

Effet du courant de charge et décharge sur l'augmentation de la température d'une batterie lithium-ion

Charge and discharge current effect on lithium ion battery temperature elevation

Khalid ZIAT, Hasna LOUAHLIA¹, Hamid GUALOUS, Pierre SCHAETZEL

¹Normandie Université, Laboratoire LUSAC, Université de Caen Normandie, Saint Lô, France

* (auteur correspondant : hasna.louahlia@unicaen.fr)

Résumé – La maîtrise du comportement thermique des batteries lithium-ion est un facteur majeur pour assurer un fonctionnement performant et éviter leur emballement thermique. Dans ce contexte, ce travail porte sur l'étude du comportement thermique d'une batterie lithium-ion de capacité de 60 Ah soumise à des cycles de charge et de décharge à courant constant. Pour ce faire, un dispositif expérimental est mis en place dans notre laboratoire LUSAC pour tester cette batterie dans des conditions d'usage réel. Une instrumentation de la batterie par des micro-thermocouples et des fluxmètres est effectuée. Les résultats montrent que pour des courants de charge/décharge croissants, la température à la surface de la batterie augmente. Pourtant, le profil de température durant un cycle charge/décharge a une forme en 'V' pour un courant de charge égal au courant de décharge.

Mots-clés : Batterie Li-ion ; Cycle charge/décharge ; Température de surface de la batterie ; Températures électrodes ; Flux de chaleur.

Abstract – Controlling the thermal behavior of lithium-ion batteries is a key to ensure the efficient operation and to avoid the thermal runaway. In this context, this work concerns the study of the thermal behavior of a 60 Ah capacity lithium-ion battery, which is subjected to constant current charge and discharge cycles. For this purpose, an experimental device is set up in our LUSAC laboratory to test this battery under real use conditions. The battery considered is instrumented with micro thermocouples and flowmeters. The results show that the temperature at the surface of the battery increases with increasing charge/discharge currents. Nevertheless, the temperature profile during a charge/discharge cycle has a 'V' form for a charge current equal to the discharge current.

Keywords: Li-ion battery; Charge/discharge cycle; Battery surface temperature; Electrodes Temperature; Heat Flux.

1. Introduction

Actuellement, le secteur du transport représente environ 27% des émissions mondiales de CO₂. Cette situation intenable a poussé les chercheurs à développer des nouvelles technologies dans ce domaine afin de réduire cette quantité importante des émissions. L'une de ces technologies est l'électrification des véhicules. De plus, l'industrialisation des véhicules électriques est un élément clé pour minimiser l'utilisation des énergies fossiles. Pourtant, l'industrie de ces véhicules butte sur plusieurs problèmes techniques et économiques dont le plus important est le stockage d'énergie électrique. Par ailleurs, l'électricité est difficile à stocker, ce qui pose un problème de sécurité et de durée de vie des systèmes de stockage de cette énergie. Dans ce contexte, plusieurs systèmes ont été développés pour le stockage d'énergie électrique de ces véhicules en assurant une autonomie totale ou partielle.

Parmi ces systèmes on trouve les volants d'inertie, les supercondensateurs, les piles à combustible ainsi que les batteries [1]. De nos jours, les batteries lithium-ion (Li-ion) sont les plus utilisées dans les véhicules électriques comme Nissan Leaf et Mitsubishi iMiev [2]. En revanche, durant les cycles des charges/décharges, une quantité de chaleur se génère à l'intérieur de ces batteries [3]. Ce phénomène engendre une augmentation de la température à la surface de ces batteries et par conséquent une accélération de leur vieillissement [4]. D'où la nécessité de maintenir une température optimale de leur fonctionnement entre 20 et 40 °C [5] afin d'éviter les réductions de leurs performances d'utilisation. Les réactions électrochimiques au niveau des électrodes positive et négative de la batterie Li-ion sont définies comme ce qui suit :

