



## Amélioration des performances du stockage de l'énergie par les nanofluides

Abir CHERIF & Hassen ABBASSI

Unité de dynamique des fluides et phénomènes de transfert

École Nationale d'Ingénieurs. Université de Sfax-Tunisie

*Cherif.abir@hotmail.com; hassen.abbassi@fss.rnu.tn*

### Résumé :

Dans ce travail, on présente une étude sur le stockage de l'énergie par les Matériaux à Changement de Phase (MCP). Le matériau considéré dans cette étude est la paraffine. Le stockage de l'énergie ainsi que le déplacement du front de fusion-solidification sont étudiés numériquement par la résolution de l'équation de la chaleur. La méthode des différences finis implicite combinée avec le modèle de la capacité thermique du MCP sont utilisés. Le modèle numérique obtenu est validé par application sur le problème classique de Stefan dont on connaît la solution exacte. Dans le but d'améliorer les performances thermiques du MCP, on propose d'étudier l'effet de l'ajout de particules solides de tailles micrométriques sur le temps de fusion. Il est largement connu que l'ajout des nano-solides, souvent de conductivité thermique élevée à un fluide de base aboutit à un nanofluide de conductivité thermique supérieur à celle du fluide de base. C'est dans le but d'accélérer le processus de fusion-solidification que nous proposons l'étude de l'ajout des nanosolides.

**Mots clés :** Matériaux à changements de phases (MCP), Fusion, Stockage, Nano-solide, méthode de capacité calorifique.

### 1. Introduction

La nature intermittente de l'énergie solaire impose la recherche des solutions de stockage. Pendant le jour et surtout à midi, cette énergie est abondante, pendant la nuit c'est l'absence totale. Le problème est comment stocker l'énergie lorsqu'elle est abondante pour l'utiliser ultérieurement. L'une des solutions consiste à utiliser des Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les matériaux considérés sont souvent ceux qui permettent un changement d'état physique dans une plage de température relativement basse (entre 10 et 80°C).

S.Canbazog̃lu et al.[1] ont étudié un système de stockage de l'énergie solaire où le MCP est plongé dans un collecteur solaire remplie d'eau et relié dans un grand réservoir. Le modèle montre que le système de stockage de l'énergie thermiques solaires s'associé avec un MCP est capable d'être utilisé efficacement et largement dans les applications pratiques. Shuja et al. [2] ont effectué des recherches expérimentales et numériques sur les caractéristiques thermiques de MCP (n-octadécane) intégré à des mailles métalliques. Ils ont examiné l'effet de la géométrie du maillage sur le temps de fusion pour deux arrangements de mailles métalliques différentes. Les résultats montrent que le temps de fusion du MCP est le plus court pour la géométrie

de maille triangulaire puis suivi des mailles rectangulaires puis hexagonales. Jourabian et al. [3] ont examiné numériquement la fusion de la glace dont les caractéristiques thermiques sont modifiées par une dispersion à faible concentration de nanosolides de cuivre Cu. Leurs résultats montrent qu'en raison de l'amélioration de la conductivité thermique, l'effet de la fraction volumique des nanoparticules sur le taux de transfert de chaleur et la vitesse du front de fusion est plus importants qu'en absence de nanoparticules Cu. Sebti et al. [4] ont effectué une étude numérique concernant l'amélioration du transfert de chaleur pendant le processus de fusion dans une cavité carré 2D par dispersion des nanoparticules. Leurs résultats montrent que la dispersion des nanoparticules dans le MCP entraîne l'augmentation de la conductivité thermique et par la suite la diminution du temps de fusion. Ils ont montré que l'influence des nanoparticules sur la diminution du temps de fusion devient plus significative lorsque la différence de température entre la température de fusion et la température de la paroi chaude augmente. Elbahjaoui et al. [5] ont présenté une étude numérique de la fusion d'un MCP mélangé avec une dispersion des nanoparticules ( $Al_2O_3$ ) dans une unité de stockage de chaleur latente. Ce dernier est composé par un certain nombre des plaques verticales et identiques séparés par des canaux rectangulaires à travers lesquels passe un fluide. Les résultats montrent que les nanoparticules dispersés augmentent d'une manière significative la fraction de fusion et le taux de charge thermique.

