

Modélisation Electrothermique 2D d'une batterie lithium-ion de type « poche »

Ahmadou SAMBA^{1,2}

¹ Université de Caen Basse Normandie, Rue Louis Aragon, 50130 Cherbourg-Octeville, France

² Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050, Bruxelles, Belgique

ahmadou.samba@vub.ac.be

RESUME – Dans ce papier, un modèle électrothermique 2D a été développé pour une cellule de batterie lithium-ion de type « pouch ». Ce modèle est capable de prédire la température de la batterie à différentes conditions de fonctionnement. Les paramètres d'entrée du modèle sont entre autres la source de chaleur et les paramètres thermiques. Le logiciel ANSYS FLUENT est utilisé pour résoudre ce modèle. La source de chaleur utilisée dans ce modèle est déterminée expérimentalement. De plus le comportement thermique de la cellule de batterie a été étudié dans différentes conditions de fonctionnement, aussi bien dans des conditions extrêmes. Les résultats de la simulation sont en bon accord avec les mesures expérimentales données par les thermocouples et la caméra thermique.

ABSTRACT – This paper represents a simulation model for a 2D electro-thermal model applied on a Lithium-ion pouch battery with a rated capacity of 45 Ah. This model is able to describe the transient response of the thermal distribution accurately. The used input parameters are the heat generation and thermal properties. The ANSYS FLUENT software has been used to solve the models. The heat generation parameters used in this model have been obtained experimentally from dedicated estimation technique. Furthermore, the thermal behavior of the proposed battery has been investigated under different environmental conditions as well as during the abuse conditions. The experimental results are in good agreement with the results of the developed model.

MOTS-CLES – Batterie lithium-ion, entropie, résistance interne, caméra thermique

1. Introduction

Compte tenu de la baisse des stocks des énergies fossiles, de l'augmentation du prix du pétrole ainsi que des effets incontestables du réchauffement climatique, la recherche s'active de plus en plus à mettre en œuvre des solutions innovantes pour réduire les émissions de gaz à effet de serre tant dans l'industrie, l'habitat ou les transports. Dans le secteur des transports, le développement des véhicules électriques hybrides (HEVs), des véhicules tout électriques (EVs) ainsi que des véhicules hybrides électriques à recharge (PHEVs) [1-4].

Les batteries lithium-ions jouent un rôle très important en tant que des vecteurs d'énergies dans notre société principalement dans les EVs, les HEVs et les PHEVs. Lors des phases de décharge ou de charge, diverses réactions chimiques et électrochimiques se produisent. Ces réactions sont de nature globalement exothermique, produisant ainsi de la chaleur qui s'accumule à l'intérieur de la batterie et catalysant ainsi les diverses réactions chimiques. Le taux de production de chaleur augmente de façon significative avec l'augmentation du courant de charge ou de décharge. Si la chaleur dissipée de la batterie vers son environnement extérieur n'est pas suffisante (négligeable par rapport à la chaleur produite), sa température peut s'élever très rapidement et dans les pires scénarios, il peut s'ensuivre un emballement thermique [6].

Dans le but de satisfaire, d'une part, les conditions de sécurité des batteries et, d'autre part, l'augmentation de ses performances, la connaissance de la distribution de température de la batterie est nécessaire. Par conséquent, une bonne utilisation des batteries peut augmenter sa durée de vie et ses performances. Dans ce travail, une cellule de lithium-ion fer phosphate, de type « pouch », avec une capacité nominale de 45Ah a été utilisée. Afin de maintenir la température de la cellule dans une gamme de température de sécurité [40°C-60°C], un modèle de couplage électrique-thermique a été établi pour prédire la distribution de la température à la surface de la batterie.

En raison de la grande taille et de la faible épaisseur de la batterie utilisée, un modèle 2D thermique couplé avec un modèle électrique à 1D, est développé pour prédire la distribution thermique à la surface de la batterie à l'aide du logiciel ANSYS.