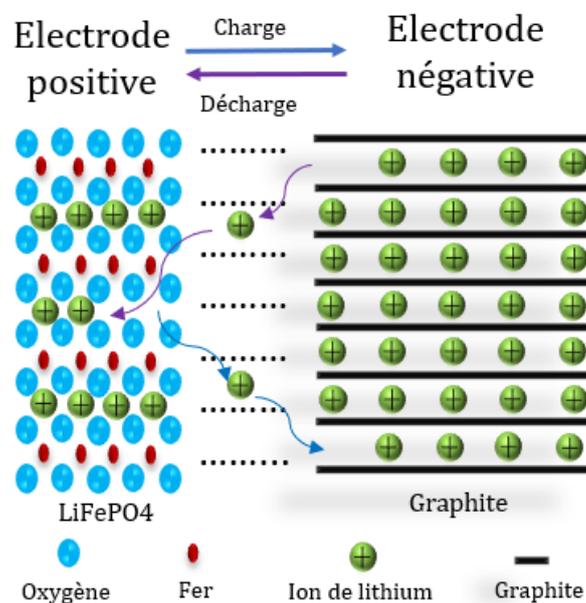
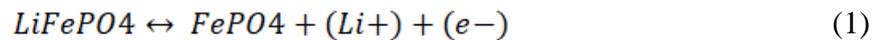


Figure 1. Schéma du fonctionnement d'une batterie Li-ion[14].

La figure 1 montre que durant le cycle charge, les ions Li^+ sont insérés sur l'électrode négative. Par contre lors de la décharge, ces ions sont insérés sur l'électrode positive. Une entropie est produite lors de ces phénomènes d'insertion et désinsertion des Li^+ [6].

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués pour analyser leur comportement thermique numériquement [7], [8] ou expérimentalement. Les mesures expérimentales démontrent une augmentation de température à la surface d'une batterie Li-ion de capacité 20 Ah pour des courants de décharge croissant [9]. Une cellule de LiFePO4 plate a été étudiée pour caractériser la variation de la température en fonction de temps (dT/dt) et le gradient de la température (dT/dy). Les résultats montrent qu'une génération non-uniforme de la chaleur conduit à une distribution non-uniforme de la température [10]. De plus, les tests exécutés sur une batterie li-ion plate de 40 Ah pour des courants allant de 5A à 40 A montrent une augmentation de température allant de 3 à 11 K [11]. Un gradient de température entre l'intérieur et la surface de la batterie a été observé ce qui peut endommager les performances de la batterie [12]. Également, une forte dépendance de densité de flux surfacique au courant de décharge était obtenue pour une cellule Li-ion [13]. En outre, la densité de flux surfacique maximale était trouvée au niveau des électrodes positive et négative [14]. Lors du

fonctionnement d'une batterie, la génération de chaleur interne résulte du flux irréversible produit par l'effet Joule et le flux irréversible produit au cours de la cinétique des Li⁺ lors de l'insertion/désinsertion dans les électrodes positive et négative [15]. Pour des courants élevés, le flux irréversible est dominant. Par contre l'influence de flux réversible est plus remarquable pour des faibles courants de charge/décharge [16]. Notre travail porte sur l'étude de l'effet de courant de charge/décharge sur le comportement thermique d'une batterie Li-ion prismatique de capacité 60Ah.

2. Procédure expérimentale

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est présenté dans la figure 2. Il s'agit d'une batterie lithium-ion prismatique d'une capacité de 60 Ah (CALB) reliée à une alimentation (GEN40-125) et une charge active (EA-EL 9080-200). Des cycles de charge/décharge successifs à courant continu sont appliqués à la batterie en mesurant la variation de la température sur 3 faces de la batterie, les électrodes positive et négative ainsi que la densité de flux surfacique. Durant le cycle de charge, le relais R1 illustré dans la figure 3 reste fermé jusqu'à ce que la tension de la batterie atteigne une tension maximale de 3,6V. Durant le cycle de décharge, le relais R2 reste fermé jusqu'à atteindre une tension minimale de 2,6V.

