

Intensification des transferts thermiques dans un module de stockage thermique : suivi du front de fusion par thermographie et simulation numérique

Régis Olivès*, Xavier Py, Quentin Falcoz, Pierre Neveu, Jean-Marie Mancaux

PROMES-CNRS - UPVD

Tecnosud, 66100 Perpignan

*(auteur correspondant : olives@univ-perp.fr)

Résumé - Le stockage thermique par chaleur latente présente de grands intérêts dans la problématique de gestion de l'énergie issue en particulier de ressources renouvelables. L'efficacité de ces systèmes de stockage repose sur la densité énergétique et aussi sur la puissance de charge ou de décharge qui doivent être les plus élevées possibles. L'obtention de fortes puissances requiert donc l'intensification des transferts de chaleur au sein du matériau à changement de phase. L'objectif de cette étude est d'améliorer l'efficacité d'un module de stockage en comparant plusieurs méthodes d'intensification des transferts. La simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel COMSOL est basée sur la méthode de champ de phase qui consiste à coupler l'équation de la chaleur avec une équation régissant l'évolution du paramètre de phase. Ce paramètre caractérise l'état solide ou liquide du matériau à changement de phase. Les résultats obtenus conduisent à la validation de la simulation. L'analyse énergétique et entropique met en évidence le gain potentiel en terme d'efficacité selon la méthode d'intensification employée.

Nomenclature

C_p	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ϕ	paramètre de phase, -
e	épaisseur, m	γ	tension interfaciale, $J.m^{-2}$
Ex	exergie, J	η	efficacité, -
f	fraction volumique,	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	σ_s	production d'entropie par unité de volume, $W.K^{-1}.m^{-3}$
L	chaleur latente, $J.kg^{-1}$	Σ_s	production d'entropie, $W.K^{-1}$
m	masse, kg		
q	quantité de chaleur, J		
s	densité d'entropie, $J.K^{-1}.m^{-3}$		
T	température, K		
<i>Symboles grecs</i>			
α	temps de relaxation, s		
ϵ	épaisseur du front de changement d'état, m		
		<i>Indices et exposants</i>	
		a	ailette
		l	liquide
		m	matériau à changement de phase
		o	initial
		s	solide

1. Introduction

La gestion de l'énergie issue en particulier de ressources renouvelables requiert bien souvent la mise en place de stockage thermique. De part leur forte densité énergétique, les matériaux à changement de phase solide-liquide présentent un grand intérêt. Néanmoins, l'efficacité de ces systèmes de stockage repose non seulement sur la densité énergétique, mais aussi sur la puissance de charge ou de décharge qui doivent être les plus élevées possibles. Or la conductivité des matériaux à changement de phase se situe généralement entre 0,1 et 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$. L'obtention de fortes puissances nécessite donc l'intensification des transferts de chaleur au sein du matériau à changement de phase. Deux méthodes peuvent être mises en œuvre : l'augmentation

de la surface d'échange par l'implantation d'ailettes ou l'accroissement de la conductivité effective par ajout de matériau très conducteur [1]. Nous avons opté dans ce travail pour l'ajout de graphite [2]. L'objectif de cette étude est d'améliorer l'efficacité d'un module de stockage en comparant ces deux méthodes d'intensification des transferts. Pour cela une cellule expérimentale a été mise au point. Elle permet, durant la phase de fusion, de suivre la fraction de phase liquide et donc la quantité de chaleur stockée. La chaleur fournie en un point doit être répartie au mieux dans le volume. L'analyse énergétique et entropique nous renseigne quant à l'efficacité du stockage. La position du front révélée par thermographie est comparée à la simulation numérique. La modélisation est basée sur la méthode de champ de phase. Elle consiste à coupler l'équation de la chaleur avec une équation régissant le paramètre de phase [3, 4, 5]. Le paramètre de phase permet de distinguer le solide, le liquide et l'interface. Les quantités de chaleur stockées et la production d'entropie de différentes configurations sont obtenues à l'aide des simulations et comparées afin d'évaluer les performances respectives.

