

# STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE: EFFET DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET GÉOMÉTRIQUES SUR LES PERFORMANCES DE STOCKAGE

Fouzi BENMOUSSA<sup>1</sup>, Hocine BENMOUSSA<sup>1</sup>, Ahmed BENZAOU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire (LESEI), Département de Mécanique, Université de Batna, benmoussa\_fouzi@yahoo.fr

<sup>1</sup>Laboratoire (LESEI), Département de Mécanique, Université de Batna, hocine\_b@hotmail.com

<sup>2</sup>Faculté de Physique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumedienne (USTHB),  
a1benzaoui@yahoo.fr

## RÉSUMÉ

Les systèmes de stockage thermiques, basés sur le stockage de chaleur latente, ont été appropriés, particulièrement dans les applications thermiques solaires. Dans cette étude une comparaison quantitative a été développée, qui vise une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS (Latent Heat Storage), sous l'effet de plusieurs paramètres physiques, tels que vitesse et température d'entrée du fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) et paramètres géométriques, tels que le diamètre de la conduite de stockage sur le temps du processus de fusion, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion du PCM (Phase Change Material). Les résultats prouvent que bien que l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur ainsi que sa température puisse augmenter le taux de fusion du PCM et réduit le temps complète de fusion. L'augmentation de rayon du tube a permis d'avoir un temps de fusion relativement long par rapport aux autres paramètres.

**Mots Clés :** *Stockage thermique par chaleur latente, Matériaux à changement de phase, Chaleur sensible, Chaleur latente, Performance de stockage.*

---

## NOMENCLATURE

### Symboles

$C_p$	Chaleur spécifique, J. Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$Q_m$	Débit massique, Kg. s <sup>-1</sup>
$T_M$	Température de fusion de PCM, K
$U$	Vitesse d'écoulement, m.s <sup>-1</sup>
$k$	Conductivité thermique, W. m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$t$	Temps, s
$x$	Coordonnée axiale, m
$r$	Coordonnée radiale, m

### Lettres grecques

$\rho$	Masse volumique, Kg. m <sup>-3</sup>
$\Delta H$	Chaleur latente de fusion, KJ. Kg <sup>-1</sup>
$\mu$	Viscosité dynamique, Kg. m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\theta$	Température relative (T-T <sub>M</sub> ), K
$\beta$	Fraction liquide du PCM

### Indices / Exposants

$f$	Fluide caloporteur
$pcm$	Matériau à changement de phase

---

## 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. L'une des solutions envisagées pour faire face à ce problème 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 de l'échangeur et par la nature du matériau servant à stocker l'énergie [1-2]. Ainsi, l'énergie thermique peut être alors stockée sous forme de chaleur sensible, ou bien sous forme de chaleur latente ou même les deux à la fois [3]. Le stockage thermique peut utiliser la chaleur latente de changement d'état,

particulièrement la chaleur latente de fusion qui permet la récupération à un niveau de température constant [4]. L'énergie thermique peut être stockée de façon isotherme grâce à un changement de phase des matériaux. Durant l'étape de charge, l'énergie thermique fournie au média permet son échauffement, puis son changement de phase et éventuellement sa surchauffe. Celui-ci est ensuite stocké à la température de charge. Lors de la restitution de l'énergie celui-ci change de nouveau de phase pour restituer l'énergie stockée et reprendre son état initial [5]. Les procédés de stockage d'énergie thermique par chaleur latente sont généralement des systèmes de stockage passifs. Le fluide caloporteur passe dans le stockage uniquement pendant les phases de charge et de décharge. Le matériau de stockage ne circule pas, il est séparé du fluide caloporteur. Pour assurer le transfert de chaleur entre les deux, des échangeurs de chaleur sont utilisés. Les systèmes Shell-and-tube heat storage unit est la technologie la plus prometteuse dans ce type de stockage, l'efficacité thermique moyenne de charge et de décharge est importante. Dans cette étude une comparaison quantitative a été développée qui vise une étude numérique des performances d'une unité de stockage thermique par chaleur latente LHS sous l'effet de plusieurs paramètres physiques, tels que vitesse et température d'entrée du fluide HTF et paramètres géométriques, tels que le diamètre de la conduite de stockage sur le temps du processus de fusion, le taux de stockage thermique et la fraction de fusion du PCM.