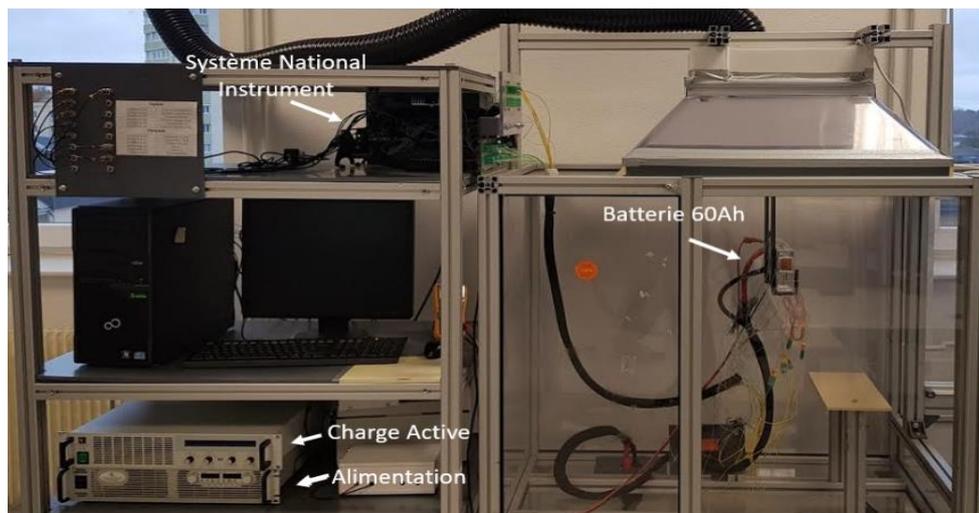


Figure 2 : Dispositif expérimental

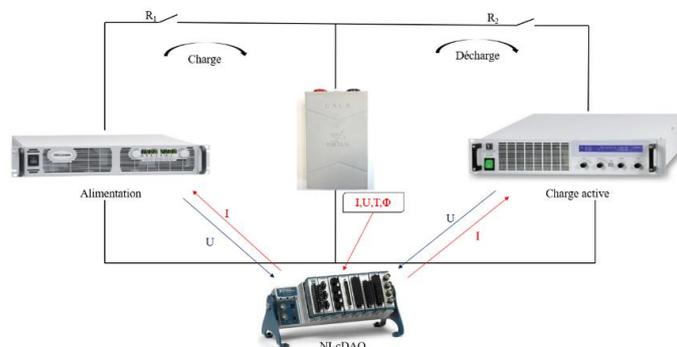


Figure 3 : Schéma du circuit électrique

Le contrôle du cycle charge/décharge ainsi que l'enregistrement des données sont faits à l'aide du logiciel LabVIEW relié à un système d'acquisition National Instrument. Des thermocouples de type K ainsi que 3 fluxmètres (OMEGA HFS-4) sont insérés sur la surface

de la batterie afin de mesurer la variation de la température et du flux durant des cycles de charge/décharge successifs. Un capteur de température de précision série P600 et un bain thermostatique Polystat 36 sont utilisés pour l'étalonnage des thermocouples. La figure 4 montre la courbe d'étalonnage du thermocouple TC Directe de 200 microns de diamètre inséré sur l'électrode positive ainsi que l'équation de correction. À noter que la conversion de la tension en flux pour les fluxmètres est réalisée à l'aide d'une équation d'étalonnage

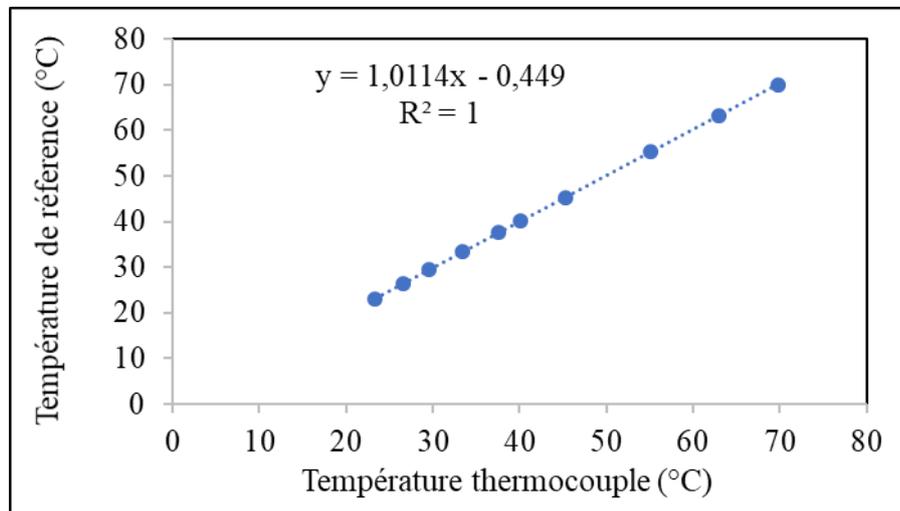


Figure 4 : Exemple de courbe d'étalonnage d'un Thermocouple.

3. Analyses des résultats

3.1. Température de la surface et des électrodes de la batterie

La figure 5 illustre l'évolution de la température au centre des trois faces de la batterie ainsi que les électrodes durant des cycles charges/décharges à 60A, où le courant de charge est défini par un courant négatif.