L'objectif de ce travail est d'étudier en une première étape, le stockage de l'énergie par chaleur latente par un bloc de paraffine utilisée comme étant un MCP. En une deuxième étape, on présentera une étude concernant le stockage de l'énergie par la paraffine auquel on a ajouté une faible concentration de particules solides  $Al_2O_3$ . L'effet de la concentration des nanosolides sur le système de stockage est examiné.

## 2. Modèle mathématique

Il existe différentes méthodes pour modéliser un problème de changement de phase solide-liquide. Parmi ces méthodes on peut citer la méthode enthalpique, la méthode de la capacité thermique et l'équation de la chaleur combinée avec la condition de Stefan qui donne une condition sur le front de fusion/solidification. Dans cette étude nous allons utiliser la méthode de la capacité thermique. Dans ce modèle, la fusion se fait dans un intervalle de température restreint  $[T_{sd}, T_{liq}]$  et centré par la température de fusion  $T_f$ . La zone de fusion ne diffère du reste du matériau que par une absorption intense de l'énergie thermique, c'est-à-dire une grande capacité thermique. Dans le cas de la fusion à une dimension, le modèle de la capacité thermique est le suivant [2]:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Avec  $\rho C_p(T)$  est le produit de la masse volumique par la capacité thermique massique, modélisé comme étant un seul terme,  $k(T)$  est la conductivité thermique. Ces deux termes sont modélisés de la façon suivante :

$$\rho C_p(T) = \begin{cases} \rho_s C_{p_s} ; T \leq T_{sd} \\ \rho_l C_{p_l} ; T \geq T_{liq} \\ \frac{\rho_{mélange} \cdot Lat}{T_{liq} - T_{sd}} ; T_{sd} \leq T \leq T_{liq} \end{cases} \quad (2)$$

$$k(T) = \begin{cases} k_s & T \leq T_{sd} \\ k_l & T \geq T_{liq} \\ \frac{k_s - k_l}{T_{liq} - T_{sd}} \cdot (T - T_{liq}) + k_l; & T_{sd} \leq T \leq T_{liq} \end{cases} \quad (3)$$

Où  $L_{at}$  est la chaleur latente de fusion du MCP.

Le tableau suivant donne les propriétés de la paraffine utilisée.

k	$\rho$	$C_p$	Lat	$T_f$
$W. m^{-1}. K^{-1}$	$kg. m^{-3}$	$kJ.kg^{-1}. K^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$	$^{\circ}C$
Solide : 0.15	14	2.15	244	28
Liquide : 0.148	774	2.18		

Tableau 1 : propriétés thermo physiques de la paraffine  $C_{18}H_{38}$  [6, 7, 8].

### 3. Modèle numérique

Pour ce travail, nous avons choisi la méthode des différences finies implicite. En un point (i) et à l'instant (k), l'équation de chaleur discrétisée s'écrit de la façon suivante :

$$\rho(i)C_p(i)(T_i^{k+1} - T_i^k) = k \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i-1}^{k+1} - 2T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}) \quad (4)$$

On pose:

$$c(i) = \frac{k}{\rho(i)C_p(i)} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

$$ap(i) = 1 + 2c(i)$$

Alors l'équation (4) prend la forme suivante :

$$-c(i) * T_{i-1}^{k+1} + ap(i) * T_i^{k+1} - c(i) * T_{i+1}^{k+1} = T_i^k \quad (5)$$

A cette équation, on associe les conditions aux limites thermiques en  $x=0$  et en  $x=e$ , on notera  $T_1$  et  $T_e$  les températures respectives. Ces températures peuvent être une donnée, comme elles peuvent être calculées par des conditions sur le flux de chaleur. L'équation (5) écrite pour  $i=1$  jusqu'à  $i=n$ , donne le système à matrice tridiagonale suivante où seule les éléments non nuls sont indiqués :

$$\begin{pmatrix} 1 & \cdot \\ -c(2) & ap(2) & -c(2) & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -c(i) & ap(i) & -c(i) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -c(n-1) & ap(n-1) & -c(n-1) & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2^{k+1} \\ T_3^{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ T_i^{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{n-1}^{k+1} \\ T_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2^k \\ T_3^k \\ \cdot \\ \cdot \\ T_i^k \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{n-1}^k \\ T_e \end{pmatrix} \quad (6)$$

