

Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique

Sylvain CAILLIEZ^{1*}, David CHALET¹, Philippe MANNESSIEZ²

¹Ecole Centrale de Nantes, LHEEA Lab. (ECN/CNRS)

1, rue de la Noë – 44321 Nantes Cedex 3

²CRITT M2A

Rue Christophe Colomb – 62700 Bruay-la-buissière

*(auteur correspondant : sylvain.cailliez@ec-nantes.fr)

Résumé - Dans le but de déterminer la capacité thermique et les conductivités thermiques d'une batterie Li-ion, cette étude propose une méthode de caractérisation basée sur la spectroscopie d'impédance thermique. En calibrant un modèle nodal, cette approche non destructive permet ainsi d'estimer les paramètres thermiques de la batterie à 20 °C pour différents états de charge.

Nomenclature

A	amplitude du signal, SI	<i>Symboles grecs</i>	
c_p	capacité thermique spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
f_z	fréquence d'impédance, s^{-1}	ϕ	phase du signal, rad
h	coefficient de transfert, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
I	courant appliqué à la batterie, A	E	signal d'excitation
P	puissance thermique, W	exp	relatif aux données expérimentales
R	résistance thermique, $K.W^{-1}$	nod	relatif au modèle nodal
T	température, K	OC	batterie en circuit ouvert
U	tension de la batterie, V	S	signal de réponse
Z	impédance, SI		

1. Introduction

Les véhicules hybrides et électriques à batterie constituent l'une des alternatives pour la décarbonation des transports. Ils sont alimentés quasi-exclusivement par des batteries lithium-ion (Li-ion) en raison de l'énergie spécifique avantageuse qu'offrent ces dernières. Néanmoins, l'autonomie et la durée de vie de ces batteries sont très dépendantes de la température de fonctionnement. Les cellules voient leur résistance interne augmenter rapidement à faible température, et affichent donc des performances médiocres lors d'une utilisation dans des conditions hivernales [1], [2]. De plus, le froid est un des paramètres déclencheurs du dépôt de lithium sur l'anode [3], [4], un mécanisme de vieillissement très sévère à court terme susceptible de former des dendrites, et donc causer un court-circuit interne. D'autre part, une température élevée accélère la plupart des phénomènes de vieillissement, en particulier la décomposition de l'électrolyte et la croissance de l'interface solide-électrolyte sur l'anode [3], [5].

Outre l'amélioration des performances et de la durée de vie, la gestion thermique des packs batterie est destinée à répondre aux problématiques techniques liées à la charge rapide, l'emballement thermique et la fiabilité. A cette fin, la modélisation représente un outil puissant pour concevoir de nouvelles architectures de gestion thermique. Cependant, les spécifications nécessaires au paramétrage des modèles sont rarement fournies par les fabricants. Cette étude propose donc une méthode de caractérisation thermique appliquée aux batteries Li-ion.

2. Spectroscopie d'impédance thermique

2.1. Principe

Soit un système physique soumis à un signal d'excitation E auquel correspond un signal de réponse S . L'impédance du système est la grandeur définie par le rapport S/E . Dans le cas d'une excitation de forme sinusoïdale, l'impédance contient les informations sur le déphasage et le rapport d'amplitudes entre les signaux d'entrée et de sortie. L'impédance est donc une fonction de la fréquence, et peut ainsi s'exprimer par un nombre complexe selon l'équation (1) ci-dessous (j désigne le nombre complexe défini par $j^2 = -1$). Le spectre d'impédance est la représentation de l'impédance dans le plan complexe après un balayage fréquentiel. Il permet de caractériser le comportement du système selon les phénomènes physiques exploités.

$$Z = \frac{A_S}{A_E} \cdot e^{j \cdot (\phi_S - \phi_E)} \quad (1)$$

La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS - Electrochemical Impedance Spectroscopy) est une méthode de caractérisation des batteries Li-ion très répandue [6]. Elle se base sur le rapport tension/courant dans une plage de fréquence variant du Hz au kHz. Les courants appliqués sont généralement faibles afin de se maintenir à un état de charge (SOC - State Of Charge) quasi-constant et limiter l'échauffement de la batterie pour éviter tout biais. Le spectre d'impédance résultant est l'image de la résistance interne et des phénomènes dynamiques de la batterie étudiée. En outre, il permet de calibrer directement un modèle de comportement électrique de type circuit électrique équivalent, en particulier un modèle comportant des éléments à impédance complexe [7], [8].