On remarque l'apparition d'un régime transitoire pendant le premier cycle et l'établissement d'un régime quasi stationnaire à partir du deuxième cycle. Durant ce régime, le profil de température à une forme 'V' dans chacun des cycles à cause d'existence de flux réversible qui dépend du coefficient d'entropie thermique [17]. Le coefficient d'entropie thermique a une valeur négative pour un état de charge inférieur à 35% [18] ce qui se traduit par un flux réversible endothermique au début de chaque cycle. De plus, la température de l'électrode positive est supérieure à celle de l'électrode négative. Cela est dû à la différence entre la conductivité thermique des collecteurs métalliques utilisés dans chaque électrode [19] qui sont l'aluminium pour l'électrode positive et le cuivre pour l'électrode négative. Les températures mesurées par les thermocouples (T_{sx} , T_{sy}) sont approximativement égales. En revanche, le thermocouple (T_{sz}) indique une température inférieure. Dans le but d'analyser ces résultats, nous avons découpé la batterie pour connaître sa compositions interne. Nous avons trouvé une petite zone à la partie inférieure de la batterie où il n'y a pas de matière active ce qui joue le rôle d'une isolation thermique.

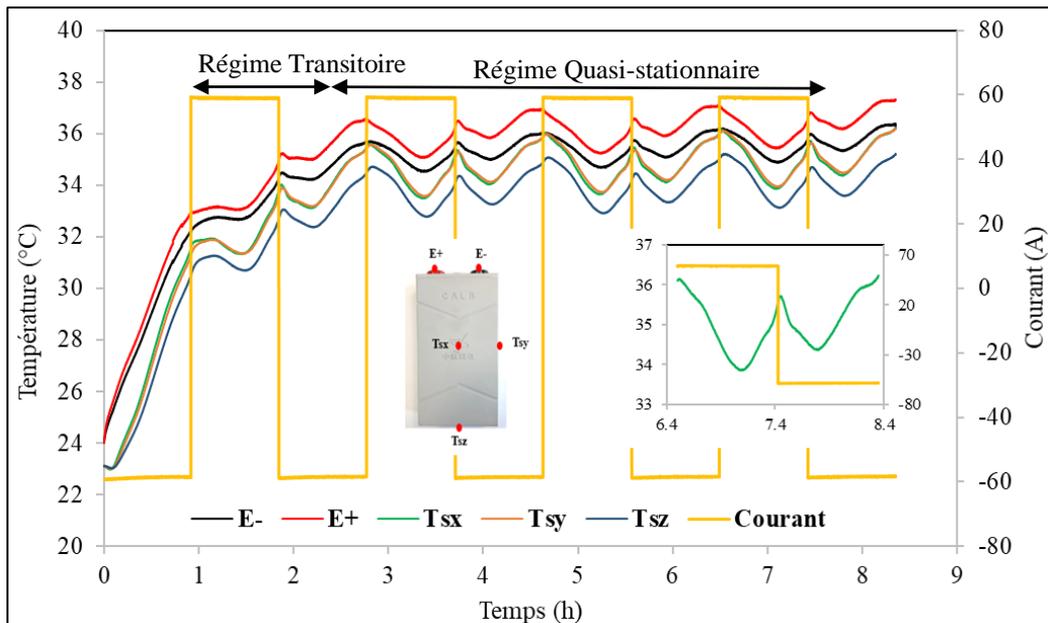


Figure 5 : Profil de température sur la surface de la batterie pour des cycles charge/décharge à 60A.

Les mesures expérimentales de la température effectuées pour les trois courants de charge/décharge sont présentées dans la figure 6. Une différence de 0,92°C est obtenue entre la température maximale de l'électrode positive et la température maximale mesurée par le thermocouple (T_{sz}). Or, l'éc augmente pour un courant croissant. Elle est de l'ordre de 2°C pour un courant de charge décharge de 60A et de l'ordre de 6,79°C pour un courant de charge 60A et un courant de décharge 100A. D'après ce qui précède, on peut conclure que la distribution de la température à la surface de la batterie est plus importante pour un courant de charge/décharge élevé.

