

Gestion thermique des batteries Li-ion par l'utilisation de matériaux à changement de phase et d'air en convection forcée.

Lucia IANNICIELLO ^{a,*}, Pascal Henry BIWOLE ^{a,b}, Patrick ACHARD ^a

^a MINES ParisTech, PSL Research University PERSEE – Centre procédés, énergies renouvelables et systèmes énergétiques, Sophia Antipolis, France

^b Université Côte d'Azur, Laboratoire J-A Dieudonné, UMR CNRS 7351, Nice, France

* (auteur correspondant : lucia.ianniciello@mines-paristech.fr)

Résumé - La gestion thermique des batteries Li-ion par matériaux à changement de phase (MCP) représente une solution intéressante pour pouvoir éviter de façon passive toute surchauffe des batteries. Le problème de ce système est d'évacuer l'énergie stockée dans le MCP et d'assurer ainsi le cyclage du système. L'ajout d'un système pour régénérer le MCP s'avère nécessaire. Le système étudié dans ce papier comporte un MCP et une circulation d'air en convection forcée. Le MCP sert à absorber la puissance dégagée par la batterie et l'air est exclusivement utilisé pour régénérer le MCP et assurer le cyclage du système.

Nomenclature

B_0	fonction pour le changement de phase	T	température, K
B_1	fonction lissée pour le changement de phase	T_m	température de fusion, K
C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T_s	température de surface, K
D	fonction Delta Dirac lissé	u	vitesse, m/s
h	coefficient de convection forcée, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symbole grec</i>	
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	ΔT	différence de température, K
L_F	chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
m_{MCP}	masse de MCP, kg	<i>Indices et exposants</i>	
$Q_{batterie}$	chaleur dégagée par la batterie, J	f	fusion
		i	initial
		<i>liquide</i>	phase liquide
		<i>solide</i>	phase solide

1. Introduction

Le développement des véhicules électriques est une étape importante vers la diminution de la pollution atmosphérique [1]. Les performances des voitures et surtout de la batterie se doivent d'être améliorées. Les batteries électrochimiques sont chères et ont une durée de vie limitée et assurent une autonomie faible. De plus, le temps nécessaire pour recharger une batterie est nettement supérieur à celui pour faire le plein d'essence.

La batterie la plus prometteuse pour les véhicules électriques est la batterie Li-ion [2]. En effet, elle permet d'avoir une plus grande capacité et une durée de vie plus importante [3]. En général, les batteries pour véhicules électriques ont un système de gestion thermique composé d'un circuit d'air ou d'eau. Les problèmes soulevés par ces systèmes sont leur complexité, leur manque de fiabilité et leur besoin constant en énergie pour fonctionner.

Le stockage d'énergie par chaleur latente, grâce à l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), représente une alternative intéressante car il permet d'avoir un système de

gestion thermique passif. Les MCP seraient moins chers à mettre en œuvre et plus simples à utiliser. De plus, ils pourraient permettre d'obtenir une plus grande autonomie et une meilleure durée de vie de la batterie, en la maintenant dans la gamme de température optimale [4]. De nombreuses études portent sur l'utilisation de MCP pour assurer la gestion thermique des batteries Li-ion, mais l'un des problèmes soulevés est la régénération du MCP. En effet, lorsque la température augmente au sein de la batterie, le MCP fond et stocke de l'énergie. En retour, si la température ne baisse pas suffisamment, le MCP ne peut pas cristalliser pour pouvoir être de nouveau opérationnel, lors du prochain appel de puissance. La solution proposée ici est d'utiliser un système semi-passif, couplant un MCP avec une circulation d'air ou de fluide permettant ainsi d'assurer la régénération du MCP.

