



**HAL**  
open science

# **Etude numérique de stockage d'énergie thermique dans un composite : mousses métalliques/matériaux à changement de phase**

Mohamed Moussa El Idi, Mustapha Karkri

## **► To cite this version:**

Mohamed Moussa El Idi, Mustapha Karkri. Etude numérique de stockage d'énergie thermique dans un composite : mousses métalliques/matériaux à changement de phase. Congrès Français de Thermique SFT 2019, Jun 2019, Nantes, France. <hal-02399163>

**HAL Id: hal-02399163**

**<https://hal.science/hal-02399163v1>**

Submitted on 8 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

# Etude numérique de stockage d'énergie thermique dans un composite : mousses métalliques/matériaux à changement de phase.

M. Moussa EL IDI, Mustapha KARKRI

Université Paris-Est, CERTES, 61 Avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France.

\*auteur correspondant : mustapha.karkri@u-pec.fr

**Résumé** - Les matériaux à changement de phase (MCP) ont suscité un grand intérêt grâce à leur capacité de stocker de l'énergie thermique dans des volumes réduits. Or, ces matériaux souffrent de leur faible conductivité thermique qui diminue leur performance. Les mousses métalliques à grande porosité apparaissent comme une solution attractive qui peut améliorer la conductivité thermique effective sans réduire la densité de stockage. Dans ce travail, l'étude du comportement thermique des mousses métalliques imprégnées de MCP a été entreprise. Un modèle mathématique basé sur les extensions de Forchheimer, de Brinkmann, de l'équation de Darcy et le modèle (TLNE) a été proposé. Le changement de phase est modélisé par la méthode enthalpie-porosité. La convection naturelle, l'effet inertiel et le transfert thermique entre les ligaments des mousses et le MCP sont prises en compte. Le modèle numérique a été validé par comparaison à des résultats expérimentaux et numériques de la littérature. A l'issue de cette étude, nous avons mis en évidence l'effet dominant de la conduction thermique, de la porosité et de la densité de pores sur le comportement thermique des composites mousse-MCP.

## Nomenclature

$C_p$	chaleur spécifique $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$Nu$	nombre de Nusselt
$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$	$\tau$	temps adimensionnel
$\mu$	viscosité dynamique, $Pa.s^{-1}$	$h$	coefficient d'échange convectif
$k$	conductivité thermique $W.m^{-1}.K^{-1}$	$T$	température, K
$L_f$	chaleur latente, $J.kg^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$C$	coefficient d'inertie	$\varepsilon$	porosité
$K$	perméabilité, $m^2$	<i>Indices et exposants</i>	
$Pr$	nombre de Prandtl	$P$	matériau à changement de phase
$Re$	nombre de Reynolds	$F$	mousse métallique
$Ra$	nombre de Rayleigh	$l$	liquide
$Fo$	nombre de Fourier	$s$	solide
$Ste$	nombre de Stefan	$eff$	effective

## 1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont connus par leur faible conductivité thermique qui réduit leur cinétique de stockage/déstockage de l'énergie thermique [1]. La conductivité thermique des MCP peut être améliorée par l'ajout d'un matériau conducteur de chaleur, tels que les ailettes métalliques [2], le graphite expansé [3] et les mousses métalliques [4-6]. Les mousses métalliques possèdent des caractéristiques spécifiques telles qu'une porosité élevée (porosité entre 0.8 et 0.98), grande conductivité thermique et une large surface de contact par unité de volume. Ce qui les qualifie à être une bonne solution pour améliorer la conductivité thermique effective des composites mousse-MCP et pour intensifier le transfert thermique lors de la fusion et de la solidification du MCP.

Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche numériques et expérimentaux se sont intéressés à l'étude du comportement thermique des composites mousse métallique-MCP. Y. Zhao [4] a montré que l'utilisation d'une mousse métallique permet d'intensifier de 3 à 10 fois le transfert de chaleur. Zhenqian Chen et al. [5] ont étudié le comportement et la fusion du MCP incorporé dans une mousse métallique. Il a été démontré que le transfert de chaleur était principalement dominé par la conduction. Bofeng Zhang et al [6] a trouvé que l'utilisation d'une mousse de cuivre permet d'améliorer la conductivité thermique effective du composite d'environ 376%. Les études publiées dans la littérature montrent bien que l'utilisation des mousses métalliques est une solution prometteuse mais, les mécanismes du transfert de chaleur et l'effet de la structure de la mousse sur le temps de fusion et de la solidification du MCP n'ont pas été suffisamment étudié. Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour mieux comprendre le mécanisme du transfert de chaleur au sein de ces composites.

Dans ce travail, nous nous intéressons d'une part à l'étude numérique du comportement thermique de ces composites lors de la fusion et de la solidification et d'autre part à l'effet de la morphologie des mousses sur le stockage/ restitution de l'énergie thermique.

## 2. Modélisation

### 2.1. Modèle physique

Le modèle physique est représenté par la figure 1. Il s'agit d'un composite, mousse métallique/paraffine RT27, de dimensions  $L \times H$ . Le composite est initialement à une température uniforme 299.15K (26°C). La paroi ouest est maintenue isotherme à une température  $T_w$  et les autres parois sont considérées comme adiabatiques.

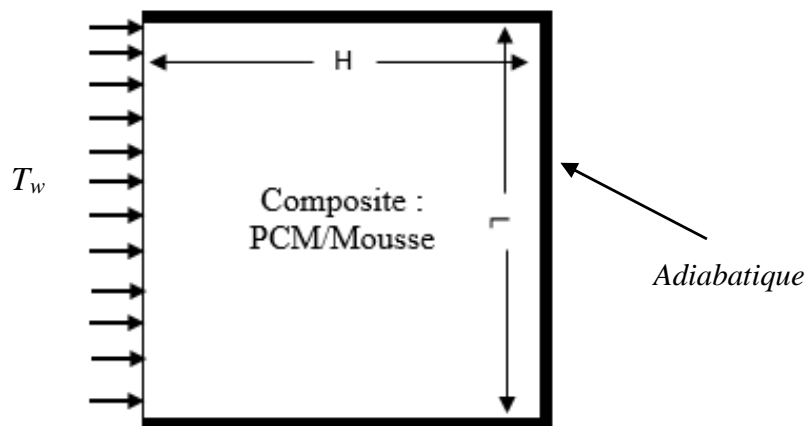


Figure 1 : *Modèle physique : composite mousse-MCP*

### 2.2. Modèle mathématique

Nous utilisons dans ce projet le théorème de volumes moyens qui a été introduit initialement par Whitaker [7]. Les extensions de Forchheimer et Brinkmann de la loi de Darcy pour modéliser l'écoulement du MCP liquide dans les mousses ont été utilisées. Le changement de phase est modélisé par la méthode « enthalpie-porosité » connue aussi sous le nom de méthode enthalpique de Voller [8]. Afin de simplifier le calcul, le problème est considéré bidimensionnel, le MCP en phase liquide est considéré comme un fluide newtonien incompressible avec l'approximation de Boussinesq et en régime laminaire. Les propriétés thermophysiques du MCP sont considérées comme constantes dans les deux phases

solide/liquide. Le tableau 1, représente les propriétés thermophysiques de la paraffine RT27 [9].

	$L_f$	$\rho_s$	$C_{p-s}$	$\mu$	$k_s$	$k_l$	$C_{p-l}$	$\rho_l$
RT27	$\text{kJ.kg}^{-1}$	$\text{kg.m}^{-3}$	$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	$\text{Pa.s}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{Kg.m}^{-3}$
	179	870	1800	0.0034	0.24	0.15	2400	760

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques de RT27.