## 2. MODELE PHYSIQUE ET EQUATIONS GOUVERNANTES

### 2.1. MODELE PHYSIQUE

Les dimensions du modèle physique et les conditions de fonctionnement sont semblables au travail de W. Wei-Wei & al [6] et M. Lacroix [7]. La longueur du domaine de calcul est  $L=1$  m, le rayon du tube intérieur  $R_1=0.635$  cm, le rayon du tube extérieur est  $R_2=1.29$  cm, les tubes sont construit en cuivre (Figure 1). Le fluide caloporteur (HTF: l'eau) circule en régime laminaire à l'intérieur du tube interne est soumis à une température d'entrée constante. Le matériau de stockage par chaleur latente utilisé est le n-octadécane, sa température de fusion est  $T_M=300.7$  K. Les propriétés thermo-physiques du PCM et cuivre sont mentionnées dans le Tableau 1. La température initiale du PCM est  $T=282.7$  K pendant le processus de fusion. La température d'entrée du fluide caloporteur varie entre ( $T=302.7$  K et  $T=325.7$  K). Dans cette étude la différence entre la température d'entrée du fluide HTF et la température de fusion du PCM varie entre (+ 2K et + 25K). La vitesse d'entrée du fluide HTF aussi varie entre ( $U=0.01$  m/s et  $U=0.6$  m/s). La fusion est traitée comme un problème à conduction bidimensionnelle.



FIGURE 1.a. Schémas du système Shell-and-tube heat storage unit

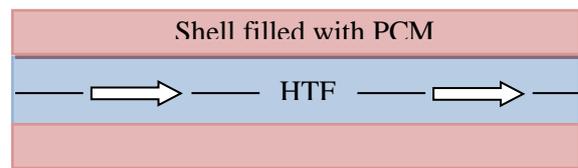


FIGURE 1.b. Configuration du modèle physique LHS

	n-octadécane	Cuivre
Température de fusion, (K)	300.7	/
Chaleur latente, (KJ. kg <sup>-1</sup> )	243.5	/
Conductivité thermique, (W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.358	398
Chaleur spécifique, (J. kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	2222	386
Masse volumique, (kg. m <sup>-3</sup> )	771	8930
Viscosité dynamique, (Kg. m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	3.107.10 <sup>-3</sup>	/

**TABLEAU 1.** Propriétés thermo-physiques du n-octadécane et cuivre [6, 7]

## 2.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

- Le fluide est supposé incompressible et newtonien
- L'écoulement est supposé laminaire
- Les propriétés thermo physiques du PCM et HTF sont constantes
- L'effet de la convection naturel pour la phase liquide de PCM est négligé
- La surface externe de paroi est supposée adiabatique
- La paroi du tube intérieur est supposée mince et le matériau qui la constitue est supposé un bon conducteur thermique

## 2.3. EQUATIONS GOUVERNANTES

### 2.3.1. Formulation mathématique pour HTF

$$(\rho C_p)_f \left( \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial t} + U(r) \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial x} \right) = k_f \left( \frac{\partial^2 T_f(x, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} \right) \quad (1)$$

$$x > 0, \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0$$

### 2.3.2. Formulation enthalpique pour PCM

$$(\rho C_p)_{pcm} \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial t} = k_{pcm} \left( \frac{\partial^2 T_{pcm}(x, r, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right) \right) - \rho_{pcm} \Delta H \frac{\partial \beta}{\partial t} \quad (2)$$

$$x > 0, \quad R_1 < r < R_2, \quad t > 0$$

$\beta$  et la fraction liquide du PCM qui est estimée comme suit :

$$\left. \begin{array}{lll} \beta = 0, & \theta < 0 & \text{Solide} \\ 0 < \beta < 1, & \theta = 0 & \text{Solide+ Liquide} \\ \beta = 1, & \theta > 0 & \text{Liquide} \end{array} \right\}$$

### 2.3.3. Conditions aux limites pour HTF

$$\begin{cases} U(0, r, t) = U_0 \\ T_f(0, r, t) = T_0 \end{cases} \quad 0 < r < R_1, \quad t > 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial U(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T_f(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (4)$$

### 2.3.4. Conditions aux limites pour PCM

$$\left. \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0 \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad R_1 < r < R_2, t > 0 \quad (6)$$

L'égalité des flux d'échange à l'interface HTF/PCM est donné par:

$$h_f(T_f - T(x, r = R_1, t)) = -k_{pcm} \left. \frac{\partial T_{pcm}(x, r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_1} \quad x > 0, r = R_1, t > 0 \quad (7)$$

### 3. METHODE DE RESOLUTION ET DISCRETISATION

L'approche de volume fini a été adoptée pour discrétiser les équations gouvernantes, en raison du couplage de transfert énergétique entre le HTF et PCM, les équations de conservation de l'énergie pour le HTF et PCM sont intégrées ensemble pour résoudre le problème de transfert thermique sur la totalité du domaine physique.