Des modèles représentant une cellule de batterie prismatique, entourée de MCP, et soumise à un écoulement d'air en convection forcée ont été développés. Les transferts thermoconvectifs ont été résolus numériquement en régime dynamique à l'aide d'éléments finis quadratiques P2. Ces modèles ont été créés dans le but d'évaluer les performances d'un système semi-passif. Le MCP est présent pour absorber les pics de puissance de la batterie, tandis que l'écoulement forcé d'air sert à régénérer le MCP après qu'il soit devenu liquide. Le MCP considéré dans nos modèles est un matériau d'origine végétale avec une température de changement de phase liquide-solide à 21,5°C. Le but de l'étude est de maintenir la température moyenne de la batterie entre 20 et 25°C grâce au MCP et de régénérer rapidement le MCP par un écoulement forcé d'air en différé par rapport à la dissipation thermique à assurer.

Les résultats montrent que définir 25°C comme température maximale admise pour la batterie est une contrainte difficile à respecter et nécessite donc une grande quantité de MCP. Cependant, plus la quantité de MCP est importante plus la régénération est longue et compliquée. Cela nous amène à trouver un compromis entre la contrainte de température maximale admise par la batterie et le temps de régénération et donc la quantité de MCP à mettre en œuvre.

2. Objectifs

Les performances des batteries peuvent être améliorées lorsque leur température est maintenue dans une certaine gamme. En effet, lorsque la température de la batterie est comprise entre 15°C et 35°C sa durée de vie est plus longue et son autonomie est moins affectée par le temps (voir Figure 1). Le but de cette étude est d'évaluer si le système semi passif étudié permet de maintenir la batterie en deçà de 25°C pour un ou plusieurs cycles. L'aptitude du système à régénérer le MCP est aussi évaluée.

3. Méthodologie

Un modèle représentant une cellule de batterie prismatique entourée d'une couche de MCP et placée dans un écoulement d'air forcé a été développés. Le modèle prend en entrée les dimensions du système, les propriétés des matériaux et le cycle de sollicitation étudié. Il permet d'obtenir les températures de chaque élément à chaque pas de temps, la fraction liquide du MCP, les échanges de chaleur entre chaque élément. Les transferts thermoconvectifs ont été résolus numériquement en régime transitoire avec une discrétisation en éléments finis quadratiques.

Les dimensions d'une cellule sont : 147,9 mm x 91 mm x 26,7 mm.

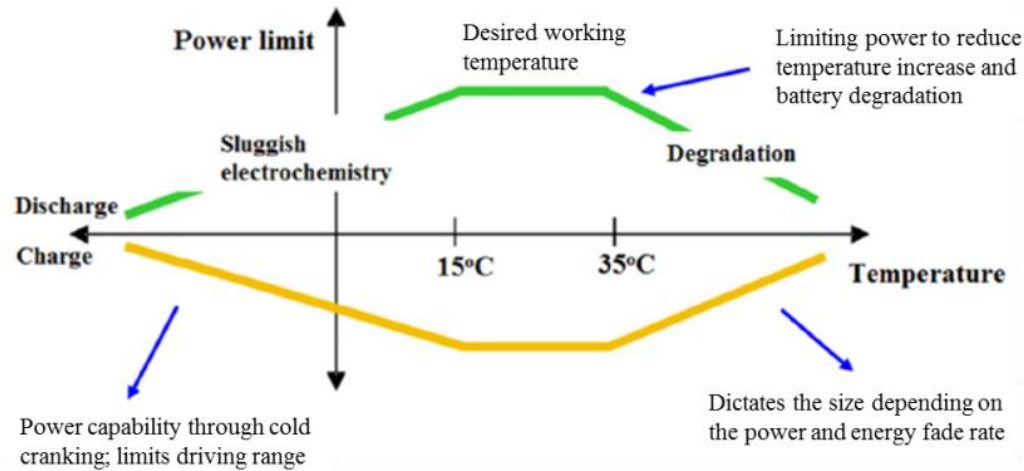


Figure 1: Courbes de puissance d'une batterie en charge et décharge en fonction de la température [5]

La sollicitation de la cellule de batterie est un cycle WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) suivi d'une décharge correspondant à 10 min de conduite sur autoroute. La quantité de chaleur par effet Joule devant être extraite de la batterie pendant un cycle est 15 kJ. Un cycle dure 2500 s (41 min et 40 s). Sans la présence de gestion thermique, la température d'une cellule à la fin d'un seul cycle serait 40°C, en considérant une température initiale de 20°C.