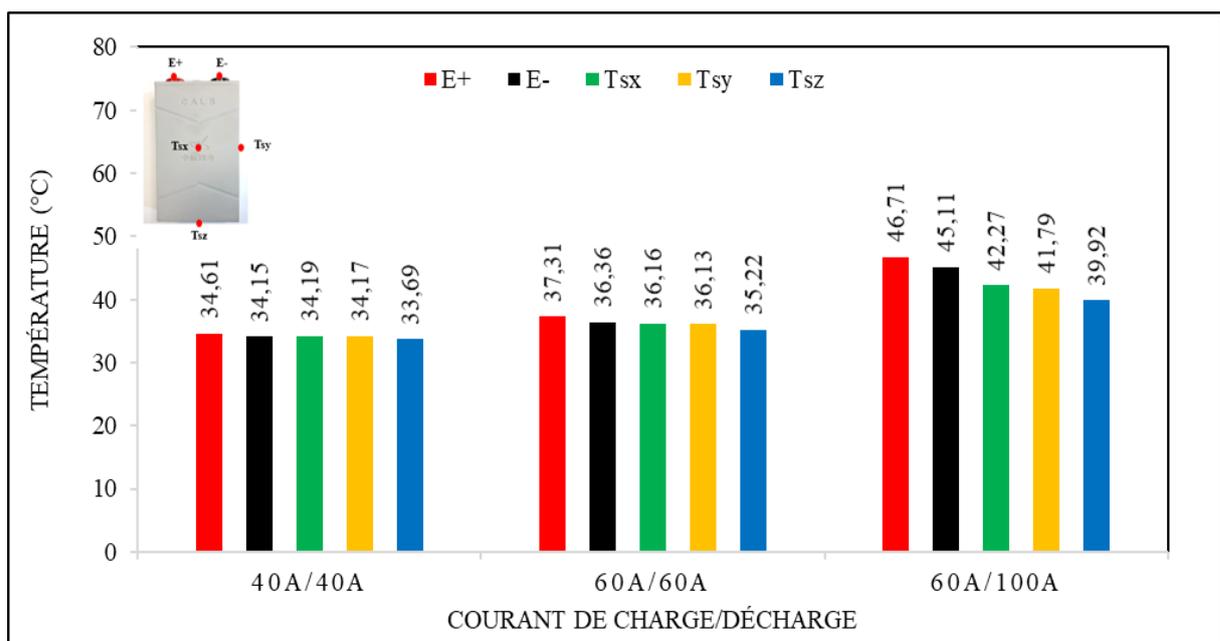


Figure 6 : Température maximale pour différents courants de charge/décharge.

3.2. Profil de la température 1^{er} cycle charge/décharge

D'après les résultats obtenus dans la section précédente, la température surfacique de la batterie dépend fortement du courant de charge/décharge. Pour mieux comprendre cette dépendance, nous allons présenter dans cette section le profil de température pour cinq différents courants durant un cycle charge/décharge comme le montre la Figure 7.

On remarque que pour les courants (40A/40A, 50A/50A, 60A/60A), la température augmente avec une pente différente au cycle de charge suivi d'une diminution de la température au début du cycle de décharge puis une ré-élévation de température. Cette diminution est due principalement au flux réversible produit par l'insertion et la désinsertion des 'Li+' dans les électrodes positive et négative lors du fonctionnement de la batterie. De plus, on observe que pour les courants (60A/80A, 60A/100A), la température augmente durant le cycle de charge et de décharge. Cela est justifié par la dominance de flux irréversible.

