

Caractérisation du comportement thermique des batteries Li-ion en vue d'une gestion optimale passive

Thermal management of Li-ion batteries using PCM- Metal foam composite: Experimental and numerical investigations

Mohamed Moussa EL IDI^{1*}, Mustapha KARKRI¹, Mahamadou Abdou TANKARI¹, Cherif LAROUCI², Toufik AZIB², Gilles LEVEBRE¹

¹Université Paris- Est, CERTES, 61 Av. du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France.

²ESTACA, ESTACA'LAB, 12 avenue Paul Delouvrier, 78180 Montigny-le-Bretonneux.

*(auteur correspondant : moussa.elidi@gmail.com)

Résumé – Le conditionnement optimal des batteries Li-ion est indispensable pour leur assurer une meilleure performance, une autonomie et une durée de vie optimale. Les méthodes classiques se basent sur un contrôle thermique actif forcé ou naturel souvent encombrant et coûteux avec une efficacité limitée. L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), de manière passive, représente une alternative intéressante. Les MCP ont la capacité d'emmagasiner de l'énergie thermique dans un volume réduit. Cependant, ils présentent des inconvénients comme la vitesse de décharge, qui réduit l'aptitude du système au cyclage, ou encore leur faible conductivité thermique qui limite la capacité d'échange. 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, la gestion thermique passive des batteries Li-ion par un composite MCP-mousse métallique a été étudiée au moyen d'un nouveau dispositif expérimental développé au laboratoire. Un accent particulier a été mis sur l'optimisation de la quantité de MCP utilisé et la durée indispensable pour évacuer la quantité de chaleur stockée dans le MCP.

Mots-clés : Véhicule électrique ; batteries Li-ion ; gestion thermique ; matériaux à changement de phase ; stockage par chaleur latente ; système passif.

Abstract – Thermal management plays an important role in Li-ion batteries, especially under extreme operating conditions. Usually, air or coolant circuits (active system) are employed as thermal management systems in Li-ion batteries. However, those systems are expensive in terms of investment, operating and maintenance costs. The use of phase change materials (PCM), in a passive way, represents an interesting alternative. PCMs have the ability to store thermal energy in a reduced volume. Despite their advantage, their thermal conductivity is very. One way to increase their poor thermal conductivity is to embed them into open cell metallic foams. This work aims to develop a new Li-ion batteries thermal management system using PCM/ Metal foam composite. A new experimental test bench has been developed in order to characterize the thermal behavior of li-ion cell during charge/ discharge. Particular emphasis was placed on optimizing the amount of PCM.

Keywords: Phase change material, Battery Thermal Management System, Passive system, Thermal, Storage.

Nomenclature

I	courant électrique, A	h	coefficient d'échange convectif
U	tension électrique, V	Re	nombre de Reynolds
T	température, K	k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
m	masse, kg	r	rayon, m
C_p	capacité calorifique massique, $J.K^{-1}.kg^{-1}$	H	hauteur, m
L_f	chaleur latente, $J.kg^{-1}$	t	temps, s
C	coefficient d'inertie	q	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$

Symboles grecs

ε porosité

Indices et exposants

P matériau à changement de phase

F mousse métallique

l liquide

s solide

Li-ion batterie, type li-ion

1. Introduction

La gestion thermique des batteries types Lithium-ion est indispensable pour leur assurer une meilleure performance, une autonomie et une durée de vie optimale. Les performances de ces batteries pourraient être améliorées par une gestion thermique permettant de garder leur température de fonctionnement dans une plage convenable (entre 15-35°C). Habituellement, des circuits d'air ou de liquide de refroidissement sont utilisés comme systèmes de gestion thermique. Cependant, ces systèmes sont coûteux en matière d'investissement et d'exploitation et doivent être dimensionnés sur la puissance maximale à extraire [1].