Le MCP considéré est composé d'acides gras végétaux. Sa température fusion est de 21,5°C et son enthalpie de changement de phase est de 150 kJ/kg. Les propriétés du matériau sont regroupées dans le Tableau 1. La quantité de MCP nécessaire, calculée, pour une cellule est 65 g (équation 1).

Température de changement de phase (°C)	21,5
Chaleur latente de changement de phase (kJ.kg ⁻¹)	152
Chaleur spécifique solide (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1670
Chaleur spécifique liquide (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	2090
Masse volumique solide (kg.m ⁻³)	960
Masse volumique liquide (kg.m ⁻³)	884
Conductivité thermique solide (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,182
Conductivité thermique liquide (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,182

Tableau 1 : Propriétés du MCP considéré

$$Q_{batterie} = m_{MCP} C_{p_{MCP,solide}} (T_f - T_i) + m_{MCP} L_f \quad (1)$$

Le MCP est placé tout autour de la cellule (voir Figure 2). Si l'épaisseur de la couche de MCP est de 1,5 mm, sa masse totale serait de 60 g par cellule, ce qui est insuffisant. Différentes épaisseurs de MCP sont testées, elles sont regroupées dans le Tableau 2. Une étude est effectuée pour définir l'influence de l'épaisseur du MCP sur la température maximale de la cellule et le temps de régénération du MCP.

Epaisseur (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Masse de MCP par cellule (g)	40	60	80	100	120

Tableau 2 : Masse de MCP selon l'épaisseur autour d'une cellule

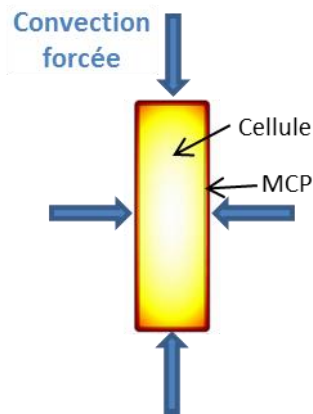


Figure 2 : Schéma du système modélisé

La convection forcée d'air débute à la fin du cycle de sollicitation (au bout de 41 min et 40 s) (cf Figure 3). Elle a pour but d'assurer la cristallisation du MCP pour qu'il puisse absorber le pic de puissance suivant. La température de l'air est de 18°C et sa vitesse est fixée à 5 m/s. L'air circule tout autour du conteneur contenant le MCP.

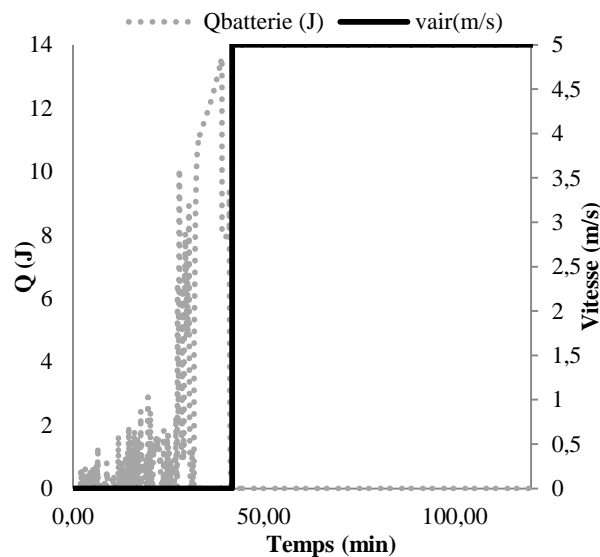


Figure 3 : Protocole : puissance dissipée par la batterie et débit d'air

Le modèle développé a pour géométrie un élément rectangulaire représentant la cellule de batterie entourée d'une épaisseur de MCP.

