✓ Equation de conservation de l'énergie

L'équation de la conservation de l'énergie est donnée par :

$$\left(\frac{\partial \rho H}{\partial t} + u \frac{\partial \rho H}{\partial x} + v \frac{\partial \rho H}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

H : est l'enthalpie du MCP qui est composée de l'enthalpie spécifique h et de l'enthalpie latente ΔH :

$$H = h + \Delta H \quad (7)$$

Avec :

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p T \quad \text{et} \quad \Delta H = f_l L_s \quad (8)$$

2.2 Fluide caloporteur :

L'équation de conservation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$(\rho C_p)_f \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Avec λ_f et ρ_f respectivement la conductivité thermique et la masse volumique du fluide caloporteur.

2.3 Echangeur :

L'équation de conservation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$(\rho C_p)_e \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (10)$$

Avec λ_e et ρ_e respectivement la conductivité thermique et la masse volumique de l'échangeur de chaleur.

✓ *Conditions aux limites et conditions initiales :*

- À l'entrée de l'échangeur, nous avons fixé la température du fluide caloporteur qui arrive du capteur solaire Cylindro-Parabolique (CCP) à $T_{\text{entrée}} = 95^\circ\text{C}$ avec un débit massique de 100 Kg/h.
- À la sortie de l'échangeur, on suppose que l'écoulement est complètement développé imposant un gradient nul de toutes les variables.
- Les parois verticales et horizontales de la cuve sont considérées adiabatiques.
- Initialement le Matériau à Changement de Phase (MCP RT 82) est considéré à l'état solide et tout le système est considéré à une température initiale égale à 30°C .

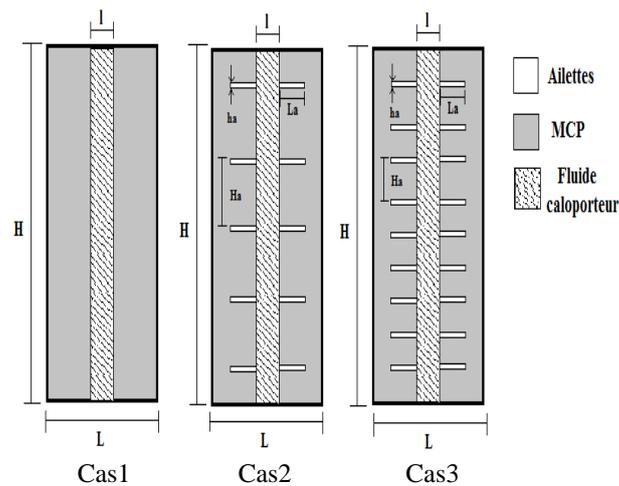


Figure 1 : Modèles physiques de la cuve de stockage d'énergie

Tableau 1: Propriétés thermophysiques des matériaux utilisés [10], [11]

Matériaux	ρ (Kg/m ³)	λ (W/m. °C)	C_p (J/Kg. °C)
MCP (RT82)	825	0,2	2000
Eau	998,2	0,6	4182
Cuivre	8978	387,6	300

Tableau 2 : Dimensions des échangeurs étudiés

Modèle physique	Diamètre (l)	Nombre des ailettes (Na)	Espacement (Ha)	Longueur d'aillettes (La)	Épaisseur d'aillettes
Cas a	14 mm	-	-	-	-
Cas b	14 mm	10	20 mm	10 mm	1 mm
Cas c	14 mm	18	10 mm	10 mm	1 mm

3 Résultats et discussion

Dans le but de modéliser numériquement le stockage d'énergie latente, plusieurs simulations numériques sont effectuées à l'aide du code de calcul fluent. L'influence d'utilisation des échangeurs de chaleur avec et sans ailettes, l'effet de débit massique et de la température du fluide caloporteur sur le processus de stockage d'énergie sont présentées ci-dessous.

3.1 Effet d'utilisation des ailettes et de leur nombre

Afin d'analyser l'effet d'utilisation des ailettes et de leur nombre sur la vitesse de la fusion du MCP, nous avons étudié trois configurations d'échangeur de chaleur (Figure 1) :

- ✓ **Cas n°1:** Cuve de stockage d'énergie latente avec échangeur sans ailettes.

✓ **Cas n°2 :** Cuve de stockage d'énergie latente avec échangeur à dix ailettes.

✓ **Cas n°3 :** Cuve de stockage d'énergie latente avec échangeur à dix-huit ailettes.

L'évolution de la fraction liquide en fonction du temps pour les trois configurations d'échangeur de chaleur est présentée dans la figure 2a. L'utilisation d'échangeur de chaleur avec ailettes a une influence notable sur la vitesse du stockage d'énergie. Le temps nécessaire pour la fusion complète du MCP est réduit de 44% pour le cas d'un échangeur à dix ailettes et environ 49 % en cas d'échangeur à dix-huit ailettes.

La figure 2b illustre la variation de la température moyenne du MCP dans la cuve de stockage d'énergie. Il est à noter que la vitesse d'évolution du champ de température dans le MCP augmente avec le nombre d'ailettes. Ce résultat peut être justifié par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et le fluide caloporteur et donc l'amélioration de transfert de chaleur dans le MCP.