### 4. Résultats et discussions

On va commencer l'étude numérique par une validation du modèle que nous avons choisi. On considère alors le problème de Stefan relatif à la fusion d'un bloc de MCP initialement à l'état solide et à la température de fusion  $T_f$ , sur la face  $x=0$  on impose une température  $T_w$  supérieur à  $T_f$ . Un front de fusion prend naissance en  $x=0$  et se propage vers l'intérieur du MCP. La figure 1 montre le système que nous allons étudier et sur lequel on va effectuer la validation. La position du front de fusion  $s(t)$  est donnée par la solution exacte du problème de Stefan :

$$s(t) = 2. \lambda \sqrt{\alpha_l \cdot t} \quad (7)$$

Où  $\lambda$  est la solution de l'équation suivante :

$$\lambda \operatorname{erf}(\lambda) e^{\lambda^2} = \frac{St}{\sqrt{\pi}} \quad (8)$$

$St$  représente le nombre de Stefan, donné par la relation :

$$St = \frac{c_p(T_w - T_f)}{L_{at}}$$

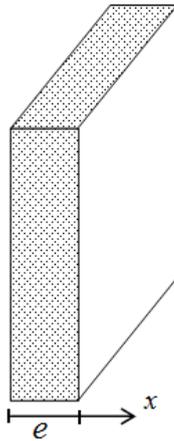


Figure 1 : Modèle du MCP utilisé.

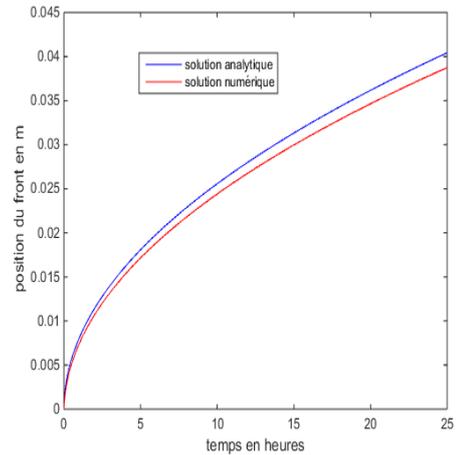


Figure2 : Evolution de la position du front de fusion

Dans cette validation, la variable  $\lambda$  dans l'équation (8) est déterminée par la méthode de Newton-Raphson. La température à la limite en  $x=0$  est  $T_w=40^\circ\text{C}$ . La figure 2 montre un accord acceptable des résultats numériques obtenue avec notre code MATLAB de la paraffine avec les solutions analytiques. L'erreur relative au temps final est de l'ordre de 5%.

La figure (3) montre la distribution de la température suivant  $x$  dans le MCP pour 9 instants différents séparés d'un pas de temps égale à 3 heures à partir du profil initial correspondant à l'instant  $t_1$ . Dans la zone fluide, on observe une forte variation de la température, tandis que la zone solide est caractérisée par une faible variation. En effet la zone de fusion qui sépare le milieu liquide du milieu solide est gourmande en énergie, c'est la chaleur latente de changement de phase, il faut que la température s'élève dans la zone liquide pour avoir l'énergie suffisante pour effectuer la fusion du MCP.

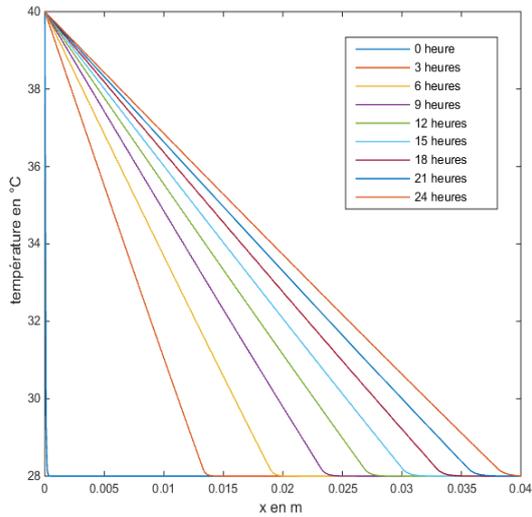


Figure 3 : variation de la température en fonction de l'abscisse x ;  $T_f=28^\circ\text{C}$ ,  $T_w=40^\circ\text{C}$ .