L'utilisation des matériaux à changement de phase pour absorber la chaleur à dissiper peut représenter une alternative moins coûteuse et plus facile à mettre en place. En effet, les MCP peuvent stocker passivement la chaleur excédentaire produite par les batteries et être utilisés en tant que systèmes passifs [2]. Cependant, les MCP présentent quelques inconvénients comme par exemple la difficulté de décharger l'énergie thermique stockée, ce qui limite l'aptitude du système au cyclage, ou encore leur faible conductivité thermique qui limite les capacités d'échanges thermiques. Cependant la conductivité thermique des MCP peut être améliorée par l'ajout d'un matériau conducteur de chaleur, tels que les ailettes métalliques, le graphite expansé et les mousses métalliques [3]. Les mousses métalliques possèdent en particulier 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 intensifier les échanges thermiques des MCP.

Dans cet article nous nous intéressons à l'étude des phénomènes thermiques dans une cellule Li-ion, au dimensionnement et à l'optimisation d'un système de gestion passive par un composite MCP-mousse métallique. L'objectif est de garder la cellule à une température au-dessus de 30°C sous une sollicitation de 1C. Pour ce faire, un nouveau banc d'essais a été développé afin de suivre l'évolution de la température d'une cellule Li-ion et son flux thermique dégagé lors d'une sollicitation. La chaleur réellement dissipée par la cellule a été calculée à partir des résultats expérimentaux et grâce à un code de calcul développé sous Matlab. La simulation du comportement thermique du MCP et du composite MCP-mousse métallique est faite sous COMSOL Multiphysics et Matlab. Les résultats sont présentés et discutés.

2. Dispositif expérimental

Le banc d'essais expérimental mis au point est représenté sur la figure 1. La cellule étudiée, de capacité 2500 mAh, est branchée à une alimentation à courant continu qui assure la charge de la batterie et à une charge active qui assure la décharge. La cellule est cylindrique de dimensions : $r=9.255\text{mm}$; $H=70\text{mm}$. Des relais électromécaniques sont insérés permettant l'ouverture et la fermeture du circuit électrique. La température surfacique de la cellule est mesurée par deux thermocouples de type T. Un fluxmètre cylindrique enrobe la cellule pour mesurer le flux thermique dissipé en fonction du temps. Un programme LabVIEW a été élaboré pour suivre les cycles charge/décharge des batteries. Il permet d'assurer à la fois la commande des relais, de l'alimentation et de la charge active ainsi que l'acquisition des données mesurées. La batterie étudiée est suspendue par ses câbles d'alimentation afin

d'éviter les échanges thermiques par conduction entre la surface de la batterie et l'environnement extérieur, figure 1 (b).

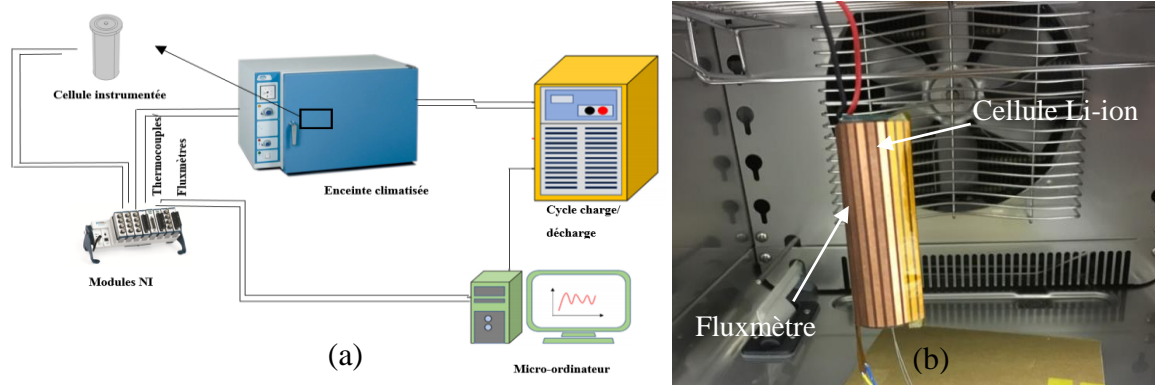


Figure 1 : Banc d'essai expérimental

3. Modélisation

3.1. Modèle physique

Pour simplifier les simulations numériques le problème est considéré en 2D. Le modèle physique est représenté par la figure 2. Il s'agit d'une cellule Li-ion entourée soit par un MCP pure ou par un composite MCP-mousse métallique. Il s'agit d'une mousse en aluminium de porosité 0.93 et d'une densité de pores de 40PPI. Les parois externes sont considérées adiabatiques.