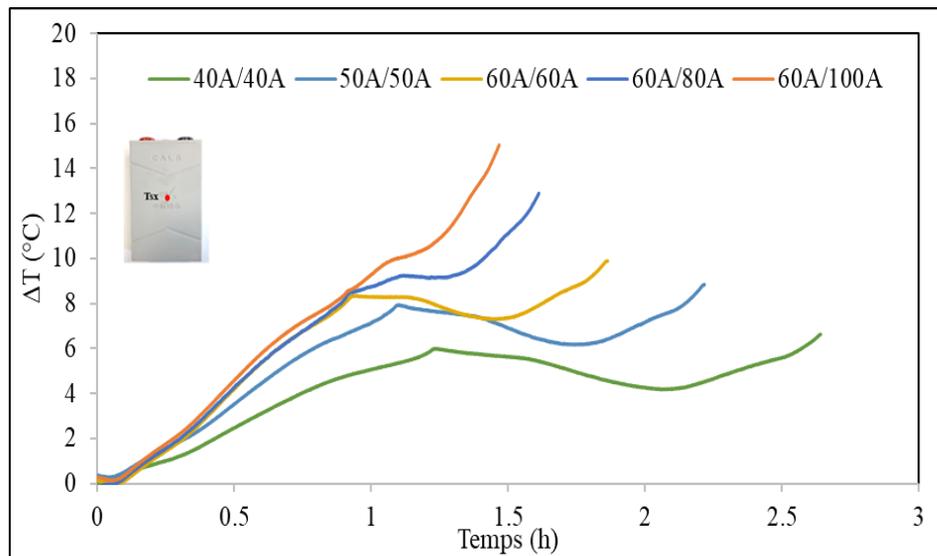


Figure 7 : Effet du courant de charge/décharge sur l'augmentation de température à la surface de la batterie

3.3. Mesure de densité de flux thermiques dissipés

La génération interne de la chaleur est responsable de l'augmentation de la température à l'intérieur de la batterie. Pourtant une quantité de cette énergie est dissipée à l'extérieur. Dans cette section, on vise à présenter les mesures expérimentales effectuées par trois fluxmètres insérés sur 3 faces de la batterie. Les densités de flux surfacique mesurées sur les faces (x et y) (ϕ_x , ϕ_y) ont des valeurs proches car le coefficient d'échange thermique et la température de l'ambiance reste identique. On remarque que la densité de flux surfacique (ϕ_z) est un peu supérieure aux autres faces, ceci est justifié par le changement des propriétés thermiques de la batterie dans la partie inférieure à cause de l'existence d'une petite couche sans matière active. Le flux total dissipé est calculé par la somme des densités de flux surfaciques en supposant une symétrie dans la dissipation à travers toutes les faces.

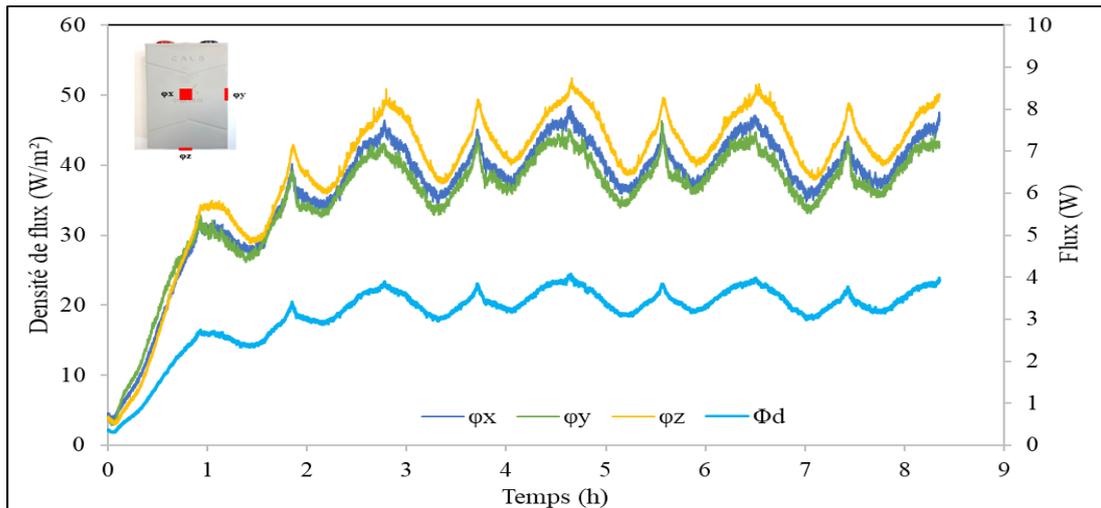


Figure 8 : Densité de flux surfacique et flux total dissipé pour des cycles charge/décharge à 60A

4. Conclusion

Une batterie lithium fer phosphate (LFP) de capacité 60Ah est étudiée expérimentalement pour les courants de charge de 40A, 50A et 60A ainsi que pour des courants de décharge de 40A, 50A, 60A, 80A et 100A. Des cycles de charge/décharge à courant continu sont appliqués à la batterie afin d'analyser l'effet du courant sur son comportement thermique. Les résultats expérimentaux montrent :

- L'existence du régime transitoire suivi du régime quasi-stationnaire. La variation de la température dans le régime quasi-stationnaire est due au flux réversible qui dépend de l'entropie qui varie durant chaque cycle en fonction de l'état de charge de la batterie. Le profil de température dans le régime quasi stationnaire à une forme 'V' durant chaque cycle.
- Les températures mesurées aux électrodes positive et négative sont supérieures à celles mesurées au centre des trois faces de la batterie. De plus, la température de l'électrode positive est plus élevée que celle de l'électrode négative.
- L'uniformité de la distribution de la température à la surface de la batterie dépend de courant.
- La température maximale augmente pour des courants de charge/décharge croissant suite à l'effet du flux irréversible qui est proportionnel carré du courant.