2. Modèle thermique

Compte tenu de l'épaisseur négligeable (13 mm) des batteries de type « pouch », un modèle 2D a été développé afin d'estimer la distribution de température à sa surface. La batterie est composée de différents domaines (**Figure 1**) : les terminaux, les électrodes ainsi que l'emballage. Ces domaines sont constitués de différents matériaux (cf. **Tableau 1**)

Tableau 1: matériaux associés aux domaines

Domaine	Terminal positif	Terminal négatif	Electrodes	emballage
Matériaux	aluminium	cuivre	LiFePO4/graphite	aluminium

Le mode de transfert de chaleur par conduction suffit pour décrire les échanges thermiques. De plus, les phénomènes de convections entre les électrodes et l'électrolyte peuvent être négligés. Dans le domaine des électrodes, un matériau composite équivalent est défini pour modéliser toutes ces différentes couches (cathode, anode, séparateur et l'électrolyte) qui le constituent. Les paramètres thermiques et électriques des matériaux qui composent les terminaux et l'emballage peuvent être facilement trouvés dans la littérature. Par contre ceux du domaine des électrodes doivent être estimés. Une nouvelle technique d'estimation a été développée dans [8] pour calculer les paramètres thermiques du domaine des électrodes.

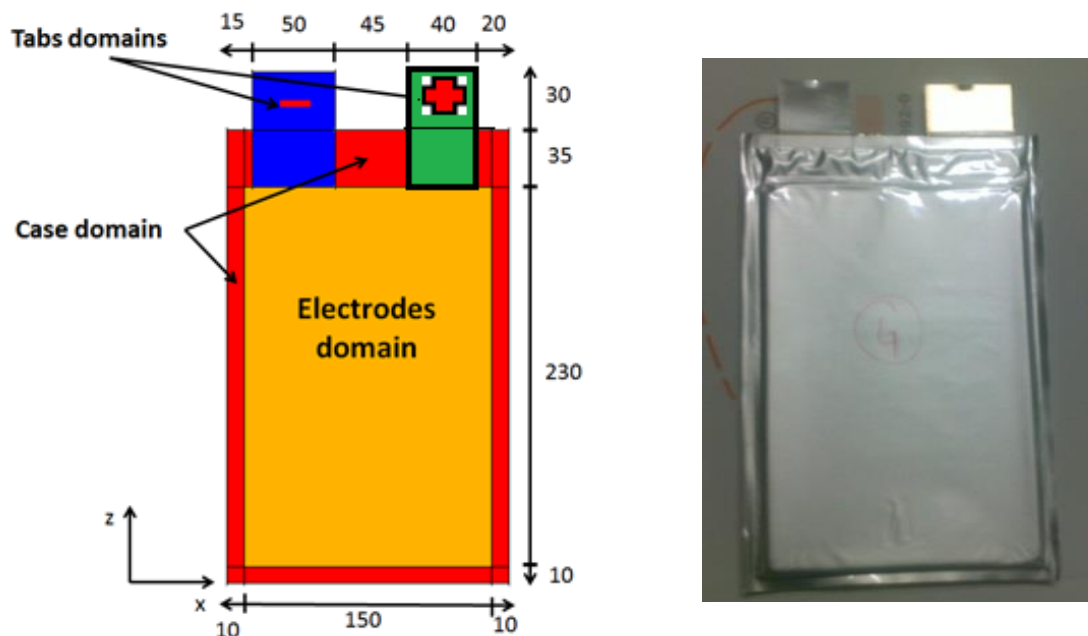


Figure 1: les différents domaines de la batterie de type "pouch"

En se basant sur les hypothèses ci-dessus, le bilan de conservation de l'énergie thermique est donné par :

$$k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + q_g = \rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Où ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et q_g ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$) sont respectivement la masse volumique, la capacité thermique, la conductivité thermique dans les directions de x et de z et enfin la chaleur générée par la batterie. Etant donné que cette chaleur générée varie en fonction du domaine de la batterie, alors :