Cette méthodologie a été adaptée au domaine thermique sous le nom de spectroscopie d'impédance thermique (TIS - Thermal Impedance Spectroscopy) [9], [10]. Dans ce cas, l'impédance est le rapport entre la température de la batterie et la puissance thermique à laquelle elle est soumise. Les fréquences spécifiques sont de l'ordre du mHz, plus faibles que pour l'EIS car l'inertie thermique est plus importante que celle des phénomènes électrochimiques. Cela présente notamment l'avantage de pouvoir isoler expérimentalement le comportement électrique du comportement thermique. Le principal intérêt du spectre d'impédance thermique est de servir de donnée de calibration d'un modèle thermique, ce qui permet notamment de retrouver la capacité thermique et la conductivité thermique de la batterie [11]–[13]. La TIS peut également être exploitée pour caractériser les changements d'entropie plus rapidement par rapport à la méthode potentiométrique [14].

Un système d'échauffement externe peut être employé pour appliquer la commande en puissance thermique, par exemple avec un câble chauffant enroulé autour de la batterie (configuration particulièrement adaptée à des batteries cylindriques) [11]. Toutefois l'échauffement ne se produit qu'en surface, ce qui peut altérer les résultats avec des batteries de grande taille. Une autre méthode, que nous utiliserons dans cette étude, tire profit de l'échauffement intrinsèque de la batterie en fonctionnement, donné par l'équation (2) (par convention, le courant est positif en décharge, négatif en charge) [12]–[14]. De cette manière, la puissance thermique est plus uniformément répartie au sein de la batterie, bien que certaines caractéristiques électriques soient requises pour paramétrer l'équation (2).

$$P = I \cdot (U_{OC} - U) - I \cdot T \cdot \frac{\partial U_{OC}}{\partial T} \quad (2)$$

2.2. Matériel et montage

Une cellule Li-ion de type pouch extraite d'un véhicule électrique à batterie est utilisée pour ce travail. Sa cathode est de chimie NMC et son anode est en graphite. Sa capacité nominale et sa tension nominale sont respectivement de 60 Ah et 3,63 V. Les dimensions de la cellule sont de 301 x 93 x 14 mm. Le volume contenant les feuillets de la cellule (y compris l'emballage externe) mesure 263 x 93 x 14 mm. La masse de la cellule a été mesurée à 888,8 g. Après avoir estimé la masse des bornes de la cellule, le volume contenant le matériau chimique est calculé à 875,9 g, ce qui donne une densité de 2558 kg.m⁻³.

La cellule est placée dans une enceinte thermostatique Vötsch VT³ 4060 spécifiquement conçue pour les essais électriques de cellules. L'enceinte contient au total quatre voies d'essai, ce qui permet de tester simultanément quatre cellules de façon électriquement indépendante. Chaque voie d'essai se compose d'une étagère instrumentée avec deux bornes de puissances (application du courant), un *sense* (mesure de la tension), quatre sorties thermocouple de type K, et deux sorties 4-20 mA (capteurs supplémentaires). La température d'essai est pilotée par un flux d'air en renouvellement permanent, capable de couvrir une plage allant de - 40 °C à 90 °C.

Le Tableau 1 indique les gammes et précisions de mesure en courant et tension. Dans le cadre de cette étude, il est également important de noter que les montées en courant se font à une vitesse de 1250 A.ms⁻¹, et que l'alternance entre la charge et la décharge s'effectue en 8 ms. Concernant la mesure en température avec les thermocouples de type K, la résolution est de 0,1 °C. A l'intérieur de l'enceinte, la déviation temporelle de température varie de ± 0,1 °C à ± 0,5 °C, tandis que l'homogénéité de température varie ± 0,5 °C à ± 1,5 °C.