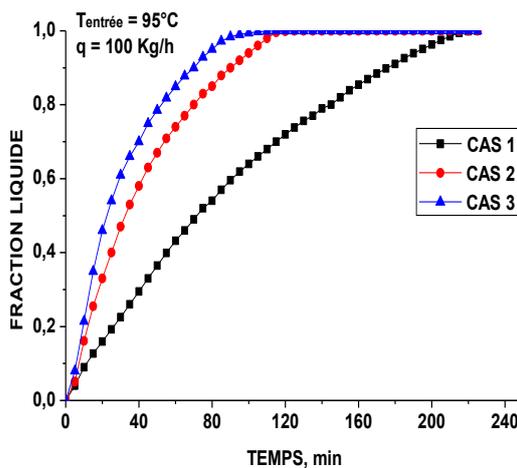


Figure 2a : Variation de la fraction liquide en fonction du temps

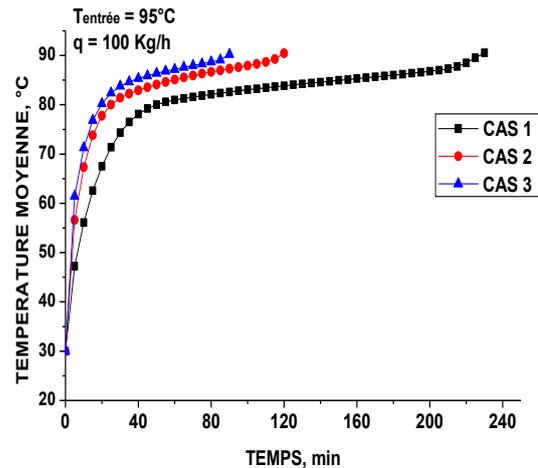


Figure 2b : Evolution de la température moyenne du MCP en fonction du temps

3.2 Effet de débit massique

L'influence de la variation du débit massique de fluide caloporteur sur la vitesse de la fusion du MCP dans la cuve de stockage d'énergie (Cas 3) est présentée dans la figure 3a. Les résultats montrent que le temps nécessaire pour la fusion complète du MCP diminue avec l'augmentation du débit massique. La variation du débit massique de 25 Kg/h à 50 Kg/h provoque une augmentation de 10 % de la vitesse de fusion du MCP et de 7 % en variant le débit massique de 50 Kg/h à 200 Kg/h.

L'évolution de la température moyenne du MCP dans la cuve de stockage d'énergie (Cas 3) est illustrée dans la figure 3b. On peut observer que l'augmentation du débit massique du fluide caloporteur au-dessus de 50Kg/h n'a pas d'influence remarquable sur le temps de stockage d'énergie.

3.3 Effet de la température de fluide caloporteur

La figure 4a présente la variation de la fraction liquide du MCP en fonction du temps dans la cuve de stockage d'énergie (Cas3). On constate clairement que la température du fluide caloporteur a une influence significative sur la vitesse de la fusion du MCP. Le temps nécessaire pour la fusion complète du MCP est diminué de 57 % en augmentant la température de fluide caloporteur de 85 °C à 95 °C.

L'effet de la température de fluide caloporteur sur l'évolution de la température moyenne du MCP est présenté dans la figure 4b. On peut remarquer que la vitesse de propagation de la température dans le MCP augmente avec la température du fluide caloporteur. Par conséquent, le temps de stockage d'énergie est minimal lorsque la température du fluide caloporteur est maximale.