2. Travail expérimental

La cellule est constituée d'un réservoir rectangulaire de 66 mm × 66 mm de côté et de 10 mm de profondeur. Les parois du réservoir sont réalisées en polystyrène extrudé. Une résistance électrique de 12 Ω alimentée en courant continu constitue la source de chaleur qui est transférée à l'aide d'une ailette en cuivre. On applique un échelon de flux en injectant un échelon de courant dans la résistance électrique. Cette ailette apporte la chaleur de façon quasi ponctuelle (figures 1 et 2). Ainsi, cette cellule illustre le cas du chauffage/stockage avec un apport de chaleur ponctuel. Le matériau utilisé est la paraffine RT27 fournie par la société Rubitherm GmbH dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1. La configuration étudiée ici conduit à s'affranchir en première approche de la dimension verticale et ainsi de ne considérer le phénomène qu'en bidimensionnel (plan horizontal). Le réservoir étant ouvert en partie supérieure, il est possible de suivre le phénomène de changement d'état et en particulier le front de fusion à l'aide soit d'une caméra en lumière visible, soit d'une caméra infrarouge (Fluke Ti95). Par cette dernière, on accède en plus au champ de température après ajustement de l'émissivité.

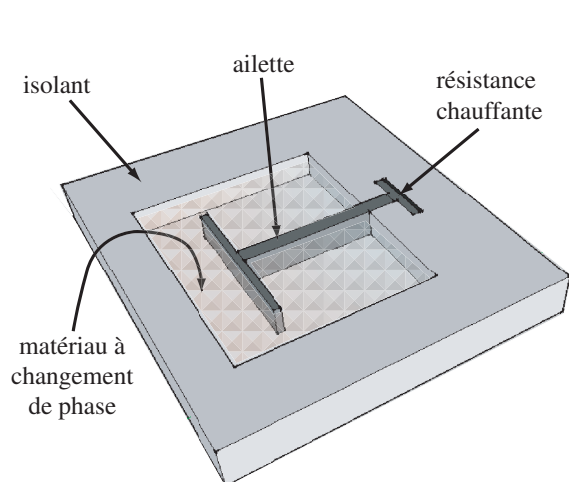


Figure 1 : Schéma du montage expérimental

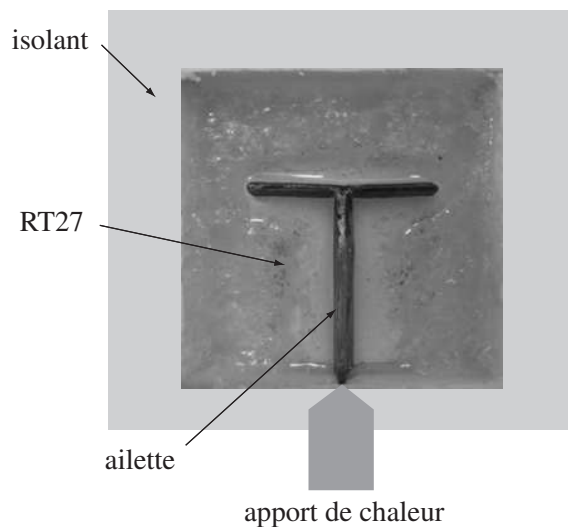


Figure 2 : Photo de la cellule contenant le matériau

La paraffine est associée soit à une ailette en cuivre en forme de T ou de Y soit à du graphite naturel expansé. Le graphite naturel expansé est comprimé de telle sorte à obtenir une

état	ρ kg.m ⁻³	C_p J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	k W.m ⁻¹ .K ⁻¹
solide	870	2400	0,24
liquide	760	1800	0,15
autres	T_m °C	L_m kJ.kg ⁻¹	
	27	179	

Tableau 1 : Propriétés du matériau à changement de phase RT27

matrice consolidée extrêmement poreuse qui peut alors être imprégnée par la paraffine à l'état liquide (figure 3). Plusieurs fractions volumiques de graphite ont été testées. Elles sont comprises entre 2 et 5% et confèrent aux échantillons des conductivités effectives comprises en 3 et 12 W.m⁻¹.K⁻¹ [2]. L'énergie relative à la chaleur latente contenue dans la cellule est de 4,6 kJ.