- Dans le domaine des électrodes, l'expression de la source de chaleur volumique est donnée par la contribution de source de chaleur réversible et irréversible :

$$q_g = \frac{1}{V_{bat}} \left[RI^2 + \left(T \left[\frac{dE}{dT} \right] \right) I \right] \quad (2)$$

Où V_{bat} (m³), $R(\Omega)$, $I(A)$, $\frac{dE}{dT}$ (V.K⁻¹) sont respectivement le volume de la batterie, la résistance interne de la batterie, le courant qui traverse la batterie (positif en charge et négatif en décharge) et enfin le coefficient d'entropie.

- Dans le domaine des terminaux, l'expression de la source de chaleur volumique est donnée par la relation :

$$q_g = \frac{R'I^2}{V_{tab}}; \quad R' = \rho' \frac{l}{S} \quad (3)$$

Où V_{tab} (m³), $R'(\Omega)$, $\rho'(\Omega.m^{-1})$, S (m²) et l (m) sont respectivement le volume, la résistance, la résistivité, la section et la longueur du terminal considéré et enfin le coefficient d'entropie

- La source de chaleur dans l'emballage est égale à zéro:

$$q_g = 0 \quad (4)$$

La chaleur dissipée de la batterie vers son environnement extérieur est d'origine convective et radiative, et s'exprime comme suit :

$$q_s = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) |_{surfaces} = (h + h_{rad})(T - T_a) \quad (5)$$

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(T^2 + T_a^2)(T + T_a)$$

Où h (W.m⁻².K⁻¹) représente le coefficient de convection, ϵ est l'émissivité de l'emballage de la batterie, σ (W.m⁻².K⁻⁴) la constante de Stefan-Boltzmann et T_a la température ambiante.

En résumé, ce modèle requiert comme données d'entrée la résistance interne (R) de la batterie et le coefficient d'entropie ($\frac{dE}{dT}$). La résistance interne est estimée à partir d'un modèle électrique à une dimension couplé avec des tests de HPPC « Hybrid Pulse-Power Capability» comme décrit dans les travaux de Omar et al [4]. En ce qui concerne le coefficient d'entropie, il est mesuré expérimentalement. Il est important de souligner que la résistance interne et le coefficient d'entropie dépendent de la température de la batterie et de son état de charge (SOC). Pour une estimation plus précise des paramètres électriques et thermiques il est important de coupler les deux modèles comme le montre la Figure 2