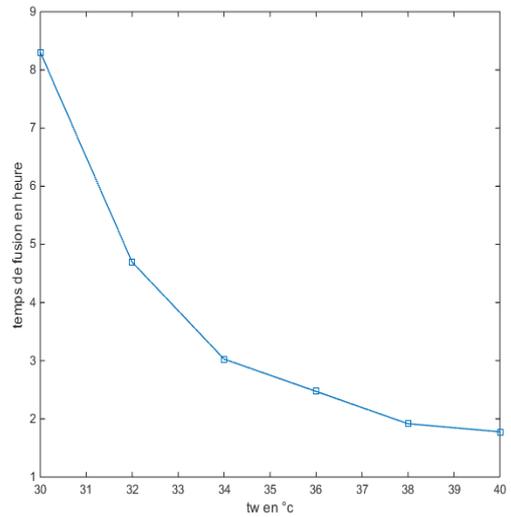


Figure 4 : Temps de fusion du MCP en fonction de la température sur la face  $x=0$ ,  $e=1\text{cm}$

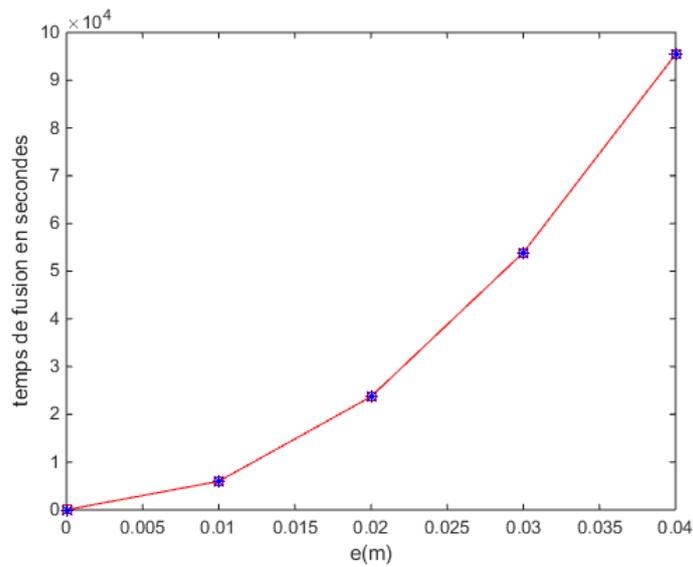


Figure 5 : Temps de fusion en fonction de l'épaisseur du MCP,  $T_w=40^\circ\text{C}$ .

les effets de la variation de la température  $T_w$  imposé en  $x=0$  et de l'épaisseur du MCP ( $e$ ) sur l'évolution de la position du front de l'interface solide liquide sont étudiés. La figure (4) montre que le temps de fusion diminue rapidement lorsque la température  $T_w$  augmente.

La figure (5) montre le temps de fusion en fonction de l'épaisseur ( $e$ ) du MCP. On observe que plus on augmente ( $e$ ) plus le temps de fusion augmente en suivant une allure parabolique du fusion  $t_f = ae^2 + be + c$ . En utilisant la méthode d'interpolation par un polynôme de degré deux et en utilisant la méthode des moindres carrés, le calcul numérique montre que  $b$  et  $c$  sont nul et que :

$$t_f = 5.972 \times 10^7 e^2$$

Ce résultat est conforme au comportement théorique où  $a=5.5043 \cdot 10^7$  SI soit une déviation par rapport au modèle numérique d'environ 8%.

Dans le deuxième cas de simulation, on suppose que sur la face  $x=0$  du système, le MCP échange de la chaleur par convection naturelle avec le milieu extérieur à température  $T_\infty$ . L'égalité des deux densités de flux de chaleur par conduction et par convection au niveau de cette face impose la condition suivante :

$$h(T_\infty - T_1) = -k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \quad (9)$$

Où  $h$  désigne le coefficient d'échange convectif. Par la méthode des différences finies, la température  $T_1$  sur la face  $x=0$  est alors calculée de la façon suivante :

$$T_1 \left[ 1 + \frac{k}{h \cdot \Delta x} \right] = T_\infty + \frac{k}{h \cdot \Delta x} T(2) \quad (10)$$

La figure 6 montre le déplacement de l'interface solide-liquide. Initialement Le MCP est complètement solide à température  $T_0=25^\circ\text{C}$ . L'apparition du front de fusion n'est observée qu'après un moment permettant au MCP d'atteindre la température de fusion. Comme pour le cas du problème de Stefan, le reste de la courbe suit une allure comme la racine carré de temps.