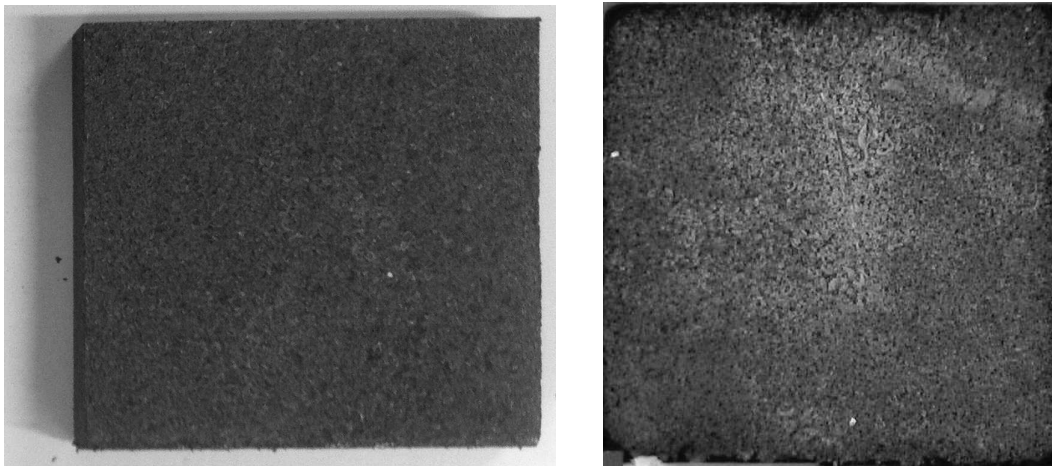


Figure 3 : Photographie de la matrice de graphite avant et après imprégnation de paraffine

3. Modélisation et simulation numérique

La modélisation repose sur la méthode de champ de phase ("*phase field*"), qui a été implémentée dans le logiciel COMSOL permettant la résolution des équations par la méthode des éléments finis. Les méthodes de champ de phase sont devenues des méthodes numériques intéressantes pour résoudre les problèmes impliquant des interfaces mobiles, et en particulier les problèmes de changement de phase solide/liquide [2]. Cette approche utilise une variable ϕ , fonction du temps et de l'espace, qui décrit l'état, liquide ou solide, du matériau. Ce paramètre d'ordre est régi par une équation couplée à l'équation de la chaleur. L'interface liquide/solide est décrit par un changement continu mais très localisé de cette variable entre deux valeurs fixées (dans notre cas, -1 pour le solide et 1 pour le liquide). Cette approche évite des difficultés numériques liées aux conditions d'interface dont la position est une inconnue du problème. La position de l'interface est obtenue à partir de la solution numérique avec la variable ϕ prenant la valeur 0. L'intérêt de cette méthode réside dans sa justification thermodynamique [3] ainsi que dans le temps de résolution plutôt court. Pour exemple, avec un maillage de près de 6000 éléments, une simulation d'un cas expérimental durant 3 heures prend moins de 300 secondes.