### 2.2.1. Equation de continuité

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

### 2.2.2. Equations de conservation de quantité de mouvement

$$\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho_p}{\varepsilon^2} (\vec{V}\vec{\nabla}).u = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 u - \left( \frac{\mu}{K} + \frac{\rho_p C}{\sqrt{k}} |u| \right) u + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho_p}{\varepsilon^2} (\vec{V}\vec{\nabla}).v = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 v - \left( \frac{\mu}{K} + \frac{\rho_p C}{\sqrt{k}} |v| \right) v + S_v + \rho_p g \beta (T - T_{ref}) \quad (3)$$

Ou  $S_u = A \frac{(1-b(T))^2}{B^3 + b(T)} u$  et  $S_v = A \frac{(1-b(T))^2}{B^3 + b(T)} v$  sont des termes sources déduites de la loi de

Karmen-Cozney.  $A$  est une constante exprimée en  $\text{kg/m}^3\text{s}$ . Elle doit être suffisamment élevée pour que le champ de vitesse soit nulle lorsque le MCP est entièrement en phase solide.  $B$  est une constante utilisée pour éviter la division par zéro lorsque le MCP est totalement solide.  $S_u$  et  $S_v$  tendent vers l'infinie lorsque le MCP est entièrement solide et vers zéro lorsque le MCP est entièrement liquide.  $b$  est définie comme la fraction liquide au sein de la zone de transition :

$$b(T) = \begin{cases} 0 & T < (T_m - \Delta T / 2) \\ (T - (T_m - \Delta T / 2)) / \Delta T & (T_m - \Delta T) \leq T < (T_m + \Delta T) \\ 1 & T > (T_m + \Delta T / 2) \end{cases} \quad (4)$$

La viscosité a été modifiée en utilisant le terme :  $S(T) = A \frac{(1-b(T))^2}{B^3 + b(T)}$  faisant en sorte

qu'elle a une très grande valeur lorsque le MCP est en état solide et la valeur appropriée lorsque ce dernier est en état liquide :

$$\mu_p(T) = \mu_{pl}(1 + S(T)) \quad (5)$$

### 2.2.3. Equations de conservation d'énergie

Dans le MCP :

$$\varepsilon \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau} + \rho_p C_p (u \frac{\partial T_p}{\partial x} + v \frac{\partial T_p}{\partial y}) = k_{peff} \nabla^2 T_p + h_{PF} a_{PF} (T_F - T_p) \quad (6)$$

Pour tenir compte de la chaleur latente lors de la transition solide-liquide, on introduit la fonction gaussienne suivante :

$$D(T) = e^{\left( \frac{-(T-T_m)^2}{(\Delta T/4)^2} / \sqrt{\pi(\Delta T/4)^2} \right)} \quad (7)$$

Cette fonction vaut zéro partout sauf dans la zone de la transition. Son intégrale vaut 1, ce qui assure la conservation de l'énergie latente lors de la transition. La fonction  $b(T)$  et  $D(T)$  permet de définir la chaleur spécifique modifiée et la conductivité thermique du MCP:

$$C_{P-P} = C_{P-PS} + (C_{P-PI} - C_{P-PS}).b(T) + L_f D(T), \quad k_p(T) = k_{PS} + (k_{PI} - k_{PS}).b(T) \quad (8)$$

Dans la mousse métallique :

$$(1 - \varepsilon)\rho_F c_{P-F} \frac{\partial T_F}{\partial \tau} = k_{F\text{eff}} \nabla^2 T_F - h_{PF} a_{PF} (T_F - T_P) \quad (9)$$

Les conductivités thermiques effectives de MCP et de la mousse métallique sont calculées à partir des formules développées par Boomsma K et al [10]. Le coefficient d'échange convectif est déduit à partir des relations de Zukauskas [11]:

$$N_u = \begin{cases} 0.76 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.37} \frac{k_p}{d} & 0 < \text{Re} \leq 40 \\ 0.52 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.37} \frac{k_p}{d} & 40 < \text{Re} \leq 1000 \\ 0.26 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{0.37} \frac{k_p}{d} & 1000 < \text{Re} \leq 20000 \end{cases} \quad (10)$$