La figure 7 représente les profils de la température dans le MCP pour différents instants pris à intervalles de temps égaux à 30mn. L'allure des profils est le même que celui de la figure 3 mais la température sur la face  $x=0$  augmente au cours du temps sous l'effet de la convection naturelle.

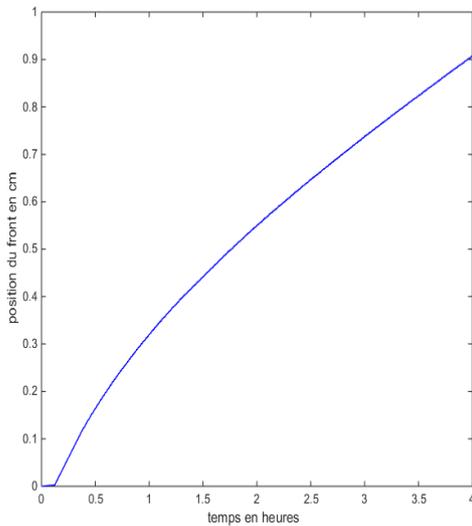


Figure 6 : Evolution de l'interface solide-liquide en fonction du temps  $h=105\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ,  $e=1\text{cm}$ ,  $T_\infty=35^\circ\text{C}$ .  
 $T_0=25^\circ\text{C}$

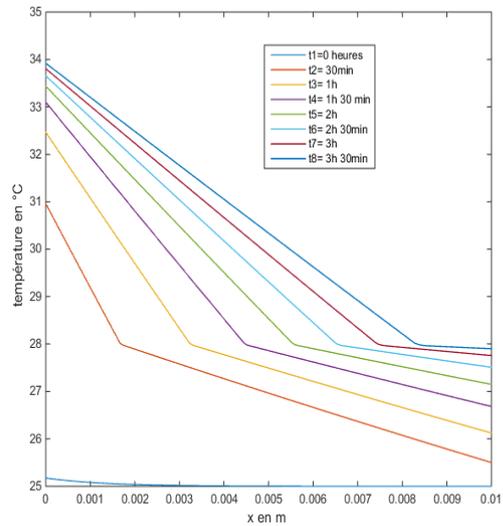


Figure7 : variation de la température en fonction de l'abscisse  $x$  ;  $e=1\text{ cm}$ ,  $T_0=25^\circ\text{C}$ ,  $h=105\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $T_\infty=35^\circ\text{C}$ .

Le stockage par chaleur latente est représenté sur la figure (8) où l'évolution de l'enthalpie du bloc du MCP exprime le processus de stockage. La courbe se décompose en 3 parties, la première partie correspond à un stockage de l'énergie par chaleur sensible à l'état solide, dans la deuxième partie, la température est presque fixe

à celle de la fusion, et le MCP stocke une grande quantité de chaleur grâce au changement de phase. La troisième partie est comme la première mais cette fois le MCP est complètement liquide. La figure 9 donne l'évolution de la température au centre du MPC. Initialement, le MCP est à l'état solide, l'évolution de la température au point considéré suit une variation linéaire en fonction du temps, lorsque la température atteint celle de la fusion, celle-ci reste presque constante jusqu'à la fusion totale puis l'augmentation reprend.

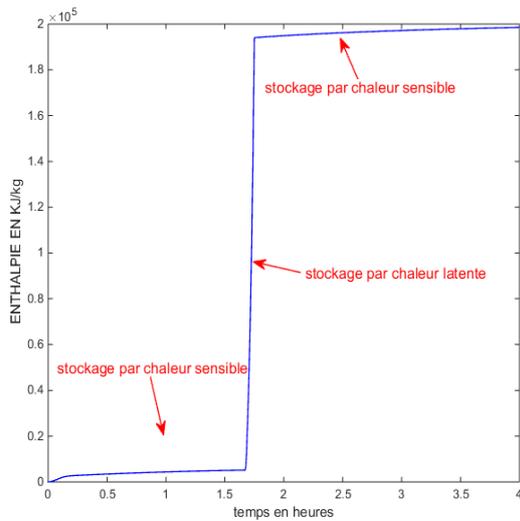


Figure 8 : évolution de l'enthalpie d'un point du bloc du MCP ;  $e=1\text{cm}$ ,  $T_f=28^\circ\text{C}$ ,  $h=105\text{wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ ,  $T_\infty=35^\circ\text{C}$ .