	Courant - I	Tension - U
	A	V
Limite minimale	-250	0
Limite maximale	250	8
Précision	$ I \leq 150 \text{ A} : 0,15$	$U \leq 1,2 \text{ V} : 2,4 \cdot 10^{-3}$
	$ I \geq 150 \text{ A} : 0,1\%$	$U \geq 1,2 \text{ V} : 0,2\%$

Tableau 1 : Gamme et précision de mesure électrique des voies d'essai cellule

La cellule est posée sur une des voies de mesure sur laquelle une plaque en mousse est préalablement déposée afin d'éviter tout potentiel court-circuit. Les quatre thermocouples sont numérotés et répartis comme indiqué sur la Figure 1, sur laquelle les thermocouples n°1 et n°3 sont placés sur le dessus, tandis que les thermocouples n°2 et n°4 sont disposés sur la face de dessous. Le but sera de déterminer l'impédance thermique locale de la batterie (au niveau des thermocouples) par mesure de la température. La disposition des thermocouples permet de caractériser l'anisotropie de la cellule, dont les directions sont précisées en partie 3.

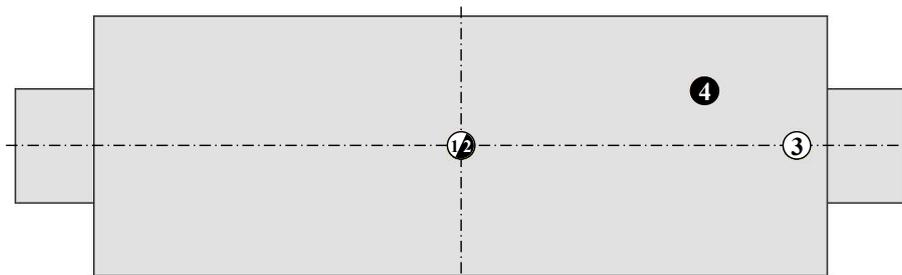


Figure 1 : Placement des thermocouples sur la cellule (blanc : dessus ; noir : dessous)

2.3. Procédure de l'essai

Comme mentionné précédemment, l'échauffement interne de la batterie est exploité pour générer la puissance thermique en entrée d'impédance. Pour cela, un signal en courant modulé est utilisé. Le signal modulant est une sinusoïde de fréquence f_z et d'amplitude 40 A, auquel est ajouté un offset d'amplitude 20 A pour générer un terme constant destiné à compenser les échanges convectifs avec l'air ventilé de l'enceinte (les valeurs de l'amplitude et de l'offset ont été définies progressivement lors d'essais préliminaires, afin d'observer une élévation suffisante de température sans vieillir la batterie). Pour notre application, le signal porteur sert essentiellement à maintenir un état de charge quasi-constant. Il s'agit d'un signal alternatif sans dimension de période 30 s et d'amplitude 1, combinant un signal créneau et un signal triangle (la composante en triangle permet des transitions moins brusques entre les plateaux du créneau). Un profil type du signal est donné sur la Figure 2 pour $f_z = 1$ mHz.