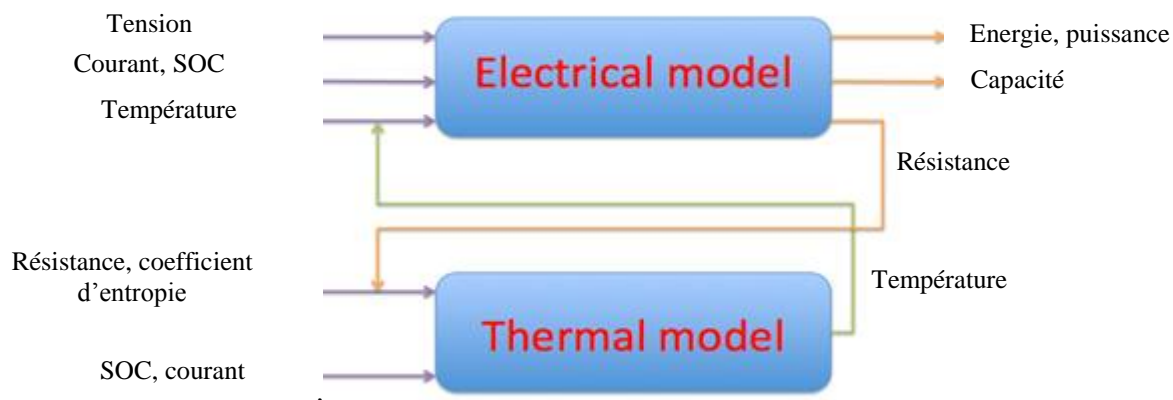


Figure 2 : Principe de base du modèle électrothermique

2.1 Mesure de la résistance et du coefficient d'entropie

La résistance interne (R) de la batterie est estimée à partir d'un modèle de Cauer de premier ordre combiné avec les résultats de test de HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization) [5]. La résistance est estimée à différents courants de charge et de décharge et également à différentes températures de fonctionnement. Les Figure 3 et Figure 4 montrent le comportement de la résistance en mode de charge et de décharge en fonction de la température et de l'état de charge. On remarque que la résistance diminue avec l'augmentation de la température. Ceci s'explique par le fait qu'en basse température, l'électrolyte, le liquide contenu dans les batteries, se solidifie et ainsi s'oppose au passage des ions entre les électrodes, entraînant ainsi une augmentation de la résistance. Cette même technique d'estimation de la résistance a été utilisée pour différents taux (I_t) de charge et de décharge.

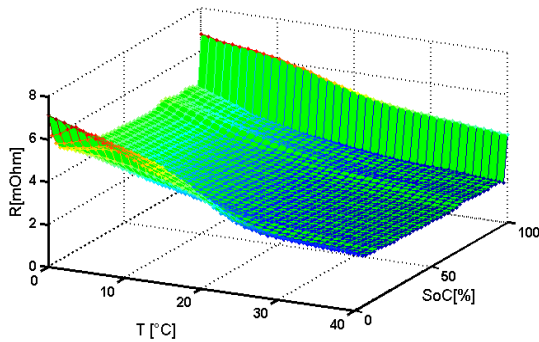


Figure 3: Résistance interne de charge à différents SoCs and températures pour un taux de charge de 1 It

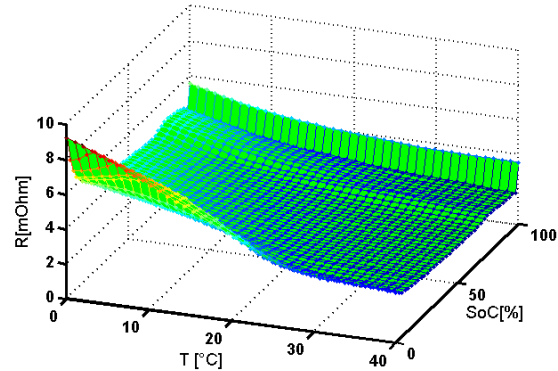


Figure 4 : Résistance interne de charge à différents SoCs and températures pour un taux de décharge de 1 It

En ce qui concerne la mesure du coefficient d'entropie ($\frac{dE}{dT}$), la technique de mesure consiste à se positionner à un état de charge (SoC) donné, ensuite on mesure la variation du potentiel d'équilibre (OCV) de la batterie à différentes températures. L'expérience est répétée à différents états de charge et selon que la batterie est en mode de charge ou décharge. Ainsi, nous avons les résultats suivants (cf. Figure 5), où l'on montre le coefficient d'entropie en charge qui est différent de celui en décharge à cause de l'hystérésis remarqué au niveau des potentiels d'équilibre de la batterie lors des phases de charge et de décharge. De plus selon le signe du coefficient d'entropie et du mode de fonctionnement de la batterie (charge ou décharge), la source de chaleur réversible peut être soit positive (exothermique) ou soit négative (endothermique). Cette source est d'autant plus importante lorsque la batterie est cyclée avec un courant faible amplitude.