### 3. Propriétés thermophysiques et structurales de la mousse

Les propriétés thermophysiques des mousses métalliques utilisées dans notre étude sont présentées dans le tableau 2. De nombreuses recherches ont été menées dans le but est de développer des modèles analytiques permettant de calculer la perméabilité et le coefficient d'inertie des mousses. Dans ce travail, nous utilisons le modèle de Calmidi et al. [12] pour calculer la perméabilité et le coefficient d'inertie.

$$K = 0.00073 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.0024} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.11}, \quad C = 0.00212 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.132} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (12)$$

Où  $d_f$  désigne le diamètre équivalent des ligaments de mousse métallique et  $d_p$  le diamètre équivalent des pores (modèle de Calmidi et al. [12], Eq (13)). La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante [12].

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{\pi}} \left( \frac{1}{1 - e^{-(1 - \varepsilon)/0.04}} \right), \quad a_{PS} = \frac{3\pi d_f (1 - e^{-(1 - \varepsilon)/0.04})}{(0.59 d_p)^2} \quad (13)$$

	$k$ W/(m.K)	$P$ kg.m <sup>-3</sup>	$C_p$ J/(K.kg)
Cuivre	401	8960	385
Aluminium	220	2700	900
Nickel	70	8890	456

Tableau 2 : Propriétés thermophysiques des mousses métalliques

## 4. Résultats et discussions

### 4.1. Validation du modèle numérique

Les équations présentées au-dessus ont été résolues en utilisant COMSOL ver. 5.2a. Une étude comparative avec les résultats expérimentaux et numériques de C. Y. Zhao et al. [4], et de Tian et Y. Zhao's [13,14] a été effectuée. Dans ces travaux on s'est intéressé à la fusion de la paraffine RT58 dans une mousse de cuivre de dimensions (200 mm, 120 mm, 25 mm), de densité de pores 10 PPI et de porosité 0.95. Le modèle étudié est représenté par la figure 2. La figure 3 illustre l'évolution de la température moyenne  $T(x, y = 8 \text{ mm})$  obtenu par Y. Zhao et al. [13], Tian et Y. Zhao's et notre modèle mathématique. Les trois modèles numériques, comme les mesures expérimentales, présentent un palier qui caractérise la fusion de RT58. L'écart de la température maximale entre notre modèle et les mesures expérimentales est de l'ordre de  $2^\circ\text{C}$ . De plus durant la fusion de la paraffine, entre  $t = 1200\text{s}$  et environ  $t = 4100\text{s}$ , on constate un bon accord entre les résultats de notre modèle et les résultats expérimentaux de Y. Zhao. Après la fusion, notre modèle numérique et celui de Y. Zhao et al. [13] surestiment, respectivement, la température  $T(x, y = 8 \text{ mm})$ , avec un écart de la température maximale entre notre modèle et les résultats expérimentaux de l'ordre de  $5^\circ\text{C}$ . Cet écart peut s'expliquer par une surestimation du coefficient de perte convective mais aussi par les modèles semi-empiriques utilisés pour estimer la perméabilité, le coefficient d'inertie et les autres propriétés. Dans l'ensemble, on constate un bon agrément entre les valeurs mesurées et celles issues des calculs numériques. Cela valide l'approche théorique proposée pour étudier le comportement thermique des composites mousse-MCP.