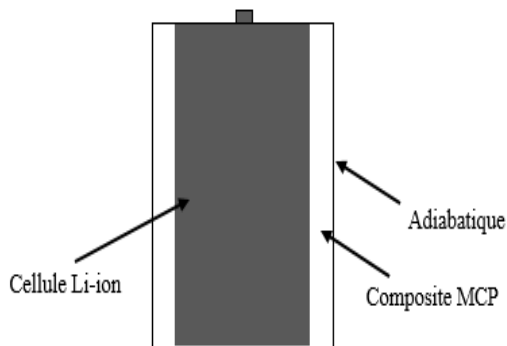


Figure 2 : *Modèle physique*

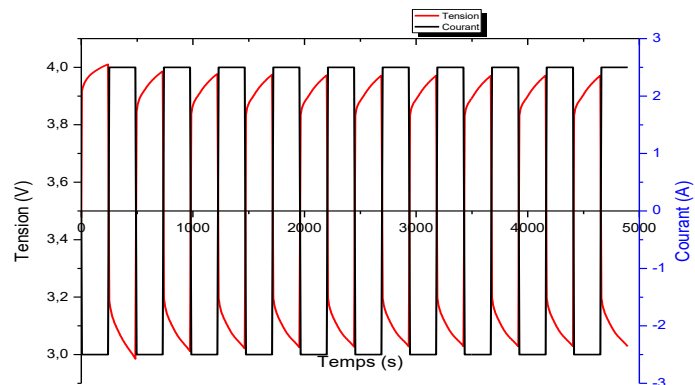


Figure 3 : *Profil charge/décharge*

3.2. Modèle mathématique

Nous utilisons dans cet article le théorème de volumes moyens qui a été introduit initialement par Whitaker [4]. 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 [5]. Afin de s'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 utilisée comme un MCP [6].

3.2.1. Equation de continuité

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

3.2.2. Equations de conservation de quantité de mouvement

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

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

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

Kozeny-Carman. A est une constante exprimée en $\text{kg/m}^3\text{s}$. Elle doit être suffisamment élevée pour que le champ de vitesse soit nul 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 :

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

3.2.3. Equation 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. Le changement de phase se produit sur un intervalle de température $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. Les fonctions $b(T)$ et $D(T)$ permettent de définir respectivement la chaleur spécifique modifiée et la conductivité thermique du MCP:

$$C_{p-p} = C_{p-p_s} + (C_{p-pl} - C_{p-p_s}).b(T) + L_f D(T), \quad k_p(T) = k_{p_s} + (k_{pl} - k_{p_s}).b(T) \quad (8)$$

Dans la mousse métallique :

$$(1 - \varepsilon)\rho_F c_{p-F} \frac{\partial T_F}{\partial t} = k_{F\text{eff}} \nabla^2 T_F - h_{pF} a_{pF} (T_F - T_p) \quad (9)$$

Les conductivités thermiques effectives de MCP et de la mousse métallique sont calculées à partir des formules développées par Boomsma K et al [7]. Le coefficient d'échange convectif est déduit à partir des relations de Zukauskas [8]:

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

	L_f	ρ_s	C_{p-s}	μ	k_s	k_l	C_{p-l}	ρ_l
	kJ.kg^{-1}	kg.m^{-3}	$\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	Pa.s^{-1}	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Kg.m^{-3}
RT27	179	870	1800	0.0034	0.24	0.15	2400	760
Alum	-	2700	900	-	220	-	-	-

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques de RT27 de la mousse.

