

# Modélisation thermique en vue du dimensionnement d'un pack batterie, avec prise en compte du couplage électro-thermique pour la caractérisation des pertes électriques.

Nicolas DAMAY      Christophe FORGEZ      Guy FRIEDRICH  
Sorbonne universités, Université de technologie de Compiègne  
Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, EA 1006  
Centre de recherche Royallieu, CS 60319, 60203 Compiègne cedex (France)

**RESUME** – Le dimensionnement thermique optimal d'un pack batterie permet de mieux maîtriser son vieillissement mais il est tributaire de la précision des modèles utilisés. Un modèle thermique de batterie est proposé dans cet article et l'accent est porté sur la caractérisation des pertes électriques. Il est montré comment le couplage électro-thermique peut affecter la dynamique électrique et une méthode de caractérisation tenant compte de ce couplage est proposée. La comparaison des simulations avec des mesures expérimentales démontre que l'erreur d'estimation des pertes électriques est fortement réduite à forts régimes et à basse température.

**Mots-clés** – Modélisation thermique, pertes électriques, couplage électro-thermique, dimensionnement de pack batterie.

## 1. INTRODUCTION

L'analyse thermique d'un pack batterie composé de cellules prismatiques a permis d'établir que la modélisation de son élément central est suffisante pour permettre son dimensionnement thermique (Figure 1). En effet, les cellules centrales peuvent être considérées comme étant à la même température, ce qui autorise une extraction des calories uniquement par le haut, par convection vers l'atmosphère interne du pack, ou par le bas par conduction vers le fond du carter.

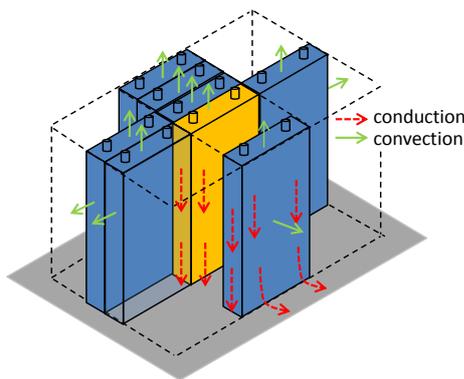


Fig. 1. Schéma d'un pack batterie composé de cellules prismatiques. Mise en évidence des différents échanges avec l'atmosphère interne et avec le fond du pack batterie (en gris), qui sont limités pour la cellule centrale (en jaune).

Un modèle thermique de cellule prismatique LiFePO<sub>4</sub>/graphite a donc été développé et la seconde section de cet article sera consacrée à sa présentation. Il s'agit d'un modèle à constantes localisées permettant d'obtenir les températures-clés d'une cellule tout en ne demandant qu'une

puissance de calcul réduite.

Dans une troisième section, une attention particulière est portée sur la modélisation des sources de chaleur et, plus particulièrement, sur les pertes électriques. Le fort couplage entre les phénomènes électriques et thermiques est mis en avant, puis il est montré comment sa prise en compte permet d'améliorer la précision avec laquelle sont déterminés les paramètres du modèle électrique.

Dans une dernière section, les modèles couplés sont validés expérimentalement avec une précision meilleure que 1 °C.

## 2. MODÈLE THERMIQUE

Le modèle thermique utilisé dans cette étude est représenté sur la Figure 2. Sa construction et la détermination de ses paramètres sont détaillés dans un précédent article [1]. Elles seront rappelées brièvement dans la version finale de la présente communication.

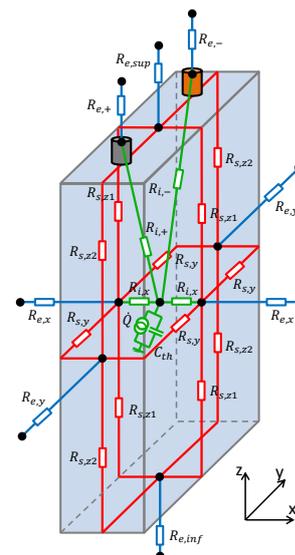


Fig. 2. Modèle thermique à constantes localisées d'une cellule prismatique.