D'après Han et al. [5], on peut écrire, d'une part l'équation de la chaleur dont le terme source correspond à la chaleur latente dégagée ou absorbée à l'interface solide/liquide :

$$\rho_m \cdot C_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k_m \nabla T - \frac{1}{2} \rho_m L_m \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

et d'autre part, l'équation exprimant l'évolution de la variable ϕ au cours du temps :

$$\alpha \cdot \epsilon^2 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \epsilon^2 \nabla^2 \phi - \frac{1}{2} (\phi^3 - \phi) + \frac{\epsilon \cdot s}{2 \cdot \gamma} (T - T_m) (1 - \phi^2) \quad (2)$$

avec s la différence de densité d'entropie entre les deux phases. Cette dernière équation peut être réécrite de la façon suivante :

$$\alpha \cdot \epsilon^2 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \epsilon^2 \nabla^2 \phi - \frac{1}{2} (\phi^3 - \phi) + \frac{\epsilon \cdot \rho_m L_m}{2 T_m \cdot \gamma} (T - T_m) (1 - \phi^2) \quad (3)$$

avec $\phi = 1$ pour le liquide et $\phi = -1$ pour le solide, ϵ l'épaisseur du front de changement de phase, α le temps de relaxation et γ la tension interfaciale. La simulation numérique a été validée en la comparant à la solution analytique du problème de Stefan (changement de phase dans un mur plan semi-infini). Notons que dans le cas présent, les variations des propriétés thermophysiques en fonction de la température ainsi que les propriétés du graphite ont été prises en compte dans le modèle. Ainsi, par exemple, la capacité calorifique suit la loi suivante :

$$C_{p,m}(T) = \frac{(C_{p,s} + C_{p,l})}{2} - \frac{(C_{p,s} - C_{p,l})}{2} \cdot \tanh(T - T_m) \quad (4)$$

en considérant que dans le domaine de température étudié, la capacité calorifique ne varie qu'au passage d'un état à l'autre. La conductivité et la masse volumique de la paraffine suit le même type de loi. Concernant la conductivité thermique du composite paraffine/graphite, il s'agit d'une conductivité effective qui a été déterminée par un banc de mesure en régime permanent (technique de la barre divisée).

L'ensemble du montage est modélisé. Ainsi, en terme de conditions initiales, tout l'ensemble est à température ambiante T_o et concernant les conditions limites, un échelon de flux est imposé au niveau de la résistance électrique et des conditions de type de Neumann (échange convectif) sont imposées autour de l'isolant. Cette dernière est très peu influente sur toute la phase du stockage.

4. Efficacité du stockage

Il existe différentes méthodes d'analyse de l'efficacité d'un stockage thermique. Nous avons opté ici de compléter l'analyse énergétique par une analyse entropique. L'efficacité énergétique peut être définie comme le rapport entre l'énergie réellement stockée q sur l'énergie maximale qui peut être stockée $q_{max} = m \cdot L_m$. En ne considérant que la partie latente du stockage, cette efficacité s'exprime donc par la relation suivante :

$$\eta = \frac{q}{q_{max}} \quad (5)$$

Ce rapport peut aussi être décrit directement par la fraction de liquide dans le cas du stockage de chaleur par fusion du matériau :

$$\eta = f_l \quad (6)$$

L'efficacité globale est obtenue en intégrant sur la période de stockage :

$$\eta_g = \frac{1}{q_{max} \cdot \Delta t} \int_0^t q dt = \frac{1}{\Delta t} \int_0^t f_t dt \quad (7)$$

où $\Delta t = t - 0$ la durée considérée.

L'analyse entropique permet de quantifier les dissipations et ainsi évaluer les performances thermodynamiques du stockage [6]. On considère que l'entropie n'est produite que par le transfert conductif. On néglige donc les irréversibilités liées au déplacement de l'interface solide/liquide et à l'énergie interfaciale. La production d'entropie par unité de volume σ_s peut alors être estimée à partir de la relation suivante :

$$\sigma_s = \dot{q} \nabla \frac{1}{T} \quad (8)$$

soit :

$$\sigma_s = \frac{-\dot{q} \nabla T}{T^2} \quad (9)$$

En supposant k constant et le transfert conductif régi par la loi de Fourier, la production d'entropie dans le volume de stockage est donnée par :

$$\Sigma_s = \int_0^t \int \frac{k}{T^2} (\nabla T) dV dt \quad (10)$$

Introduisons le nombre de production d'entropie N_s :

$$N_s = \frac{T_o \cdot \Sigma_s}{Ex_{in}} \quad (11)$$

avec Ex_{in} l'exergie entrant dans le stockage. Le flux exergetique \dot{Ex}_{in} est donné par :

$$\dot{Ex}_{in} = \dot{q}_{in} \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_m} \right) \quad (12)$$

\dot{q}_{in} est le flux de chaleur entrant dans le volume de stockage.