Le modèle mathématique fait appel aux équations de conservation de l'énergie, de la masse, et à l'équation de diffusion de la chaleur par convection (équations 2, 3 et 4).

La convection forcée aux bornes du MCP est prise en compte et la convection naturelle est négligée ($Gr/Re^2 < 1$). Les échanges radiatifs sont négligés pour tout le système. La conduction est résolue dans la cellule, entre la cellule et le MCP et dans le MCP. La convection dans le

MCP est négligée au vu de la taille réduite du contenant du MCP. Aux bornes du système, la convection forcée est considérée avec une température ambiante de 20°C.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T \right) = \nabla (k \nabla T) + h(T_s - T_\infty) + Q \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

$$\varphi_{cv} = h(T_s - T) \quad (4)$$

Pendant le changement de phase du MCP, ses propriétés thermo-physiques évoluent. La méthode utilisée pour modéliser le changement de phase du MCP est celle présentée par Biwolé et al. [6]. Une fonction B_0 , est définie pour représenter la fraction liquide du MCP (équation 5). La fonction B_0 est approximée par une équation, B_1 , qui est deux fois continument dérivable. B_1 est utilisée pour définir la masse volumique et la conductivité thermique du MCP (équations 6 et 7). Une fonction D est définie pour exprimer la capacité thermique du MCP. D est une fonction Delta Dirac lissée qui permet de répartir équitablement la chaleur latente de fusion autour du point de fusion (équation 8). La capacité thermique du MCP est donc définie à l'aide des fonctions B_1 et D (équation 9).

$$B_0(T) = \begin{cases} 0, & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{T - T_m + \Delta T}{2\Delta T}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \\ 1, & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho(T) = \rho_{solide} + (\rho_{liquide} - \rho_{solide}) \times B_1(T) \quad (6)$$

$$k(T) = k_{solide} + (k_{liquide} - k_{solide}) \times B_1(T) \quad (7)$$

$$D(T) = \begin{cases} 0, & T < (T_m - \Delta T), T > (T_m + \Delta T) \\ \frac{\exp\left(\frac{-(T - T_m)^2}{(\Delta T / 4)^2}\right)}{\sqrt{\pi(\Delta T / 4)^2}}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (8)$$

$$C_p(T) = C_{p_{solide}} + (C_{p_{liquide}} - C_{p_{solide}}) \times B_1(T) + L_F \times D(T) \quad (9)$$

Le système est discrétisé par un maillage composé d'éléments triangulaires 2D. Le nombre d'éléments composant le maillage varie selon l'épaisseur du MCP (entre 700 et 2800 éléments).

4. Résultats

4.1 Cristallisation du MCP

La Figure 4 montre l'évolution de la fraction liquide du MCP au cours du temps pour les différentes épaisseurs de MCP. Au début et jusqu'à 41 min 40s, le MCP fond. Au-delà, le débit d'air est enclenché et le MCP commence à se cristalliser. Lorsque la quantité de MCP utilisée est plus grande, il ne fond pas entièrement et le temps de solidification est plus

important. En effet, à partir de 2,5 mm le MCP ne fond pas totalement, il y a donc une partie du MCP qui n'est pas utile. Avec 2 mm d'épaisseur le MCP fond à 99%.

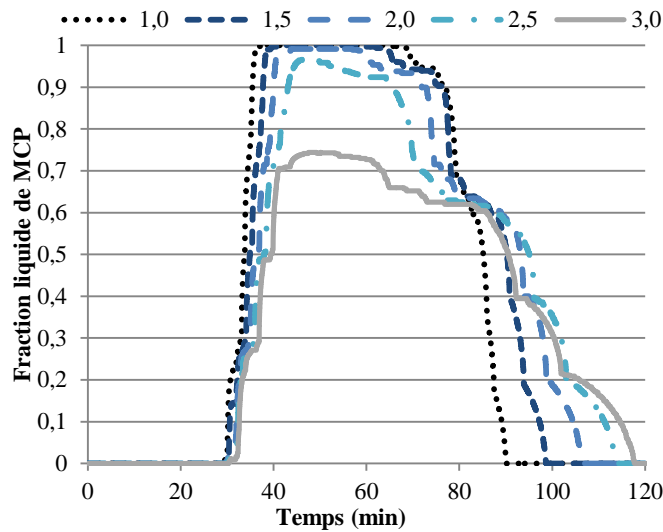


Figure 4 : Evolution de la fraction liquide du MCP en fonction du temps pour les différentes épaisseurs de MCP (en mm)