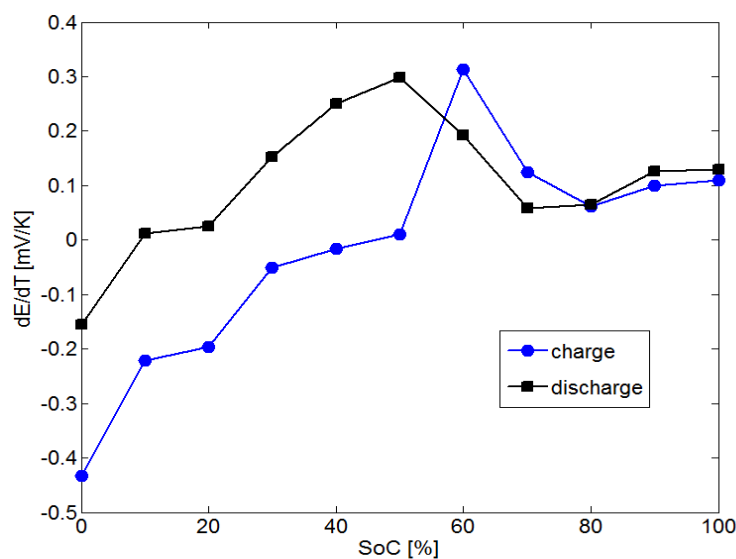


Figure 5: coefficient d'entropie en charge et décharge

2.2 Les paramètres thermiques

La cellule de batterie, plus particulièrement le domaine des électrodes, est considérée comme une boîte noire et existe en tant que matériaux composites, les paramètres thermiques peuvent être estimés que par des signaux d'entrée et de sortie. Pour une batterie, seulement le courant, la tension et la température à la surface peuvent être mesurés. Ce modèle fonctionne comme suit : le courant et la tension permettent d'estimer via le modèle électrique, la résistance interne, donc la chaleur irréversible de la batterie. Ensuite à partir des mesures de température à la surface, on estime les paramètres thermiques (la capacité thermique, la résistance thermique de conduction et la résistance thermique de convection et de radiation) via un modèle à constante localisée, où le bilan énergétique est représenté par le circuit équivalent électrique de premier ordre dans chaque direction de la cellule [8]. Les résultats de ces calculs ont été résumés dans le Tableau 2. Ces valeurs sont en accord avec ceux de la littérature. En ce qui concerne les paramètres thermiques des autres domaines (terminaux et emballage), composés essentiellement de cuivre et d'aluminium, ceux-ci peuvent être facilement trouvés dans la littérature [7].

Tableau 2: paramètres thermiques du domaine des électrodes

ρ (kg. m ⁻³)	C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	h (Wm ⁻² K ⁻¹)	σ (Wm ⁻² K ⁻⁴)
2247	785	30	3	5.669 10 ⁻⁸

2.3 Procédure expérimentale

Un banc d'essai a été conçu pour charger et décharger la batterie entre sa tension maximale ($V_{max} = 3,65$ V) correspondant à 100% de son état de charge (SoC), et sa tension minimale ($V_{min} = 2$ V) correspondant à 0% de son état de charge (SoC). Différents taux de charge et de décharge (1/3It, 2/3 It, 1 It, 2 It, 3 It et 4 It) ont été étudiés. Au cours du temps, le courant et la tension aux bornes de la batterie ont été mesurés. Afin d'analyser la distribution thermique de la batterie, plusieurs thermocouples (de type K) ont été placés à la surface de la batterie ainsi qu'une caméra thermique a été également utilisée.

3. Résultats et discussions

Les résultats du modèle ont été comparés avec les mesures expérimentales obtenues au cours des phases de charge et de décharge à différents taux de courant.

D'abord le modèle est validé en comparant les cartographies thermiques données par la simulation, à différents pas de temps, avec celles de la caméra thermique, comme illustré sur la Figure 6 et la Figure 7. Ces figures montrent des distributions quasi-uniformes, excepté au centre de la cellule de type « pouch » où la température maximale est localisée. La différence maximale entre le minimum et le maximum de température à la surface de la batterie, est de l'ordre de 0.7°C en phase de charge et de décharge, hormis en fin de décharge où une valeur de 3°C est observée.