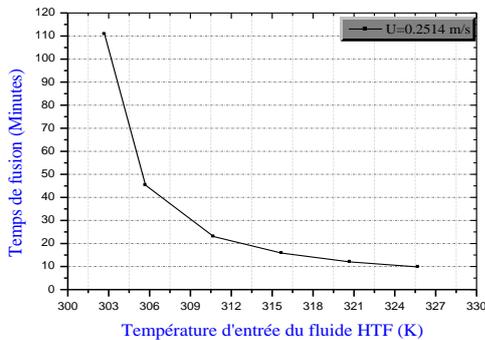
### 4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 4.1. EFFETS DE LA TEMPERATURE D'ENTREE DU FLUIDE CALOPORTEUR HTF

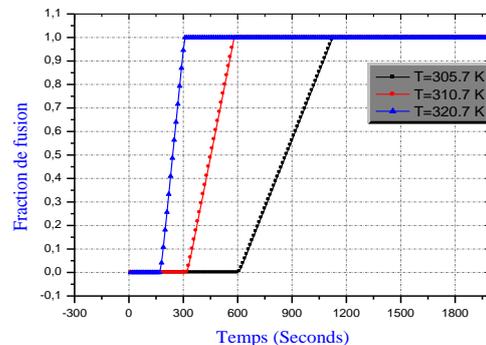
L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion du PCM est montré sur la **Figure 2**. Avec une augmentation de température d'entrée du fluide HTF, la différence de température entre le HTF et PCM augmente qui permet d'avoir un taux de fusion du PCM relativement important. Donc le temps de fusion diminue. Quand la température d'entrée augmente de 302.7 K jusqu'à 325.7 K, le temps de fusion diminue de 110.83 min à 9.83 min, ce qui réduit le temps de fusion à 90 %.

L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF sur la fraction de fusion du PCM est montré sur la **Figure 3**. De la figure, on peut remarquer que le processus de fusion de l'unité LHS peut être divisé en trois étapes: (1) la première étape est l'étape de stockage par chaleur sensible, où la température de PCM est inférieure à la température de fusion (300.7 K) et la fraction de fusion est zéro; (2) la seconde est l'étape de stockage par chaleur latente, où la température de PCM atteint la température de fusion, et la fraction de fusion augmente de zéro à un; (3) la troisième est l'étape de stockage par chaleur sensible, où le PCM est complètement fusionné, et la température est plus grand que la température de fusion.

Dans la première étape, avec une augmentation de température d'entrée du fluide HTF, la différence de température entre le HTF et PCM augmente, qui cause une augmentation très rapide de la température du PCM jusqu'à la température de fusion. Ainsi, l'étape de stockage par chaleur sensible diminue avec l'augmentation de température d'entrée. Pour la deuxième étape, une faible différence de température entre HTF et PCM permet d'avoir un temps de fusion relativement long.



**FIGURE 2.** Effet de la température d'entrée du



**FIGURE 3.** Effet de la température d'entrée du

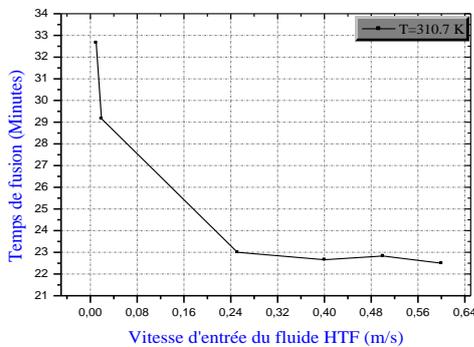
fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion

fluide caloporteur HTF sur la fraction de fusion.

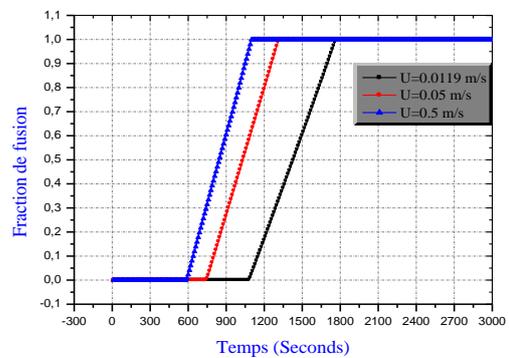
#### 4.2. EFFETS DE LA VITESSE D'ENTREE DU FLUIDE CALOPORTEUR HTF

L'effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion du PCM est montré sur la **Figure 4**. Avec l'augmentation de la vitesse d'entrée du fluide HTF, le coefficient de transfert thermique par convection augmente, qui mène une augmentation de taux de transfert thermique entre le HTF et le PCM. Donc le temps de fusion diminue. Le temps de fusion diminue de 32.66 min à 22.5 min avec une augmentation de vitesse d'entrée de 0.01 m/s à 0.6 m/s, ce qui réduit le temps de fusion à 32 %.