L'efficacité exergetique est donc :

$$\psi = 1 - N_s \quad (13)$$

Ainsi, à flux de chaleur fixé, l'efficacité du système est optimale quand la production d'entropie est minimale.

5. Résultats et discussion

Plusieurs cas ont été analysés à la fois expérimentalement que numériquement : la distribution de la chaleur dans le volume à l'aide d'une ailette en forme de T ou de Y et l'intensification du transfert conductif grâce à l'ajout d'une matrice de graphite naturel expansé obtenue par compression et imprégnée de paraffine. On ne présente ici que quelques résultats marquants. Dans un premier temps, les images obtenues en lumière visible, par thermographie infrarouge et les simulations ont été comparées (voir figures 4 et 5). On constate un bon accord entre les simulations et l'expérience. Cela nous permet de calculer les champs de température des diverses configurations et ainsi déterminer leurs performances respectives. (figure 6)

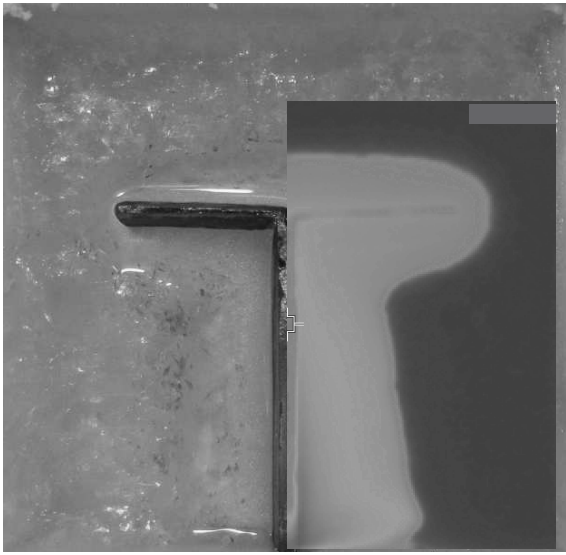


Figure 4 : Comparaison photographie et image en thermographie IR



Figure 5 : Comparaison image en thermographie IR et simulation numérique

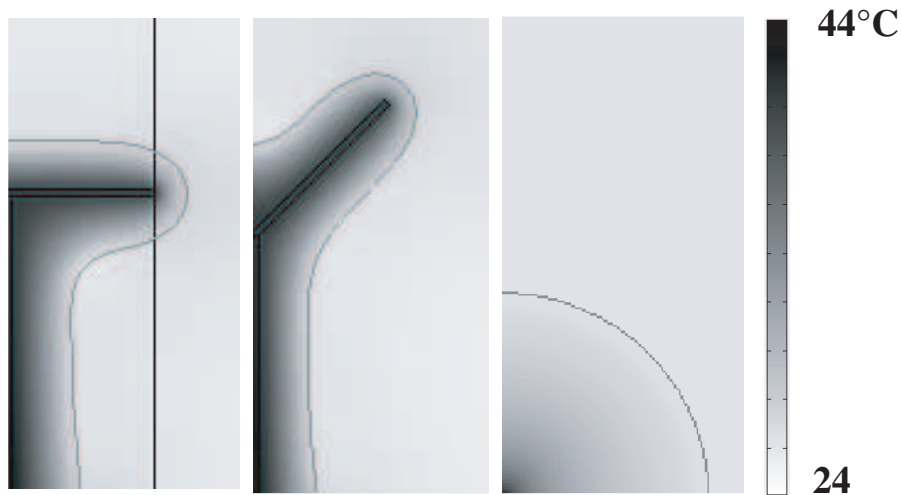


Figure 6 : Champ de température et position du front de changement de phase à $t = 3600$ s dans les trois configurations étudiées associant la paraffine RT27 à l'ailette en T, en Y et au graphite.