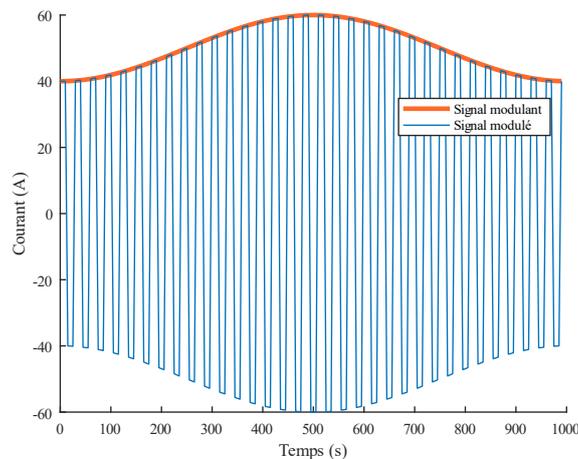


Figure 2 : Profil TIS

L'objectif de l'essai étant de réaliser une spectroscopie d'impédance, le signal décrit ci-dessus est répété pour différentes fréquences d'impédance. Le Tableau 2 indique, dans l'ordre d'exécution, les différentes fréquences d'impédance testées ainsi que le nombre de répétitions du signal constituant l'essai TIS complet. Effectuer le signal plusieurs fois permet d'atteindre le régime forcé en température effectivement associé à la fréquence d'impédance. Le premier signal est davantage répété afin d'atteindre la température moyenne d'équilibre. La totalité des signaux est générée de façon ininterrompue afin de ne pas briser cet équilibre.

Fréquence - f_z	mHz	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Répétitions	/	10	3	3	3	3	3	3	3

Tableau 2 : Plan d'expérience de l'essai TIS

L'essai TIS est réalisé entre 90% et 10% de SOC de la cellule, en déchargeant de 10% à la fin de chaque essai. Après avoir ajusté l'état de charge, une pause de 1h est appliquée afin de s'assurer de l'équilibre électrochimique et thermique de la cellule au début de l'essai TIS. Pendant toute la durée de l'expérience, la température de l'enceinte thermostatique est fixée à 20 °C. Le SOC est calculé à partir de la capacité de la cellule mesurée lors d'une décharge complète à 30 A, à une température d'enceinte de 20°C.

En appliquant ce profil, l'amplitude de température de chaque thermocouple varie d'environ 0,2 °C à 1 °C à f_z décroissante. Compte tenu de la résolution de mesure, les incertitudes liées au calcul de l'impédance sont donc élevées à haute fréquence.

3. Modélisation nodale

Le spectre d'impédance thermique ne fournit pas directement les paramètres thermiques de la batterie. Il est nécessaire de le corrélérer avec un spectre d'impédance obtenu par modélisation. Pour cela, un modèle nodal est adopté. Commodément visualisé sous forme d'un circuit électrique, il consiste à représenter les éléments d'un système par des masses thermiques (les « nœuds ») reliées entre elles par des résistances incarnant les différents échanges thermiques. A chaque nœud sont associées une capacité thermique et une source thermique, respectivement représentées par un condensateur et une source de courant montés en parallèle.

Afin de simplifier l'élaboration du modèle, les bornes de la cellule ne sont pas prises en compte dans le réseau nodal. La cellule se réduit donc à un parallélépipède de dimensions 263 x 93 x 14 mm, qui comprend les matériaux chimiques et l'enveloppe protectrice. Comme le décrit la Figure 3, ce volume est uniformément divisé en 315 éléments de dimensions 17,5 x 13,3 x 4,7 mm dont les centres constituent les nœuds du modèle nodal (soit une subdivision en 15 x 7 x 3 éléments). La cellule étant constituée d'un empilement de feuillets électrochimiques de faible épaisseur (de l'ordre de 10 à 100 μm), elle est supposée macroscopiquement homogène et orthotrope. Il sera également admis que la puissance thermique est générée uniformément au sein de la cellule.