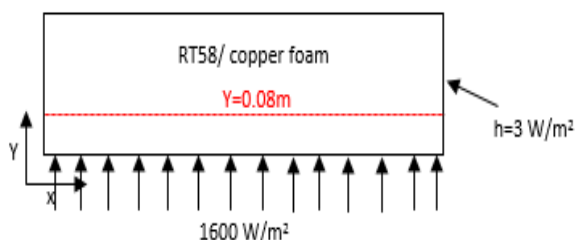


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental de Y. Zhao et al. [4]

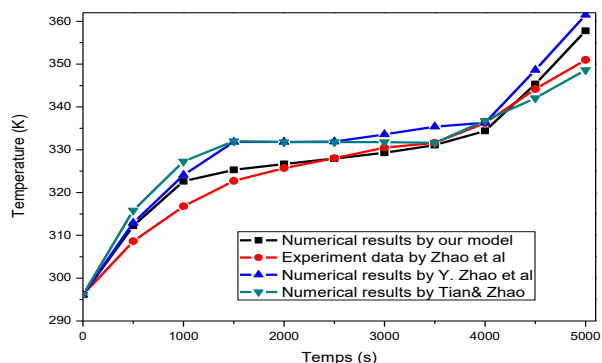


Figure 3 : Evolution de la température moyenne  $T(x, y=8\text{mm})$ .

### 4.2. Effet de la morphologie

Après avoir validé le modèle, on s'est intéressé à l'effet de la morphologie des mousses sur la fusion et la solidification de MCP. Dans l'objectif de faciliter l'interprétation de nos résultats nous avons introduits les nombres adimensionnels suivants :

$$Ste = \frac{C_{PP} |T_w - T_b|}{L_f}, \quad Fo = \frac{\alpha_p t}{H^2}, \quad Ra = \frac{g \beta |T_w - T_b| H^3}{\alpha_p \nu}, \quad \tau = Ste Fo \quad (14)$$

#### 4.2.1. Effet de la porosité

Afin d'étudier l'effet de la porosité, la mousse d'aluminium imprégné de RT27 avec une densité de pores de 40 PPI (Pores Per Inch) a été étudiée. Les figures 4 et 5, présentent l'évolution de la fraction liquide du MCP pour différentes porosités (0.80, 0.84, 0.87 et 0.93) et en fonction du temps  $SteFo$ . On constate que lorsque la porosité diminue, le MCP fond plus

rapidement (figure 4) et la cinétique de stockage diminue avec l'augmentation de la densité des pores. Il s'avère que pour la porosité 0.80 le temps de fusion est plus court que celui de la fusion pour le composite avec une porosité de 0.93. Ceci démontre qu'une faible porosité favorise le transfert de chaleur et augmente la cinétique de stockage/déstockage d'énergie thermique.