4.2. Température moyenne de la cellule de batterie

La Figure 5 montre l'évolution de la température moyenne de la cellule au cours du temps pour les différentes épaisseurs de MCP. Pendant les 41 min et 40 s que dure la sollicitation, la température de la cellule augmente d'abord lentement jusqu'à ce que le MCP soit complètement fondu, puis progressivement augmente plus rapidement. Il y a une différence de pente entre le moment où une fraction de MCP est encore solide et le moment où il devient totalement liquide car la sollicitation devient plus intense vers 25 min. Ensuite, le débit d'air est installé et permet une diminution de la température de la cellule. Sur cette deuxième partie, on a trois pentes différentes. La première correspondant au refroidissement du MCP liquide jusqu'à T_f , la seconde correspond au moment où le MCP commence à changer de phase et la troisième correspond au refroidissement du MCP solide. A partir de 2 mm d'épaisseur de MCP, la température maximale de la cellule reste la même. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une épaisseur plus importante que 2 mm.

5. Discussion

Les résultats pour chaque épaisseur de MCP sont regroupés dans le Tableau 2 et tracés en Figure 6.

Epaisseur (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Temps de cristallisation (min)	48,4	57,0	64,8	72,0	76,0
Température maximale de la cellule (°C)	30,7	28,3	26,4	26,2	26,2

Tableau 2 : Résultats de température maximale de la cellule et de temps de cristallisation du MCP en fonction de l'épaisseur de la couche de MCP

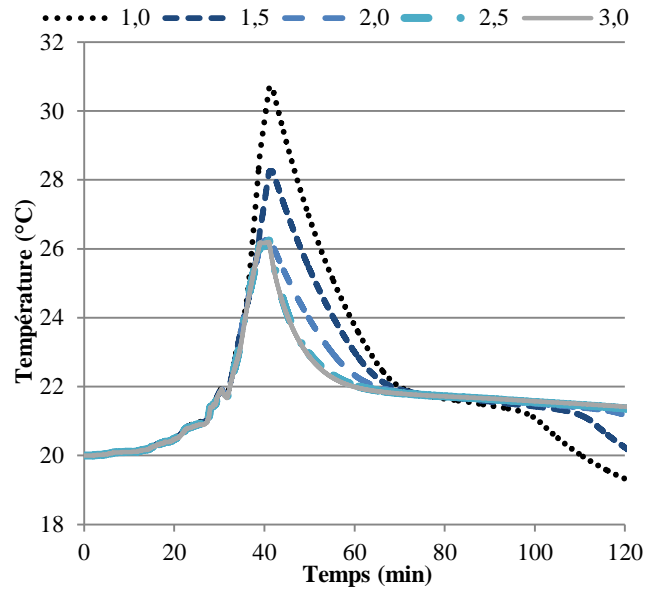


Figure 5 : Evolution de la température moyenne de la cellule en fonction du temps pour les différentes épaisseurs de MCP (en mm)

Ces résultats montrent que le temps de cristallisation du MCP augmente régulièrement avec l'ajout de MCP tandis que la température maximale de la cellule diminue jusqu'à une épaisseur de 2 mm à partir de laquelle elle se stabilise. L'ajout de MCP n'a plus d'effet sur la gestion thermique de la cellule de batterie à partir de 2 mm. Le MCP ajouté doit être trop éloigné de la cellule, et la conductivité thermique au sein du MCP n'est pas assez grande pour qu'il soit utile.