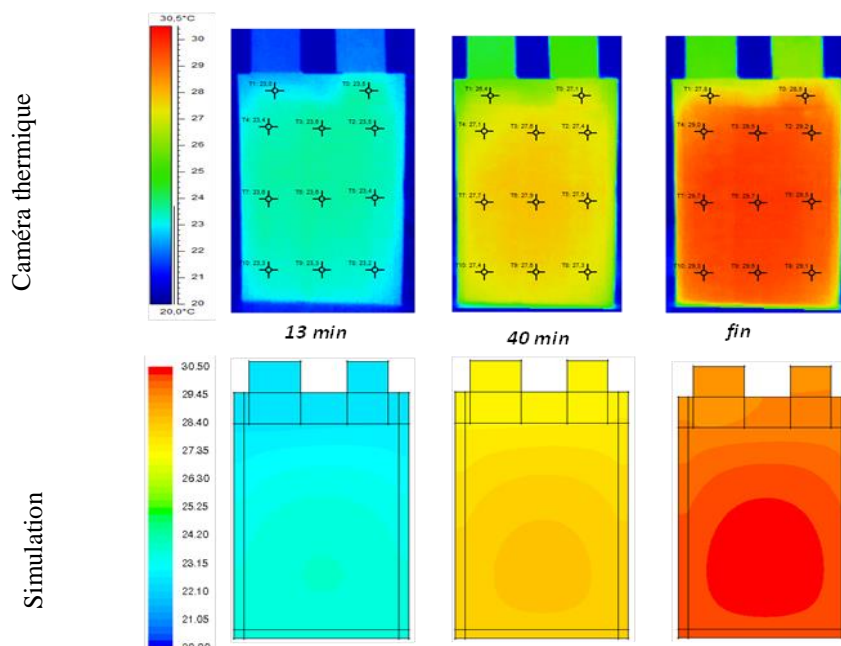


Figure 6: Distribution thermique à la surface de la batterie pour un taux de décharge de 1It

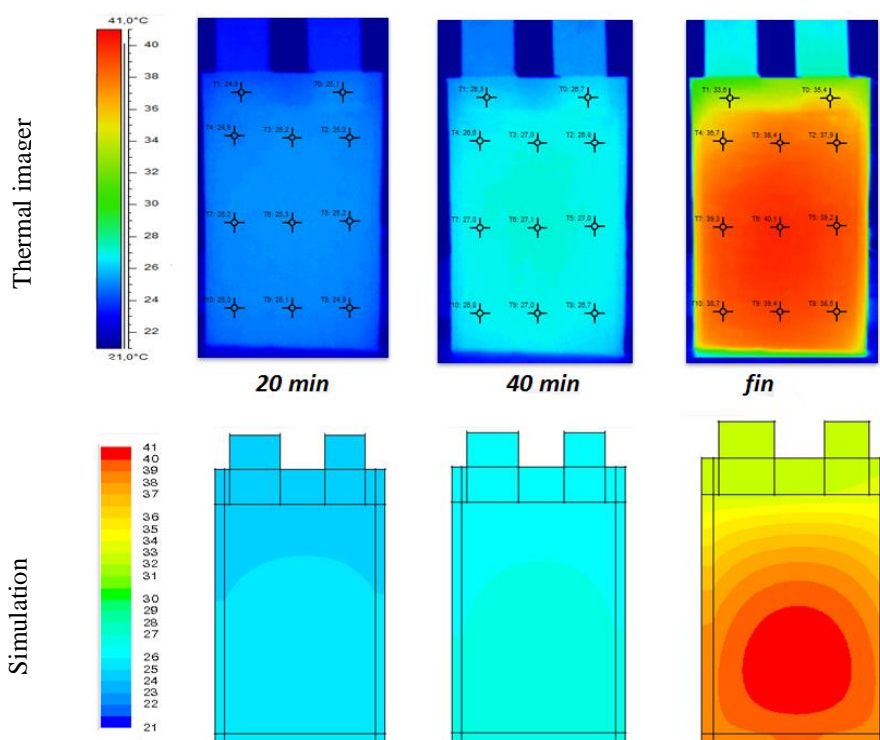


Figure 7 : Distribution thermique à la surface de la batterie pour un taux de charge de 1It