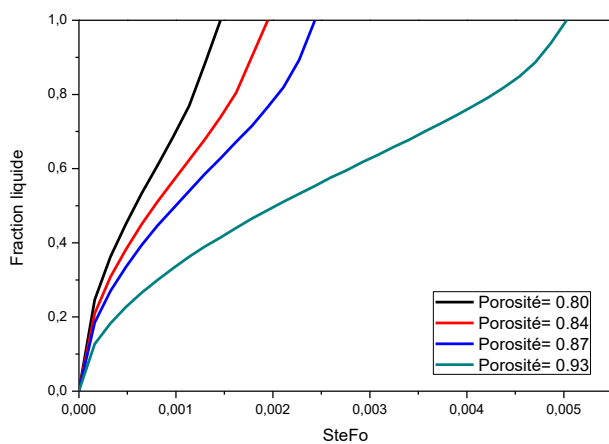


Figure 4 : Effet de la porosité sur la fusion

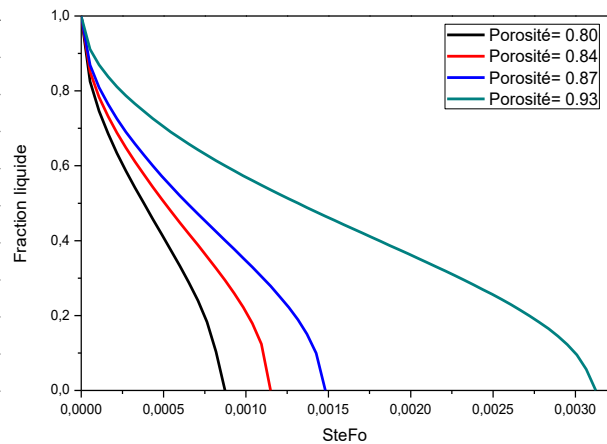


Figure 5 : Effet de la porosité sur la solidification

#### 4.2.2. Effet de la densité des pores

Pour cette étude, nous avons étudié une mousse avec une porosité de 0.93. Quatre densités de pores ont été choisies : 5 PPI (Pores per inch), 10 PPI, 20 PPI et 40 PPI. La figure 6 présente l'évolution temporelle de la fraction liquide du MCP en fonction de la densité de pores. On constate que la fusion du MCP augmente avec la densité des pores. En effet une grande densité des pores signifie une surface de contact élevée, ce qui conduit à un meilleur échange d'énergie entre le MCP et la mousse. Nous constatons le même comportement lors de la solidification, figure 7.

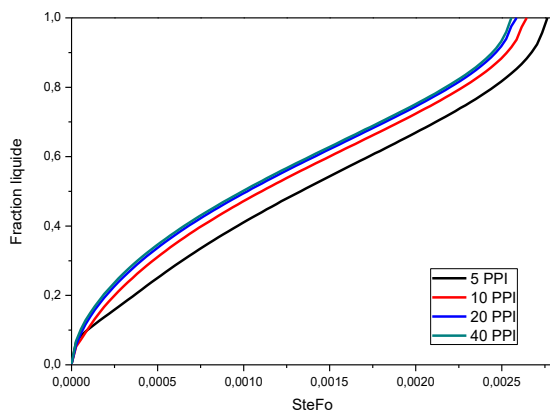


Figure 6 : Effet de la densité de pores sur le temps de fusion

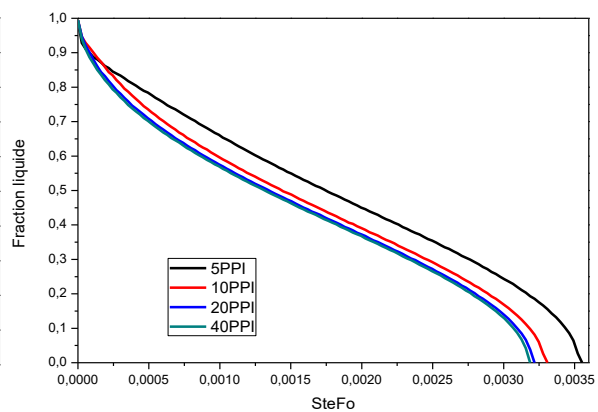


Figure 7 : Effet de la densité de pores sur le temps de solidification

#### 4.3. Effet du type de mousse

En vue d'étudier l'effet de la conductivité thermique des mousses métalliques sur la cinétique de fusion du MCP, nous avons considéré trois types de mousses de même porosité (0.93) et densité de pores (40 PPI), Figure 8. Le travail entrepris consiste à étudier l'évolution de la fraction liquide en fonction du temps. D'après les résultats obtenus, la conductivité thermique des mousses influence fortement le mécanisme du transfert de chaleur durant la fusion et la solidification de MCP. On constate que la cinétique de fusion est plus rapide pour

le composite cuivre/MCP que pour le composite Nickel/MCP. On voit bien qu'après environ 1890 secondes, la totalité de MCP contenu dans la mousse de cuivre est fondue, contre seulement 60% dans la mousse aluminium et de 37% dans la mousse de nickel. D'après ses résultats, on peut conclure que la cinétique de stockage/déstockage est fortement dépendante de la conductivité thermique de la matrice.