L'effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF sur la fraction de fusion du PCM est montré sur la **Figure 5**. La première étape est l'étape de stockage par chaleur sensible, avec l'augmentation de vitesse d'entrée, le transfert thermique entre le HTF et le PCM est amélioré, qui cause une augmentation très rapide de la température du PCM jusqu'à la température de fusion. Ainsi, l'étape de stockage par chaleur sensible diminue avec l'augmentation de vitesse d'entrée. Pour la deuxième étape, une faible vitesse d'entrée du fluide HTF permet d'avoir un temps de fusion relativement long.



**FIGURE 4.** Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion.



**FIGURE 5.** Effet de la vitesse d'entrée du fluide caloporteur HTF sur la fraction de fusion.

#### 4.3. EFFETS DU DIAMETRE DE TUBE

Dans cette section, les effets du diamètre (Rayon) de tube sur les performances de l'unité LHS seront étudiés sous le même débit massique ( $Q_m = 0.0315 \text{ Kg/s}$ ), et température d'entrée du fluide HTF ( $T=310.7 \text{ K}$ ). L'effet du diamètre (Rayon) de tube sur le temps de fusion du PCM est montré sur la **Figure 6**. Avec l'augmentation du rayon interne du tube, le temps de fusion augmente. Puisque le domaine circulaire est constant. En même temps, le débit massique pour HTF est constant. Alors la vitesse diminue et le taux de transfert thermique est affaibli. Quand le rayon interne augmente de 0.00635 m (la vitesse correspondante est 0.2514 m/s) à 0.05 m (la vitesse correspondante est 0.004 m/s), le temps de fusion augmente de 23 min à 46.83 min, ce qui augmente le temps de fusion à 49 %.

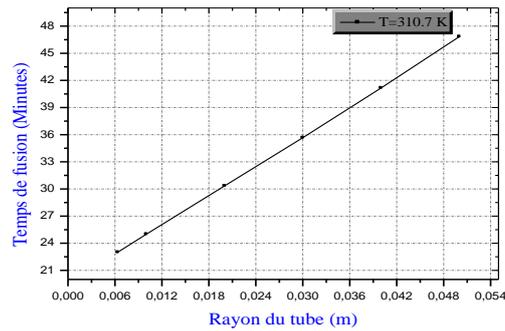


FIGURE 6. Effet du diamètre (Rayon) de tube sur le temps de fusion.

## 5. CONCLUSION

Les résultats montrent d'après les paramètres physiques et géométriques étudiés que la température d'entrée du fluide caloporteur HTF a le plus grand effet sur le taux de transfert thermique de l'unité de stockage thermique LHS, notamment ce qui concerne l'évolution du temps de fusion. Pour une augmentation de la température d'entrée du HTF de 302.7 K jusqu'à 325.7 K, le temps de fusion réduit à 92%. Le deuxième facteur qui a une influence importante sur le processus de fusion est la vitesse d'entrée du fluide caloporteur. Quand la vitesse d'entrée augmente de 0.01 m/s à 0.6 m/s, le temps de fusion réduit à 32%. L'effet de la géométrie (rayon du tube) de cette unité de stockage sur le processus de fusion est bien remarquable. L'augmentation du rayon du tube a permis d'avoir un temps de fusion long par rapport aux précédents. Avec une augmentation du rayon interne de tube de 0.00635 m à 0.05 m, le temps de fusion augmente à 49 %.

## REFERENCES

- [1] D.E. Beasley and C. Ramanarayan, Thermal Response of Packed Bed of Spheres Containing a phase change material, *International Journal of Energy Research*, 13, 253-265, 1989.
- [2] A. Benmansour and 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.
- [3] 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.*
- [4] J. Pantaloni, O. Favre, R. Bailleux, G. Finiels and J. Marchisio, Stockage thermique de l'énergie par chaleur latente de fusion d'un sel minéral: étude d'un échangeur dynamique à contact direct avec cristallisation du sel durant l'écoulement, *Revue de Physique Appliquée*, 14, 113-124, 1979.
- [5] M.P. Pardo, Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, *Thèse Ph.D, Université de Toulouse, 2013.*
- [6] W.W Wang, K. Zhang, L.B.Wang and Y.L. He, Numerical study of the heat charging and discharging characteristics of a shell-and-tube phase change heat storage unit, *Applied Thermal Engineering*, 58, 542-553, 2013.
- [7] M. Lacroix, Numerical simulation of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *Solar Energy*, 50, 357-367, 1993.