Les températures maximales à différents taux de charge et de décharge, données par le modèle et le thermocouple localisé au centre de la cellule, ont été comparées (cf. Figure 8 et Figure 9). Ces résultats de comparaison montrent une bonne concordance entre le modèle et les mesures. De plus on observe qu'en phase de charge l'échauffement de la batterie est moins important qu'en décharge. La différence maximale entre les résultats du modèle et les mesures

expérimentales est de l'ordre de 2°C. Lorsque le taux de charge ou de décharge augmente, la température à la surface de la batterie augmente également, ceci à cause de la chaleur générée qui augmente.

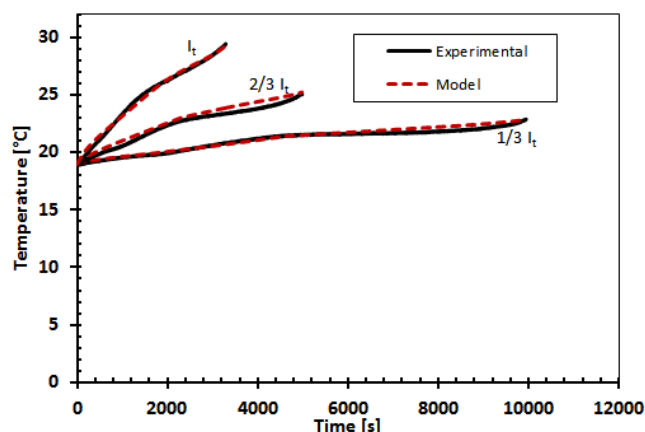


Figure 8 : Comparaison entre les résultats du modèle et les mesures expérimentales pour différents taux de charge

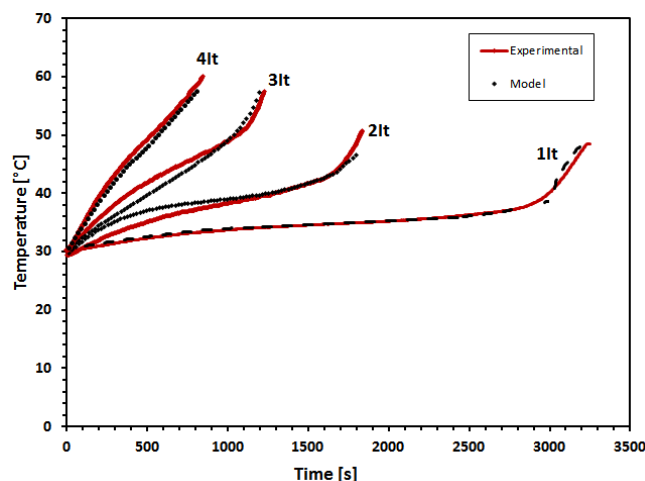


Figure 9 : Comparaison entre les résultats du modèle et les mesures expérimentales pour différents taux de décharge

Lorsque le taux de décharge est important la température à la surface de la batterie augmente également à cause de l'importance de la chaleur produite dans les terminaux et dans le domaine des électrodes. Comme le montre la Figure 10, lors de la décharge à $4I_t$, la température près du terminal positif est plus importante que pour le reste de la batterie, en effet le terminal positif est fait d'aluminium qui possède une résistivité, et donc une production de chaleur plus importante, que dans le cas du cuivre composant le terminal négatif.