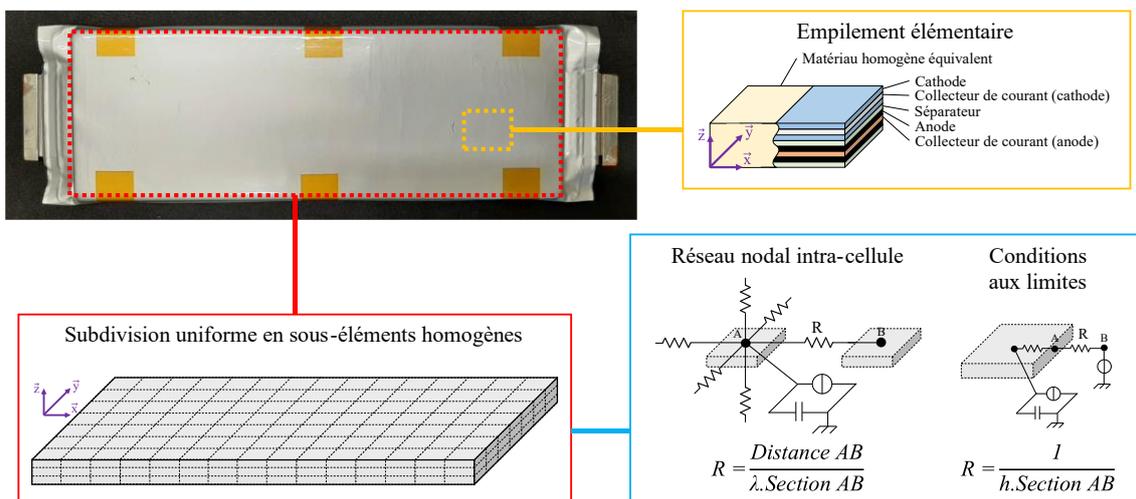


Figure 3 : Modélisation nodale

A l'échelle macroscopique, les transferts thermiques au sein de la cellule sont considérés purement conductifs, ce qui se modélise par une résistance de conduction thermique entre deux nœuds. En outre, la construction d'une cellule de type pouch (empilement de feuillets) réduit son anisotropie à deux directions. Dans ce qui suit, nous nommons donc λ_{\parallel} (conductivité parallèle) la conductivité thermique de la cellule dans le plan (x,y) , et λ_{\perp} (conductivité transverse) la conductivité thermique de la cellule selon l'axe z . Les échanges thermiques entre la cellule et l'air de l'enceinte sont de type conductifs, convectifs et/ou radiatifs. Etant donné que la température de surface de la cellule reste proche de celle de l'enceinte, l'ensemble de ces échanges peuvent être linéarisés en employant une loi de Newton avec un coefficient de transfert thermique équivalent h . Dans le modèle nodal, cela se traduit donc par une unique résistance convective entre un nœud de surface et le nœud « enceinte thermostatique », supposé isotherme. Dans un souci de simplification, les conditions aux limites sont considérées uniformes pour chaque surface de la cellule. Les formules analytiques des résistances de conduction et de convection thermique reprennent l'analogie thermique-électrique. Elles sont précisées sur la Figure 3.

4. Résultats expérimentaux

4.1. Calcul de l'impédance

La puissance thermique générée par la cellule et définie par l'équation (2) contient deux composantes : une partie irréversible équivalente à l'effet Joule, et une partie réversible (en fonction de la charge ou de la décharge) plus faible. En moyennant la puissance thermique sur une période du signal porteur, cette composante réversible peut donc être ignorée, et la puissance est corrélée à la fonction g définie par l'équation (3). Cette fonction servira également à corrélérer la température des thermocouples. Les termes d'indice 1 sont ceux employés dans l'équation (1) pour le calcul de l'impédance thermique.

$$g(t) = A_0 + A_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_Z \cdot t + \phi_1) + A_2 \cdot \cos(4\pi \cdot f_Z \cdot t + \phi_2) \quad (3)$$

4.2. Calibration du modèle nodal

Les paramètres du modèle nodal sont calibrés en corrélant le spectre d'impédance thermique de chaque thermocouple. Etant donné que seule la température de surface de la batterie est mesurée, calibrer simultanément l'ensemble des paramètres engendrerait des incertitudes importantes. Pour cette raison, la calibration s'effectue en deux étapes.

Le modèle nodal est développé sous SIMULINK. Les paramètres sont calibrés selon la méthode des moindres carrés avec la fonction *lsqcurvefit* dans MATLAB. Etant donné que l'impédance à haute fréquence présente généralement de l'instabilité, seuls les points correspondants aux fréquences inférieures ou égales à 0,4 mHz seront pris en compte.

4.2.1. 1^{ère} étape : résistances de transfert thermique entre la batterie et l'enceinte

Dans un premier temps, les conditions aux limites du modèle sont déterminées en calibrant les résistances d'échanges thermique entre la cellule et l'enceinte. En raison de la géométrie de la batterie (symétries, faible épaisseur) ainsi que du montage, quatre résistances sont considérées : R_x , R_y , $R_{z,0}$ et $R_{z,1}$. Les indices x , y et z indiquent respectivement les bords normaux aux axes x , y et z (cf. Figure 3). Les indices 0 et 1 de R_z renvoient respectivement aux faces inférieure et supérieure de la cellule.