Références

- [1] 1. Doucette, R. T., & McCulloch, M. D. (2011). A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 196(3), 1163-1170.
- [2] Pollet, b. G., staffell, i., & shang, j. L. (2012). Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: from electrochemistry to market prospects. *Electrochimica acta*, 84, 235-249.
- [3] Shi, S., Xie, Y., Li, M., Yuan, Y., Yu, J., Wu, H., ... & Liu, N. (2017). Non-steady experimental investigation on an integrated thermal management system for power battery with phase change materials. *Energy conversion and management*, 138, 84-96.

- [4] S. Goutam, J.-M. Timmermans, N. Omar, P. Bossche, and J. Van Mierlo, "Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography," *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 8175–8192, Aug. 2015.
- [5] Teng, H., Ma, Y., Yeow, K., & Thelliez, M. (2011). An analysis of a lithium-ion battery system with indirect air cooling and warm-up. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 4(2011-01-2249), 1343-1357.
- [6] Zhang, X. (2011). Thermal analysis of a cylindrical lithium-ion battery. *Electrochimica Acta*, 56(3), 1246-1255.
- [7] Allart, D., Montaru, M., & Gualous, H. (2017, March). Thermal model of battery for high capacity energy storage systems cell scale model and experimental validation. In 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS) (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Asus, Z., Bakar, S. A. A., Husain, N. A., Samin, P. M., & Chrenko, D. (2017, December). Temperature Prediction of Lithium-Ion Battery Used in Realistic Driving Cycles. In 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) (pp. 1-4). IEEE.
- [9] Panchal, S., Dincer, I., Agelin-Chaab, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2016). Experimental and theoretical investigation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery. *International Journal of Thermal Sciences*, 99, 204-212.
- [10] Panchal, S., Mathewson, S., Fraser, R., Culham, R., & Fowler, M. (2017). Measurement of Temperature Gradient (dT/dy) and Temperature Response (dT/dt) of a Prismatic Lithium-Ion Pouch Cell with LiFePO₄ Cathode Material (No. 2017-01-1207). SAE Technical Paper.
- [11] Schuster, E., Ziebert, C., Melcher, A., Rohde, M., & Seifert, H. J. (2015). Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell. *Journal of Power Sources*, 286, 580-589.
- [12] Novais, S., Nascimento, M., Grande, L., Domingues, M., Antunes, P., Alberto, N., ... & Passerini, S. (2016). Internal and external temperature monitoring of a Li-ion battery with fiber Bragg grating sensors. *Sensors*, 16(9), 1394.
- [13] Drake, S. J., Martin, M., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzl, J. M., & Jain, A. (2015). Heat generation rate measurement in a Li-ion cell at large C-rates through temperature and heat flux measurements. *Journal of Power Sources*, 285, 266-273.
- [14] Rizk, R., Louahlia, H., Gualous, H., Schaezel, P., & Alcicek, G. (2019). Experimental analysis on Li-ion battery local heat distribution. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-15.
- [15] Bai, Y., Li, L., Li, Y., Chen, G., Zhao, H., Wang, Z., ... & Zhou, J. (2019). Reversible and irreversible heat generation of NCA/Si-C pouch cell during electrochemical energy-storage process. *Journal of Energy Chemistry*, 29, 95-102.
- [16] Eddahech, A., Briat, O., & Vinassa, J. M. (2013). Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery: Potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes. *Energy*, 61, 432-439.
- [17] Madani, S., Schaltz, E., & Knudsen Kær, S. (2018). Review of parameter determination for thermal modeling of lithium ion batteries. *Batteries*, 4(2), 20.
- [18] Forgez, C., Do, D. V., Friedrich, G., Morcrette, M., & Delacourt, C. (2010). Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2961-2968.
- [19] Das, A., Ashwin, T. R., & Barai, A. (2019). Modelling and characterization of ultrasonic joints for Li-ion batteries to evaluate the impact on electrical resistance and temperature raise. *Journal of Energy Storage*, 22, 239-248.