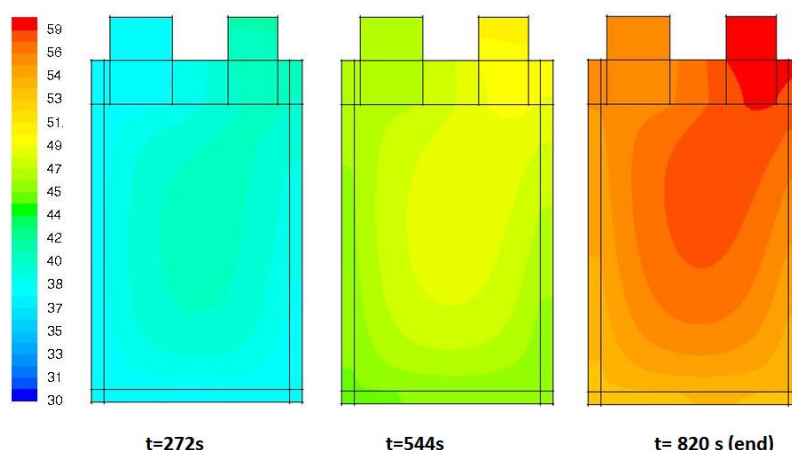


Figure 10 : Distribution thermique à la surface de la batterie pour un taux de charge de $4It$

4. Conclusion

Dans ce travail, un modèle électrothermique 2D a été développé pour une batterie lithium-ion de type « pouch ». Ce modèle est capable de prédire la température de la batterie à différentes conditions de fonctionnement. Les résultats de la simulation sont en accord avec les mesures expérimentales données par les thermocouples et la caméra thermique. L'erreur entre les valeurs mesurées et simulées se situe entre 0 et 2°C. De plus, il a été montré que la cellule de batterie présente une distribution quasi-uniforme pour des taux de charge ou de décharge inférieurs ou égaux à $1It$, avec un maximum de température localisé au centre de la cellule. Tandis que lorsque ce taux de charge ou de décharge est supérieur à $1It$, la température maximale est localisée à côté du terminal positif, à cause de l'importance de la chaleur produite par le terminal positif. Ce modèle pourra être utilisé pour estimer la température d'un pack de batterie et ainsi intégrer des systèmes de management thermique.

Références

- [1] IEA (International Energy Agency) (2008), Energy Technology Perspectives – Scenarios and strategies to 2050. OECD Publishing, Paris, France.
- [2] Van Mierlo, J.; Maggetto, G. Comparison of the environmental damage caused by vehicles with different alternative fuels and drive trains in a Brussels context. *J. Automobile Engineering* 2003, 36, 583-593.
- [3] Van den Bossche, P.; Vergels, F.; Van Mierlo, J.; Matheys, J.; Van Autenboer, W.; SUBAT: an assessment of sustainable battery technology. *J. Power Sources* 2006, 162, 913-919.
- [4] Omar, N.; Verbrugge, B.; Mulder, G.; Van den Bossche, P.; Van Mierlo, J.; Daowd, M.; Dhaens, M.; Pauwels, S. Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. International Conference Vehicle Power and Propulsion Conference. September 1-3, 2010, Lille, France.
- [5] Omar, N.; Van den Bossche, P.; Daowd, M.; Hegazy, O.; Smekens, J.; Coosemans, Th.; Van Mierlo, J. Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-In Hybrid Electric Vehicles -Assessment of Electrical Characteristics. *J. Energies* 2012, 5, 2952-2988.
- [6] Kim Gi-Heon, Pesaran Ahmad, Spotnitz Robert, A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells, *Journal of Power Sources* 170 (2007) 476-489
- [7] J.P. Holman, Heat Transfer, ninth ed., Mc Graw Hill, 2002
- [8] A. Samba, N. Omar, H. Gualous, Y. Firouz, P. Van den Bossche, J. Van Mierlo, and T. I. Boubekour, "Development of an Advanced Two-Dimensional Thermal Model for Large size Lithium-ion Pouch Cells," *Electrochimica Acta*, vol. 117, pp. 246-254, Jan. 2014.