4. Propriétés thermophysiques et structurales de la mousse

Les propriétés thermophysiques de la mousse métallique utilisée dans notre étude sont représentées dans le tableau 1. De nombreuses recherches ont été menées dans le but 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. [9] pour calculer la perméabilité et le coefficient d'inertie.

$$K = 0.00073 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.0024} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.11}, \quad C = 0.00212 d_p^2 (1 - \varepsilon)^{-0.132} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{-1.63} \quad (11)$$

Où d_f désigne le diamètre équivalent des ligaments de la mousse métallique et d_p le diamètre équivalent des pores (modèle de Calmidi et al. [9], Eq (12)). La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante [9] :

$$\frac{d_f}{d_p} = 1.18 \sqrt{\frac{1 - \varepsilon}{\pi}} \left(\frac{1}{1 - e^{-(1 - \varepsilon)/0.04}} \right), \quad a_{ps} = \frac{3\pi d_f (1 - e^{-(1 - \varepsilon)/0.004})}{(0.59 d_p)^2} \quad (12)$$

Le modèle numérique utilisé dans le cadre de cette étude est le modèle de M. Moussa et al. qui a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux [10], [11].

5. Résultats

5.1. Déroulement des essais et définition du régime permanent

Les essais ont été réalisés pour différents courants et pour une tension maximale de 3.8V et sans pause entre deux cycles consécutifs. Un cycle correspond à une charge suivie d'une décharge. La figure 2, présente les profils de tension et de courant lors d'un essai 1C (2.5A).

Cela signifie que si la batterie, pleinement chargée, est déchargée par un courant de 2.5 A, elle va atteindre sa tension d'arrêt après une heure de décharge. Les essais sont arrêtés une fois le régime permanent atteint comme montre la figure 3. En effet, la température augmente au début et tend vers une valeur constante qui caractérise le régime permanent.

5.2. Evolution de la température et de la densité de flux de la cellule

La figure 4, présente l'évolution de la température de la cellule pour un cycle de charge/décharge à 1C (2.5A). D'après la littérature, deux sources interviennent dans la génération de la chaleur dans une batterie. La première est générée par effet Joule, considérée comme source irréversible, et la deuxième source de nature réversible, qui correspond à la chaleur produite à l'interface entre l'électrolyte et les électrodes, est d'origine thermodynamique [12] [13]. Globalement nous observons dans cette figure une légère diminution de la température lors de la charge et également une augmentation lors de la décharge. On constate qu'au bout d'un cycle, la chaleur absorbée par la réaction lors de la charge et totalement restituée lors de la décharge. Ce phénomène réversible est dû à la variation d'entropie causée par l'insertion/désinsertion des ions Li^+ dans la structure cristalline du matériau actif de l'électrode négatif. La figure 5 présente l'évolution de la densité de flux thermique surfacique de la cellule. On remarque que le profil obtenu a la même allure que la température. On distingue clairement la zone de transition et la zone permanent.