À partir des simulations, on peut estimer l'évolution de l'efficacité énergétique au cours du temps à partir de la fraction volumique de liquide (figure 7). Les cas présentés ont été choisis de telle sorte qu'il y ait la même quantité de matériau à changement de phase et ainsi que le volume occupé par le graphite soit identique à celui de l'ailette (en T ou en Y). Ceci procure au composite RT27-graphite une conductivité thermique effective de $3,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (mesurée par la technique de la barre divisée).

On constate que le temps de changement de phase est plus long de 18,6% pour la configuration avec ailette en T et 36% avec ailette en Y par rapport à celle du graphite. Autrement dit, la répartition dans tout le volume du promoteur de transfert est de 18,6% ou 36% plus efficace que l'intensification par ailette, forcément plus localisée.

La production d'entropie est obtenue par intégration numérique des gradients thermiques calculés à chaque instant et tout au long de la phase de stockage de chaleur. Les évolutions de la production d'entropie de chaque configuration sont présentées dans la figure 8.

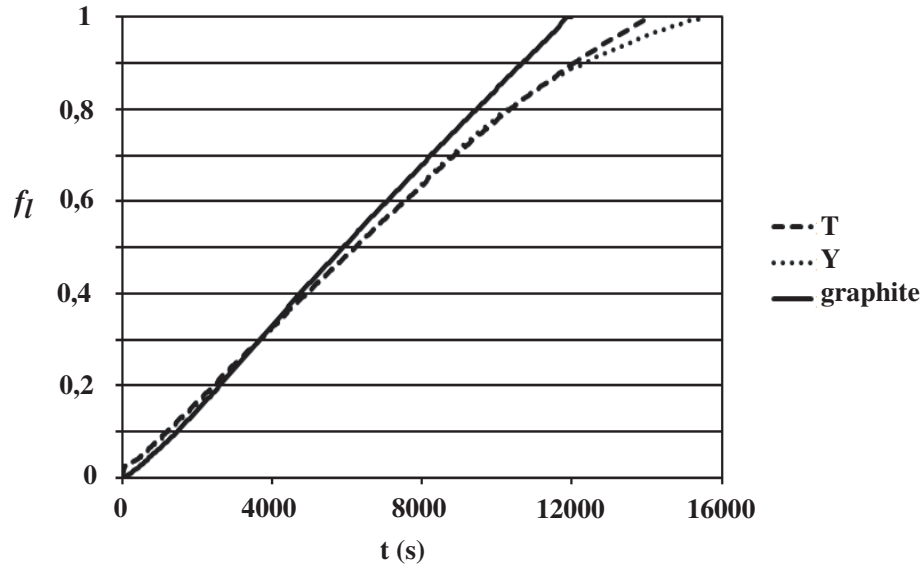


Figure 7 : Évolution de l'efficacité énergétique au cours de la phase de stockage pour différentes configurations