Les propriétés thermiques de la batterie sont encore inconnues à ce stade de l'étude. Des valeurs de références sont donc utilisées pour cette étape de calibration : $c_p = 1127 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\lambda_{\parallel} = 20,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{\perp} = 1,29 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ces valeurs ont été préalablement obtenues à 20°C et 50% de SOC par une approche basée sur la corrélation d'un modèle analytique avec des données expérimentales (température de la batterie sous échauffement local adiabatique).

	Echanges thermiques	Résistance thermique - R	Coefficient de transfert - h
	/	K.W^{-1}	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
R_x	Air + Bornes	181	89
R_y	Air	3680	3,3
$R_{z,0}$	Mousse + Air	2744	1,6
$R_{z,1}$	Air	145	30

Tableau 3 : Calibration des conditions limites

Les résistances d'échange thermique sont donc calibrées en utilisant le spectre d'impédance thermique obtenu à 50% de SOC. Les valeurs des résistances, des coefficients de transfert

équivalent ainsi que les milieux d'échanges sont indiqués dans le Tableau 3. $R_{z,1}$ correspond à la succession des transferts thermiques entre la surface inférieure de la cellule et l'air (cellule-mousse-étagère-air), ce qui explique sa nette différence à $R_{z,0}$, directement associée à la ventilation de l'enceinte. La valeur de R_y suggère que le refroidissement par les tranches de la cellule demeure très faible, bien que les échanges soient de même nature que pour $R_{z,0}$. Ce constat est contraire avec R_x , de valeur bien plus faible. Cela s'explique par le puits thermique que constituent les bornes de la batterie, elles-mêmes refroidies par le flux d'air.

Les spectres d'impédance expérimentaux et calibrés sont tracés sur la Figure 4 pour les quatre thermocouples. Les écarts d'impédance entre les thermocouples rendent compte de l'anisotropie de la batterie. La précision de la calibration est définie par : $|Z_{\text{exp}} - Z_{\text{nod}}|/|Z_{\text{exp}}|$. Sur l'ensemble des thermocouples et des fréquences, la précision moyenne est égale à 4,6%.

4.2.2. 2^{ème} étape : paramètres thermiques de la batterie

Il reste ainsi à calibrer les grandeurs c_p , $\lambda_{||}$ et λ_{\perp} en fonction du SOC. La résolution de mesure de la température empêche une mesure fine de celle-ci, ce qui rend la calibration de λ_{\perp} moins pertinente. Considérant de plus que λ_{\perp} soit significativement inférieure à $\lambda_{||}$, il est donc admis que l'évolution de λ_{\perp} soit négligeable par rapport à $\lambda_{||}$. Par conséquent, la grandeur λ_{\perp} est maintenue à sa valeur de référence.

Les valeurs calibrées de c_p et $\lambda_{||}$ sont tracées sur la Figure 5. La précision moyenne de la calibration varie entre 3,2% et 4,7% selon le SOC. Des courbes d'interpolation polynômiale du second ordre sont tracées afin de souligner la tendance apparente. L'interpolation suggère que la capacité et la conductivité thermique atteignent leur maximum autour de 60% de SOC et baissent plus fortement à faible SOC. Lors du calcul de l'interpolation, les points à 30% et 70% de SOC ont été exclus (interruption de la continuité de $\lambda_{||}$ et incohérence physique). Ces valeurs incohérentes, et plus généralement la dispersion des valeurs, sont principalement due aux incertitudes de mesures de la température, qui se répercutent sur le calcul de l'impédance.