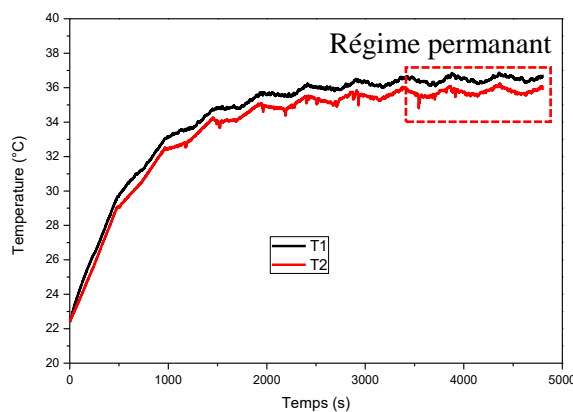


Figure 4 : Evolution de la température

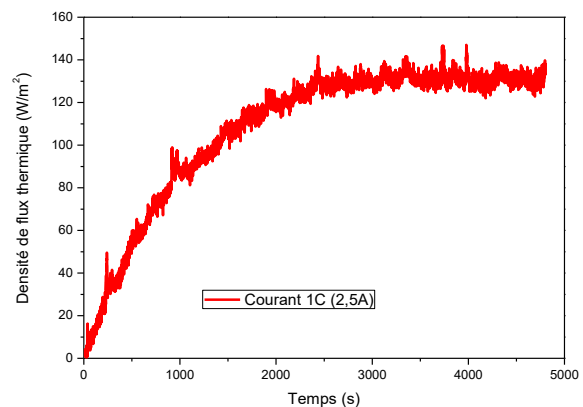


Figure 5 : Evolution de la densité de flux

5.3. Etude de l'influence de courant de charge/ décharge sur la température de la cellule

La figure 6, présente l'évolution de la température de la cellule en fonction de la capacité de la batterie (1C, 2/5C, 4/5C) ; la température ambiante étant fixée à 22.5°C. On observe que plus le courant est élevé, plus la température surfacique de la cellule est élevée. En effet, les deux sources de chaleur réversible et irréversible sont dépendantes du courant de sollicitation.

5.4. Calcul de la quantité de MCP nécessaire

Pour déterminer la quantité de la paraffine RT27 nécessaire pour absorber la chaleur dissipée par la cellule, il faut en premier lieu calculer la chaleur totale dissipée par la cellule. La quantité de la chaleur est l'intégrale de la densité de flux.

$$Q_{Li-ion} = \int_{t_1}^{t_f} \iint_S q_{Li-ion} . ds . dt \quad (14)$$

L'intégrale est calculée numériquement par la méthode des trapèzes. La masse de MCP est ensuite déduite comme suit :

$$Q_{Li-ion} = mCp_{Ps}(T_{ini} - T_{PF}) + mL_f + mCp_l(T_{final} - T_{PF}) \quad (15)$$

L'épaisseur de la couche du MCP qui entoure la cellule est calculée à partir du volume de MCP nécessaire qui est déduit à partir de la masse :

$$e = \Delta r = \sqrt{\frac{V_{PCM} + \pi r_{Li-ion}^2 H_{Li-ion}}{\pi H}} - r_{Li-ion} \quad (16)$$

L'épaisseur calculée est de 2.8mm. Nous approximations à 3mm.