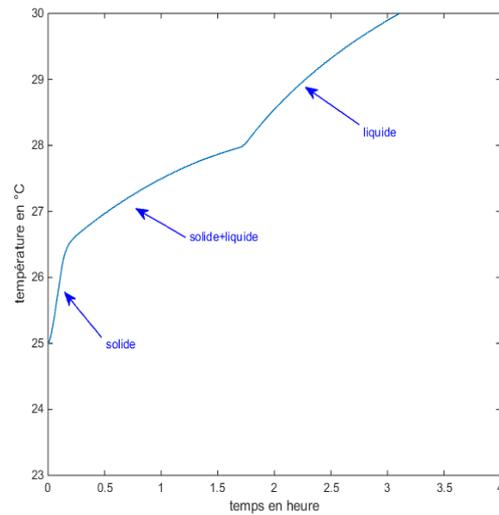


Figure 9 : évaluation de température en un point du MCP en fonction du temps(h);  $T_f=28^\circ\text{C}$ ,  $e=1\text{cm}$ ,  $h=105\text{wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ ,  $T_\infty=35^\circ\text{C}$ .

La figure 10 présente l'évolution du temps de fusion du MCP en fonction du coefficient de convection naturelle ( $h$ ) en  $x=0$ , cette figure montre que le temps de fusion diminue rapidement lorsque la valeur du coefficient de convection naturelle augmente.

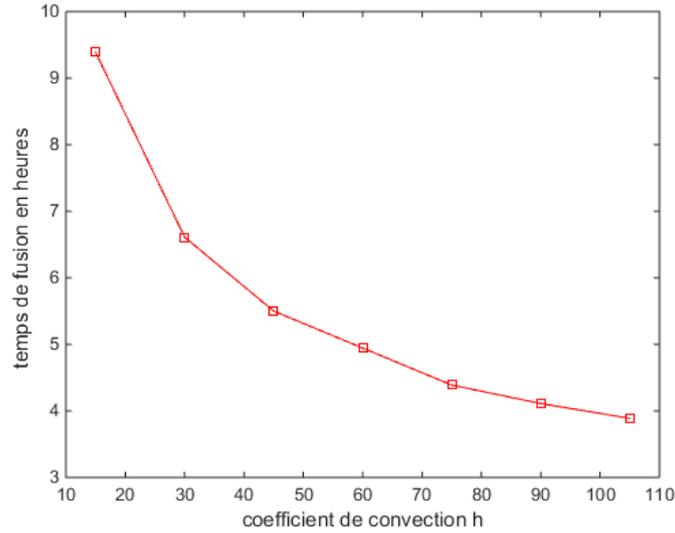


Figure 10: évolution du temps de fusion en fonction de coefficient de convection naturelle en  $x=0$ ,  $e=1\text{cm}$ ,  $T_0=25^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=35^\circ\text{C}$ .

D'après l'étude précédente, on constate que le MCP met beaucoup de temps dans l'opération de fusion même à faible épaisseur. Cette lenteur est due à la faible conductivité thermique du MCP qui limite le taux d'échange thermique et ralentit la vitesse du front de fusion/solidification. Il existe diverses méthodes qui permettent d'améliorer la vitesse de transfert de chaleur pendant le processus du changement de phase solide-liquide. Ces méthodes incluent la dispersion des nanosolides à conductivité thermique élevée dans les MCP [9], l'intégration d'une matrice métallique dans les MCP et l'utilisation des MCP multiples [10,11]. L'étude de la dispersion des nanosolides à haute conductivité dans le MCP est le principal objectif de cette étude.

nanosolide	$k_s$ $W. m^{-1}. K^{-1}$	$\rho_s$ $kg. m^{-3}$	$C_{ps}$ $kJ.kg^{-1}. K^{-1}$
$Al_2O_3$	36	3600	0.765

Tableau 2 : propriétés thermo-physique des nanosolides  $Al_2O_3$  [12,13, 14].

Dans cette communication on présente une étude sur l'effet de l'ajout des nanosolides sur le temps de fusion du MCP. Le nanosolide ajouté est l'oxyde d'aluminium ou alumine ( $Al_2O_3$ ). Les propriétés thermiques du nanofluide obtenu sont totalement différentes des propriétés thermiques du MCP pur.