L'épaisseur de 2 mm semble être idéale mais ne permet pas de respecter la contrainte de 25°C. En effet, la température maximale de la cellule est de 26,4 °C. Même en ajoutant du MCP, la température ne descend pas en dessous de 26,2°C. Il faudrait trouver une autre configuration ou améliorer la conductivité thermique du MCP en ajoutant des ailettes par exemple.

Par ailleurs, le temps de cristallisation du MCP est de 64,8 min, donc un peu plus d'une heure. C'est un temps non négligeable vu les conditions assez favorables du débit d'air utilisé : 5 m/s d'air à 18°C. Pour ce point-là aussi, une configuration différente pourrait être envisagée favorisant la surface d'échange air / MCP pour avoir une régénération du MCP plus efficace.

6. Conclusion

Pour conclure, cette étude a permis de montrer que le MCP est un atout pour la gestion thermique des batteries car il permet d'absorber les pics de puissance. Cependant, sa faible conductivité thermique limite ses performances. De plus, l'utilisation d'air pour sa régénération est un système simple. Cependant, la géométrie de cette configuration, trop basique, ne permet pas d'avoir des temps de régénération raisonnables pour une application véhicule électrique. Ce travail pourra être complété par une étude expérimentale qui permettrait la validation du modèle. Par la suite, il sera judicieux d'essayer d'augmenter la conductivité du MCP par l'ajout d'ailettes, de mousses métalliques ou de graphite. On pourra aussi s'intéresser aux propriétés de l'échangeur pour avoir un échangeur plus performant en

modifiant sa géométrie par exemple ci qui permettrait de diminuer le temps de régénération du MCP.

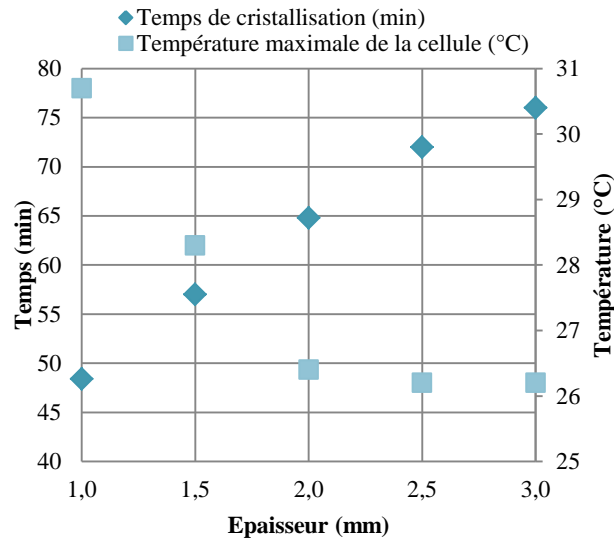


Figure 6 : Température maximale de la cellule et temps de cristallisation du MCP pour les différentes épaisseurs

Références

- [1] E. Ferrero, S. Alessandrini, and A. Balanzino, “Impact of the electric vehicles on the air pollution from a highway,” *Applied Energy*, vol. 169, pp. 450–459, May 2016.
- [2] S. Al-Hallaj, R. Kizilel, A. Lateef, R. Sabbah, M. Farid, and J. R. Selmán, “Passive thermal management using phase change material (PCM) for EV and HEV Li-ion batteries,” in *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, p. 5, 2005.
- [3] T. Zhang, C. Gao, Q. Gao, G. Wang, M. Liu, Y. Guo, C. Xiao, and Y. Y. Yan, “Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 88, pp. 398–409, Sep. 2015.
- [4] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selmán, and S. Al-Hallaj, “Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter,” *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292–307, Apr. 2004.
- [5] Ahmad Pesaran, “Tools for Designing Thermal Management of Batteries In Electric Drive Vehicles,” Pasadena, CA, 04-Feb-2013.
- [6] P. H. Biwole, P. Eclache, and F. Kuznik, “Phase-change materials to improve solar panel’s performance,” *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 59–67, Jul. 2013.