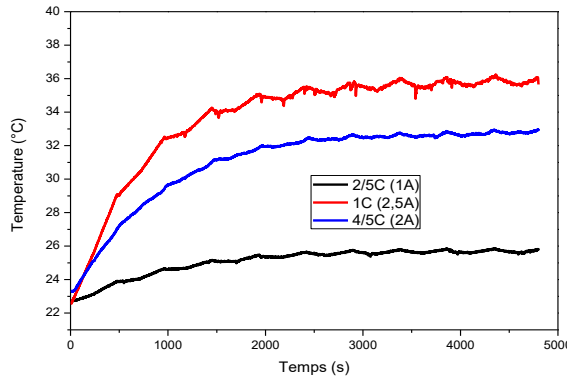


Figure 6 : Influence du courant sur la température

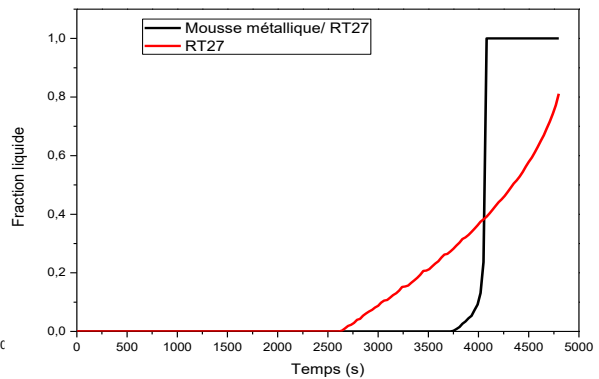


Figure 7 : Evolution de la fraction liquide

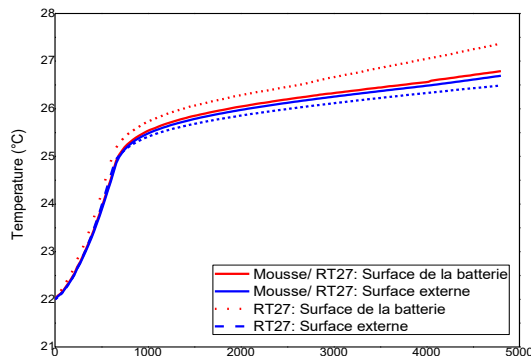


Figure 8 : Influence de l'ajout d'une mousse

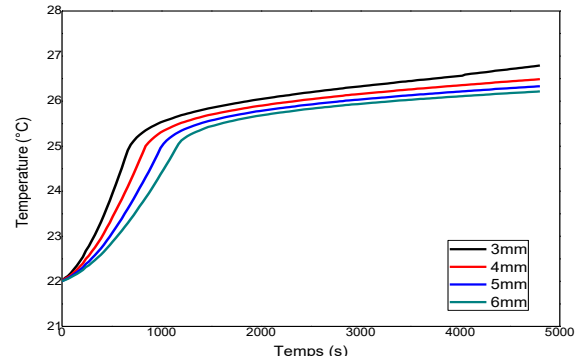


Figure 9 : Impact de l'épaisseur du composite

5.5. Optimisation de la quantité de MCP utilisée

La figure 7, présente l'évolution de la fraction liquide pour la paraffine pure et pour le composite paraffine/ mousse d'aluminium. Les résultats montrent que la fusion se déclenche rapidement dans le cas d'un MCP pur que dans le cas d'un composite MCP/mousse métallique mais avec une cinétique de fusion plus faible. En effet, l'ajout d'une mousse métallique permet d'améliorer la conductivité thermique et d'intensifier le transfert thermique. Mais on constate que le MCP n'est pas totalement fondu. De ce fait une bonne partie de MCP reste solide ce qui réduit nettement la quantité de la chaleur stockée. La figure 8, présente l'évolution de la température moyenne de la surface de la cellule et de la surface externe dans les deux cas, MCP pur et composite MCP/mousse. On constate que l'utilisation d'un composite MCP/ Mousse est plus efficace avec une température de la cellule plus faible et un écart entre les températures moins important. Ensuite les performances du composite MCP/ Mousse sont évaluées pour différentes épaisseurs (3mm, 4mm, 5mm et 6mm). Nous remarquons que l'ajout d'un volume de plus n'a pas une grande influence sur la température

de la cellule, figure 9. Cependant, le système sera d'autant plus lourd que le volume de composite est plus important.

6. Conclusion

Dans ce travail un nouveau banc expérimental a été développé pour étudier la gestion thermique d'une batterie type Li-ion. Un système de gestion passif par un composite mousse métallique/ paraffine RT27 a été dimensionné et optimisé. Les résultats ont montré que l'ajout d'une mousse d'aluminium permet une gestion thermique plus efficace de la cellule. Cette étude constitue la première pierre d'un projet de recherche qui a pour but la mise en place d'un système de gestion thermique semi-passif des batteries Li-ion optimisé et efficace au sein du laboratoire CERTES et en collaboration avec l'ESTACA.

Références

- [1] Lucia Ianniciello, Pascal Henry Biwolé, Patrick Achard, Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials, *Journal of Power Sources*, 378 (2019) 383-403.
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] S. Whitaker, *The Method of Volume Averaging*, vol. 13. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] 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
- [9] V. Calmidi, *Transportation phenomena in high porosity fibrous metal foams*, 1998, PhD thesis, University of Colorado.
- [10] 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.
- [11] El Idi Mohamed Moussa, Mustapha Karkri, A numerical investigation of the effects of metal foam characteristics and heating/cooling conditions on the phase change kinetic of phase change materials embedded in metal foam, *Journal of energy storage* 26 (2019), 100985
- [12] Charles-Victor Hémerly, *Etude des phénomènes thermiques dans les batteries Li-ion*, thèse de l'université de Grenoble, 2013
- [13] Z. Nouhou Bako, M. Abdou Tankari, G. Lefebvre, A. Seidou Maiga, "Experiment-Based Methodology of Kinetic Battery Modeling for Energy Storage", *IEEE Transactions on Industry Applications* 55 (2018) 593 – 599.