Les sources de chaleur ont été modélisées à l'aide de l'équation (1) [2]. Les pertes électriques sont calculées comme le produit du courant  $I$  et de la surtension  $\Delta U$ , cette dernière étant la différence entre la tension de la cellule  $U_{cell}$  et l'OCV  $U_{oc}$  (Open-Circuit Voltage). La chaleur entropique est le produit du

courant  $I$ , de la température absolue  $T$  (en Kelvin) et de la variation de l'OCV avec la température  $\partial U_{oc}/\partial T$ .

$$\dot{Q} = I (U_{cell} - U_{oc}) + I T \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \quad (1)$$

Le terme  $\partial U_{oc}/\partial T$  est proportionnel à la variation d'entropie, dont la détermination peut être faite par des méthodes potentiométrique [3] ou calorimétrique [4]. La surtension  $\Delta U$  est quant à elle estimée à l'aide d'un modèle électrique présenté dans la section suivante.

### 3. MODÈLE POUR L'ESTIMATION DES PERTES ÉLECTRIQUES

Un circuit électrique équivalent a été utilisé pour représenter le comportement électrique de la batterie (Figure 3). La dynamique du phénomène de diffusion est modélisée par une série de circuit RC parallèles, dont les paramètres sont calculés à l'aide de deux paramètres  $R_{diff}$  et  $\tau_{diff}$ . Il est supposé que la diffusion est de type limitée, ce qui conduit aux relations 2 et 3 [1]. Le modèle électrique contient quatre autres paramètres : l'OCV  $U_{oc}$ , les résistances d'électrolyte  $R_e$  et de transfert de charge  $R_{ct}$  et la capacité de double couche  $C_{dl}$ .

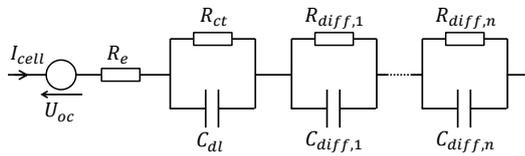


Fig. 3. Modèle électrique utilisé pour l'estimation des pertes électriques, avec approximation de l'impédance de diffusion limitée par une série de circuits RC parallèles.

$$R_{diff,p} = \frac{R_{diff,1}}{(2p-1)^2} \quad \text{avec} \quad R_{diff,1} = \frac{R_{diff}}{\sum_{p=1}^n \frac{1}{(2p-1)^2}} \quad (2)$$

$$\tau_{diff,p} = \frac{\tau_{diff}}{(2p-1)^2} \quad C_{diff,p} = \frac{\tau_{diff}}{R_{diff,1}} \quad (3)$$

Les phénomènes électrochimiques sont *a priori* dépendants du courant, de l'état de charge (SoC : State of Charge) et de la température [5]. Or, ces dépendances ont des effets significatifs durant la détermination des paramètres électriques par des créneaux de courant. En effet, le SoC et la température peuvent varier significativement durant un créneau, ce qui entraîne une variation des paramètres à déterminer (Figure 4).

Le présent article a pour but de détailler la façon dont ce couplage électro-thermique est pris en compte lors de la détermination des paramètres électriques.

### 4. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Les simulations effectuées à l'aide des modèles proposés ont été confrontées à des mesures expérimentales (Figure 5). La cellule a été posée sur un support thermorégulé à 15 °C et ses faces ont été couvertes d'isolants thermiques pour forcer un refroidissement par le fond. Les résultats obtenus en prenant ou en ne prenant pas en compte le couplage électro-thermique durant la caractérisation seront comparés et discutés dans la version complète de cette article.