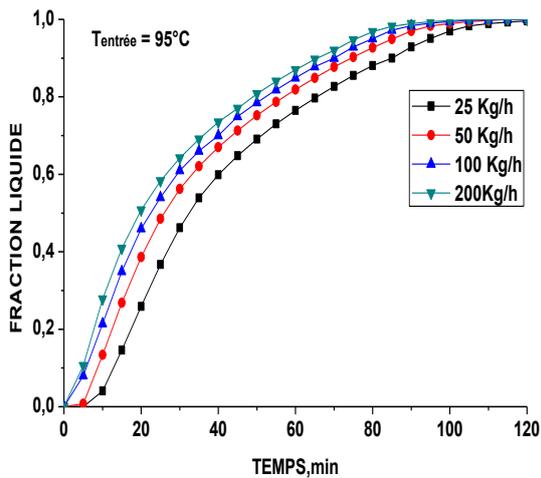


Figure 3a : Variation de la fraction liquide en fonction du temps

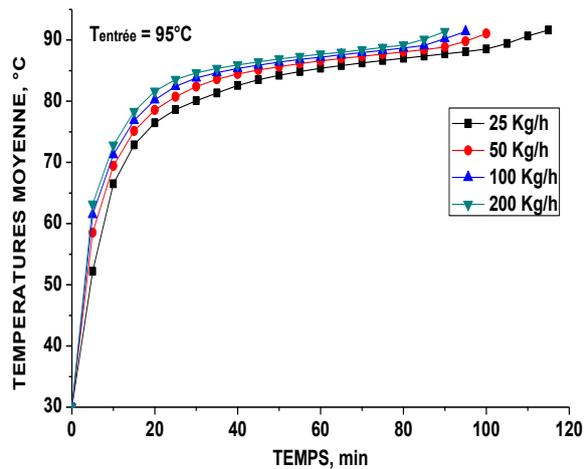


Figure 3b : Evolution de la température moyenne du MCP en fonction du temps

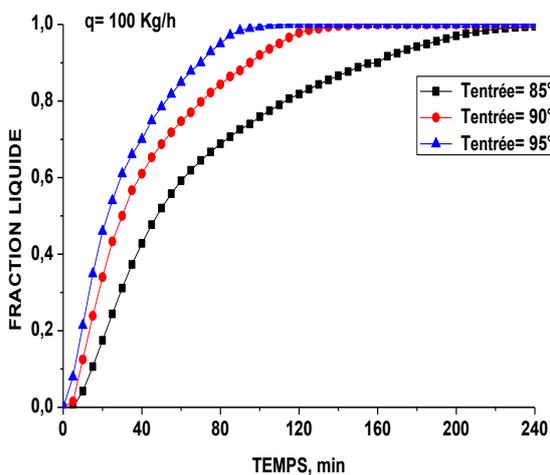


Figure 4a : Variation de la fraction liquide en fonction du temps

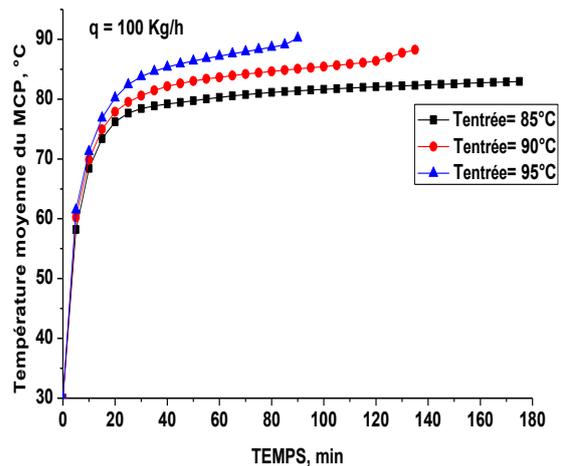


Figure 4b : Evolution de la température moyenne du MCP en fonction du temps

4 Conclusion

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation numérique d'une cuve de stockage thermique par énergie latente destinée à être intégrée à un système de séchage solaire du bois. Trois types d'échangeur de chaleur ont été comparés et l'effet de débit massique et de la température du fluide caloporteur sur la vitesse de fusion du MCP sont évalués. Les conclusions principales de cette étude peuvent être résumées comme suit :

- L'utilisation d'échangeur de chaleur avec ailettes permet d'accélérer la fusion du MCP et de réduire le temps de stockage d'énergie jusqu'à environ 50 % .
- L'augmentation du débit massique de fluide caloporteur au-dessus de 50 Kg/h n'a pas d'influence significative sur le temps de la fusion complète du MCP.
- Le temps nécessaire pour le stockage d'énergie est diminué de 57 % en augmentant la température du fluide caloporteur de 85 °C à 95 °C.

Comme perspectives, nous comptons élargir notre recherche à l'étude de l'influence de débit massique et de la température du fluide caloporteur sur l'efficacité de la cuve stockage d'énergie latente durant les processus de déstockage d'énergie.

Nomenclature

Symbole	Nom, Unité	Symboles grecs
u	Vitesse suivant (x), m/s	μ Viscosité dynamique du fluide, Kg/m.s
v	Vitesse suivant (y), m/s	ρ Masse volumique, Kg/m ³
P	Pression statique, Pa	λ Conductivité thermique, W/m. °C
q	Débit massique, Kg/h	Indices
T	Température, °C	a : Ailette
C_p	Chaleur spécifique, J/Kg. °C	l : Liquide
L_s	Chaleur latente de fusion, J/Kg	s : Solide
f_l	Fraction liquide du MCP	f : Fluide caloporteur
		e : Echangeur de chaleur
		ref : Référence

5 Références

- [1] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 147–156, 2013.
- [2] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 61, no. 1, pp. 684–695, 2013.
- [3] Z. Liu, Y. Yao, and H. Wu, "Numerical modeling for solid-liquid phase change phenomena in porous media: Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 1222–1232, 2013.
- [4] S. Tiari, S. Qiu, and M. Mahdavi, "Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material," *Energy Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 833–842, 2015.
- [5] M. Medrano, M. O. Yilmaz, M. Nogués, I. Martorell, J. Roca, and L. F. Cabeza, "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2047–2055, 2009.
- [6] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins," *Energy Build.*, vol. 68, no. PARTA, pp. 33–41, 2014.
- [7] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins," *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 223–236, 2013.
- [8] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Experimental study of PCM melting in triplex tube thermal energy storage for liquid desiccant air conditioning system," *Energy Build.*, vol. 60, pp. 270–279, 2013.
- [9] A. Agarwal and R. M. Sarviya, "An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 619–631, 2016.
- [10] ANSYS Fluent 15.0 User's Guide. .
- [11] <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>.