Les expressions de la masse volumique et de la chaleur spécifique sont données par les relations suivantes [15]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \cdot \rho_f + \phi \cdot \rho_s \quad (11)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) \cdot (\rho C_p)_f + \phi \cdot (\rho C_p)_s \quad (12)$$

La conductivité thermique du nanofluide est calculée en utilisant le modèle de Yu et Choi [16]:

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_s + 2k_l + 2(k_s - k_l)(1 + \beta)^3 \phi}{k_s + 2k_l - (k_s - k_l)(1 + \beta)^3 \phi} \right] k_l \quad (13)$$

Où  $\beta$  est le rapport de l'épaisseur de nano couche du rayon de particule d'origine.  $\beta=0.1$  est utilisé pour calculer la conductivité thermique du nanofluide,  $\phi$  est la concentration volumique des nanoparticules solides ajoutés, les indices « *s* », « *l* » et « *nf* » correspondent aux états solide, liquide et le nanofluide.

L'effet de la concentration des nanoparticules de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) sur la conductivité thermique du nanofluide est présenté sur le tableau 3; on constate que l'addition des nanoparticules dans le MCP augmente considérablement la conductivité thermique, une concentration de 20% en alumine permet une augmentation de la conductivité thermique du nanofluide de 108.6%.

L'évolution de la position du front de fusion est présentée dans les figures 11 et 12. On observe que l'ajout des nanosolides dans le MCP accélère la fusion ce qui entraîne la diminution du temps de fusion. A une concentration de 20%, le temps de fusion passe de 24.25 à 9.25 heures, soit une diminution de 62% par rapport à la paraffine pure.

Concentration en $Al_2O_3$	0%	4%	8%	12%	16%	20%
Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	0.148	0.1729	0.2008	0.2323	0.2680	0.3088
Temps de fusion en heures ( $e=0.04m$ )	24.25	20.08	16.58	13.61	11.39	9.25

Tableau 3 : Conductivité thermique du nanofluide et temps de fusion.

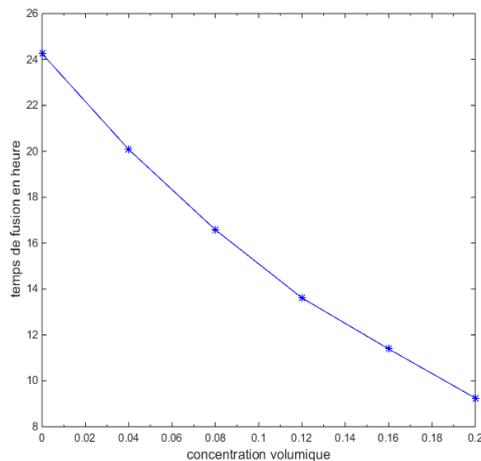


Figure 11 : variation du temps de fusion en fonction de la concentration du nanosolides.

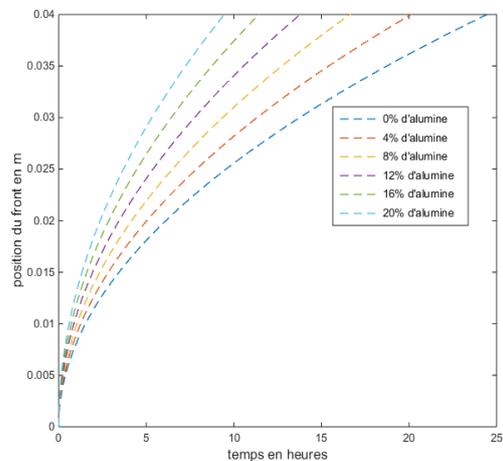


Figure 12 : évaluation du front de fusion du nanofluide en fonction du temps pour différentes concentrations du nanosolides ( $Al_2O_3$ ),  $e=0.04m$ ,

## Conclusion :

Dans Ce travail nous avons présenté une étude numérique du stockage de l'énergie par la chaleur latente dans un MCP dont les propriétés thermo-physiques sont modifiées par l'ajout des nanosolides  $Al_2O_3$ . Les effets de la dispersion des nanoparticules à différentes concentrations sur le temps de fusion sont discutés ; les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- ✓ Le modèle de la capacité thermique simule d'une façon acceptable le phénomène de changement de phase. La position du front de fusion est légèrement sous-estimée par ce modèle.
- ✓ Le temps de fusion de la paraffine est long même à épaisseur faible ce qui impose la recherche d'une solution pour accélérer le déplacement du front de fusion.
- ✓ L'ajout de nanoparticules au MCP augmente de manière significative la conductivité thermique du MCP et par conséquent diminue le temps de fusion.

## Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Symboles grecs
k	conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	$\alpha$ Diffusivité thermique ( $m^2.s^{-1}$ )
T	température ( K )	$\rho$ Masse volumique, ( $kg.m^{-3}$ )
Cp	chaleur spécifique ( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ )	$\varnothing$ concentration du nanosolide
Lat	chaleur latente, ( $kJ.kg^{-1}$ )	Exposant, indices
h	coefficient d'échange par convection, ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\infty$ relatif à l'ambiance autour du MCP
$\Delta T$	écart de température ( K )	w relatif à la limite en $x=0$
St	nombre de Stefan	f fusion
$T_w$	température imposé en $x=0$ ( K )	l liquide
e	épaisseur (m)	s solide
$T_{sd}$	température du début de la fusion (°C)	nf nanofluide
$T_{liq}$	température de la fin de la fusion ( °C )	.
$T_o$	température initiale ( °C )	

## Références

- [1] S.Canbazoğlu, A.Şahinaslan, A.Ekmekyapar, Ý.G.Aksoy, F.Akarsu, Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of conventional solar water heating system, *Energy and Buildings international journal*, Volume 37, March 2005
- [2] S.Z.Shuja, B.S.Yilbas, M.M,Shaukat, melting enhancement of a phase change material with presence of metallic mesh, *Appl. Therm. Eng.* volume 79, pages 163-173,2015.
- [3] M. Jourabian, M. Farhadi, A .A. Rabienataj Darzi, outward melting of ice enhanced by Cu nanoparticles inside cylindrical horizontal annulus: lattice boltzman approach, *Appl. math. model*, volume 37, pages 8813-8825,2013.

- [4] S.Sebti, M.Mastiani , H Mirzaei, A. Dadvandi, S .Kashani, S. Hosseini, Numerical study of the melting of nano-enhanced phase change material in a square cavity, *J. Zhejiang Univ. Sci*, volume A14,pages 307-316, 2013.
- [5] R. Elbahjaoui, H. El Qarnia, M. El Ganaoui, Melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside an enclosure heated by laminar heat transfer fluid flow, *Eur. Physical. J. Appl. Physics*,volume74,pages 24616, 2016.
- [6] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, pages 1675-1695, 2011.
- [7] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H .Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, volume 23:pages 251–83, 2003
- [8] M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume11, pages 1913–65.2007.
- [9] T. Li. Y.V .Rogovchenko, Asymptotic behavior of higher-order quasi linear neutral differential equation, *Abstract and Applied Analysis*, volume 11, 2014.
- [10] H Ait Addine, H El Qarnia, Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, *Applied Mathematical Modeling*, volume 33, pages 2132-2144, 2009.
- [11] Y. Tian, C.Y. Zhao, thermal and exergetic analysis of metal foam-enhanced cascaded thermal energy storage (MF-CTES), *Int. Journal of Heat and mass transfer* , volume 58, pages 86-96, 2013.
- [12] J .Krishna, P. S. Kishore, A .Brusly Solomon, Heat pipe with nano enhanced-PCM for electronic cooling application, *Experimental thermal and fluid science*, volume 31, pages 84-92, 2017.
- [13] R .ElBahjaoui, H. El Qarnia, transient behavior analysis of the melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside a rectangular latent heat storage unit. *Applied thermal Engineering*, volume 112, pages 720-738, 2017.
- [14] F. Hakan, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, volume 29,pages 1326–1336, 2008.
- [15] R. Nasrin, M.A. Alim, A.J .Chamkha,Buoyancy-driven heat transfer of water- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nanofluid in a closed chamber:effects of solid volume fraction, Prandtl number and aspect ratio, *International journal of heat and mass transfer*, volume 55, pages 7355-7365,2012
- [16] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model, *Journal of Nanoparticle Research*, volume 5, pages 167–171, 2003.