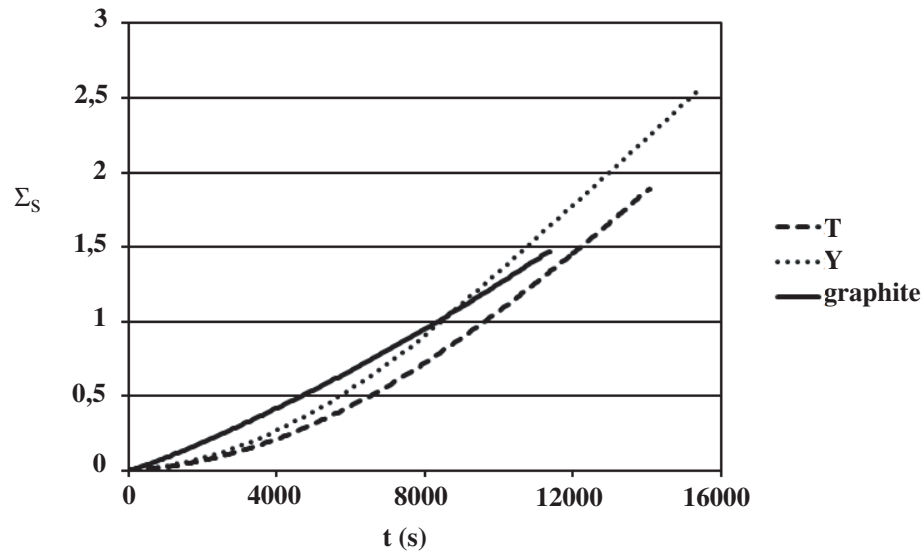


Figure 8 : Évolution de la production d'entropie au cours de la phase de stockage pour différentes configurations

Tout d'abord, on remarque que pour le composite paraffine-graphite la production d'entropie croît au début plus rapidement que pour les autres configurations. Ceci correspond à la phase de

diffusion et absorption de la chaleur dans le volume de façon isotrope. Concernant les configurations à ailette, la production d'entropie évolue plus lentement pour atteindre néanmoins des valeurs supérieures en fin de stockage. Finalement, la production totale d'entropie obtenue par intégration sur la toute la phase de stockage est supérieure pour les configurations à ailette que pour celle à graphite. Pour les ailettes, la génération d'entropie augmente plus fortement en fin de stockage du fait de la distance encore grande entre l'ailette et le front de changement de phase. L'intensification répartie grâce au graphite s'avère engendrer moins d'entropie que l'intensification localisée (ailette). La résistance globale au transfert est donc davantage minimisée avec le graphite.

En prenant en considération la production d'entropie, l'exploitation de la totalité du stockage est favorisée par l'emploi d'une matrice de graphite. Dans le cas où le volume n'est pas complètement exploité, l'utilisation d'ailettes peut suffire.

6. Conclusion

Le stockage thermique par chaleur latente est bien souvent limité par le manque de puissance liée à la faible conductivité thermique du matériau à changement de phase. Afin d'améliorer les performances, des éléments d'intensification des transferts sont à intégrer dans le stockage. Deux possibilités ont été étudiées et comparées ici, il s'agit d'une part d'introduire des ailettes en forme de T ou de Y et d'autre part d'associer le matériau à du graphite. Grâce à l'analyse énergétique et entropique, on montre le potentiel des différents moyens d'intensification. Le graphite présente un intérêt fort par rapport aux deux autres configurations testées. Néanmoins, ce montage permet aussi l'analyse de configurations mettant en œuvre des architectures d'ailettes de type constructal afin de proposer une forme géométrique optimisée dans le cas du transfert de chaleur avec changement de phase. Enfin, concernant le graphite et compte tenu de ses propriétés, une étude sur l'effet de l'anisotropie sur les performances du stockage est aussi en cours.

Références

- [1] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 2118-2132.
- [2] X. Py, R. Olives, S. Mauran, Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *Int. J. Heat. Mass Trans.*, 44 (2001) 2727-2737.
- [3] G. Caginalp, X. Chen, Convergence of the phase field model to its sharp interface limits, *Euro. Jnl of Applied Mathematics*, 9 (1998) 417-445.
- [4] N. Provatas and K. Elder, *Phase-Field Methods in Material Science and Engineering*, Wiley-VCH (2010).
- [5] X.X. Han, Y. Tian, C.Y. Zhao, An effectiveness study of enhanced heat transfer in phase change materials (PCMs), *Int. J. Heat. Mass Trans.*, 60 (2013) 459-468.
- [6] A. Erek, I. Dincer, An approach to entropy analysis of a latent heat storage module, *Int. J. Thermal Sciences*, 47 (2008) 1077-1085.