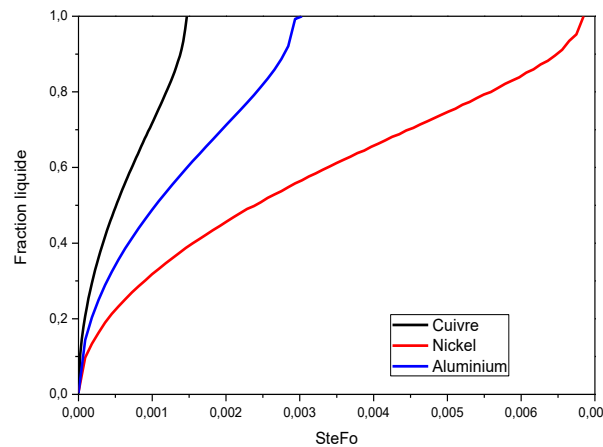


Figure 8 : Effet de la conductivité thermique des mousses sur la fusion du MCP

## 5. Conclusion et perspectives

Le problème du stockage et déstockage d'énergie thermique dans un composite mousse métallique/MCP a été abordé. Un modèle numérique a été présenté et validé par comparaison à des résultats expérimentaux et numériques issues de la littérature. La convection naturelle reste relativement faible lors de la fusion et la solidification. Les résultats ont démontré que la fusion et la solidification du MCP sont très sensibles à la conductivité thermique des mousses. La fusion et la solidification sont plus rapides pour une densité des pores plus élevée. Dans le cadre de ce projet, un dispositif expérimental est en cours de développement afin de valider les résultats numériques du modèle développé.

### Références

- [1] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change material and applications, *Renew. Sust. Energy Rev.* 13 (2) (2009) 318–345.
- [2] Pascal Henry Biwolé, Dominic Groulx, Farah Souayfane, Tim Chiud, Influence of fin size and distribution on solid-liquid phase change in a rectangular enclosure, *International Journal of Thermal Sciences* 124 (2018) 433–446
- [3] Gossard Didier, Karkri Mustapha, AlMaadeed Mariam A., Krupa Igor, A new experimental device and inverse method to characterize thermal properties of composite phase change materials, *Composite Structures* 133(2015) 1149-1159
- [4] C.Y. Zhao, W. Lu, Y. Tian, Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs), *Solar Energy* 84 (2010) 1402–1412
- [5] Zhenqian Chen, Dongyan Gao, Juan Shi, Experimental and numerical study on melting of phase change materials in metal foams at pore scale, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 72 (2014) 646–655.
- [6] Bofeng Shang, Jinyan Hu, Run Hu, Jingjing Cheng, Xiaobing Luo, Modularized thermal storage unit of metal foam/paraffin composite, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 125 (2018) 596–603.
- [7] S. Whitaker, *The Method of Volume Averaging*, vol. 13. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999

- [8] Gau, C. and Viskanta, R., "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall," *Journal of Heat Transfer - Transactions of the ASME*, 1986(108) 174-181
- [9] Moussa Aadm, Mustapha Karkri, Mimoun El Hammouti, Heat transfer characteristics of thermal energy storage of a composite phase change materials: Numerical and experimental investigations, *Energy* 72 (2014) 381-392.
- [10] Boomsma K, Poulikakos D. On the effective thermal conductivity of a three dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *Int J Heat Mass Tran* 2001; 44:827–36
- [11] Zukauskas AA. Convective heat transfer in cross-flow. In: Kakac S, Shah RK, Aung W, editors. *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. New York: Wiley; 1987
- [12] V. Calmidi, Transportation phenomena in high porosity fibrous metal foams, 1998, PhD thesis, University of Colorado.
- [13] Y. Zhao, C.Y. Zhao, Z.G. Xu, H.J. Xu, Modeling metal foam enhanced phase change heat transfer in thermal energy storage by using phase field method, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 99 (2016) 170–181
- [14] Y. Tian, C.Y. Zhao, A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals, *Energy* 36 (2011) 5539-5546