### 5. CONCLUSIONS

Des modèles thermique et électrique ont été couplés pour simuler les pertes électriques et l'évolution en température d'une cellule. Le couplage entre les comportements électrique et thermique a été mis en avant et une méthode de détermination des

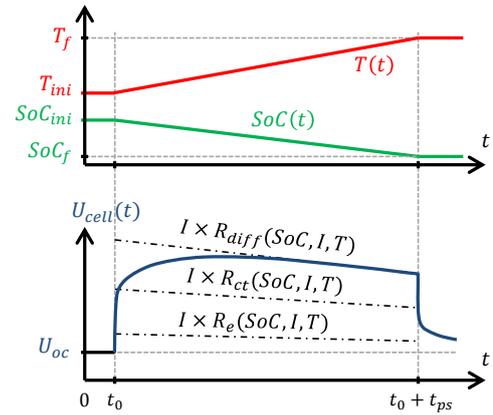


Fig. 4. Réponse en tension schématique d'une cellule à un créneau de courant, avec évolution du SoC et de la température. Mise en avant des variations des résistances durant le créneau.

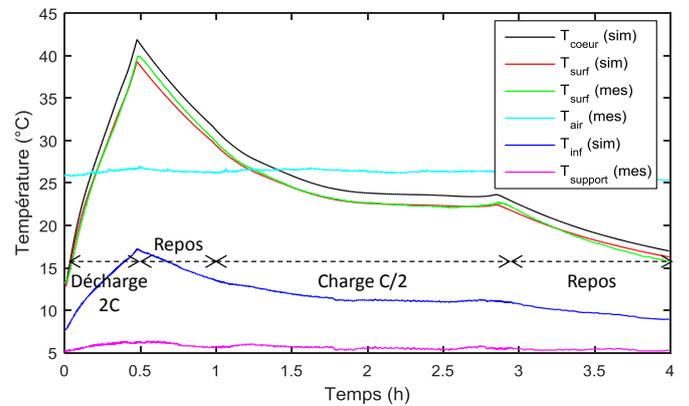


Fig. 5. Simulation et mesure de la réponse en température de la cellule étudiée lors d'un cycle comprenant : une décharge à 2C, 30 min d'OCV, une charge à C/2, 1 h d'OCV.

paramètres électriques en a été déduite. Cette méthode permet d'améliorer significativement la qualité des paramètres obtenus, notamment pour les forts régimes de courant et à basse température.

Les simulations obtenues grâce aux modèles couplés ont été confrontées à des résultats expérimentaux, ce qui a permis d'évaluer la réduction de l'erreur de simulation des pertes électriques. Celles-ci sont réduites de moitié en décharge à 2C à environ 15 °C. Les modèles proposés répondent bien à la problématique du dimensionnement thermique d'un pack batterie.

### 6. RÉFÉRENCES

- [1] Damay, N., Forgez, C., Bichat, M.-P., & Friedrich, G. (2015). Thermal modeling of large prismatic LiFePO<sub>4</sub>/graphite battery . Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation. Journal of Power Sources, 283, 37–45.
- [2] Forgez, C., Vinh Do, D., Friedrich, G., Morcrette, M., & Delacourt, C. (2010). Thermal modeling of a cylindrical LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery. Journal of Power Sources, 195(9), 2961–2968.
- [3] Reynier, Y. F., Yazami, R., & Fultz, B. (2004). Thermodynamics of Lithium Intercalation into Graphites and Disordered Carbons. Journal of The Electrochemical Society, 151(3), A422–A426.
- [4] Schmidt, J. P., Weber, A., & Ivers-Tiffée, E. (2014). A novel and precise measuring method for the entropy of lithium-ion cells :  $\Delta S$  via electrothermal impedance spectroscopy. Electrochimica Acta, 137, 311–319.
- [5] Amiribavandpour, P., Shen, W., Mu, D., & Kapoor, A. (2015). An improved theoretical electrochemical-thermal modelling of lithium-ion battery packs in electric vehicles. Journal of Power Sources, 284, 328–338.