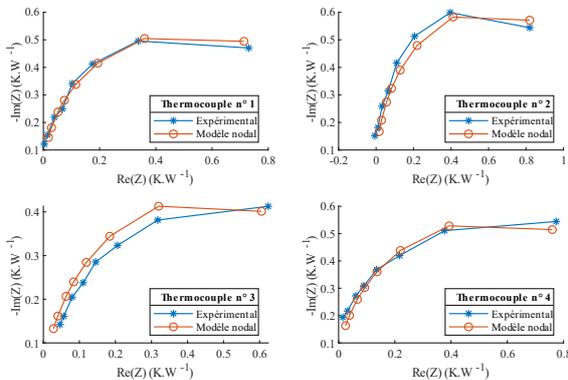


Figure 4 : Spectre d'impédance thermique à 50% de SOC (f_z décroissante de gauche à droite)

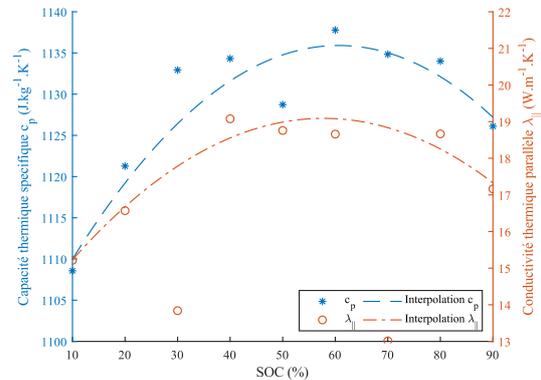


Figure 5 : Capacité thermique et conductivité thermique parallèle de la batterie à 20°C

5. Conclusion

La TIS permet de caractériser thermiquement une batterie Li-ion en fonction du SOC et de la température. La méthode présentée dans cet article peut toutefois être affinée par l'utilisation de sondes de températures plus précises. Elle est néanmoins applicable à tout type de batterie (pouch, prismatique, cylindrique) et ne nécessite que de bancs d'essais batterie standards. Par conséquent, elle propose un gain de temps significatif pour la caractérisation électro-thermique

des batteries. En particulier, l'approche TIS peut être exploitée lors de check-up d'une batterie pour estimer ses paramètres thermiques en cours de vieillissement.

Références

- [1] K. Smith and C. Y. Wang, Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles, *Journal of Power Sources*, 160-1 (2006), 662-673.
- [2] Y. K. Tan, J. C. Mao, and K. J. Tseng, Modelling of battery temperature effect on electrical characteristics of Li-ion battery in hybrid electric vehicle, *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (Singapour, 5-8 dec. 2011), 637-642.
- [3] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler and A. Hammouche, Ageing mechanisms in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 147-1 (2005), 269–281.
- [4] M. Petzl, M. Kasper, and M. A. Danzer, Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study, *Journal of Power Sources*, 275 (2015), 799–807.
- [5] E. Peled and S. Menkin, Review—SEI: Past, Present and Future, *Journal of The Electrochemical Society*, 164-7 (2017), A1703.
- [6] A. Jossen, Fundamentals of battery dynamics, *Journal of Power Sources*, 154-2 (2006), 530-538.
- [7] S. Buller, M. Thele, E. Karden, and R. W. De Doncker, Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive applications, *Journal of Power Sources*, 113-2 (2003), 422-430.
- [8] E. Prada, D. Di Domenico, Y. Creff, J. Bernard, and V. Sauvant-Moynot, A coupled OD electrochemical ageing & electro-thermal Li-ion modeling approach for HEV/PHEV, *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (Chicago, IL, USA, 6-9 sept. 2011), 1-8.
- [9] J. P. Schmidt, D. Manka, D. Klotz, and E. Ivers-Tiffée, Investigation of the thermal properties of a Li-ion pouch-cell by electrothermal impedance spectroscopy, *Journal of Power Sources*, 196-19 (2011), 8140-8146.
- [10] M. Swierczynski, D. I. Stroe, T. Stanciu, and S. K. Kær, Electrothermal impedance spectroscopy as a cost efficient method for determining thermal parameters of lithium ion batteries: Prospects, measurement methods and the state of knowledge, *Journal of Cleaner Production*, 155-1 (2017), 63-71.
- [11] E. Barsoukov, J. H. Jang, and H. Lee, Thermal impedance spectroscopy for Li-ion batteries using heat-pulse response analysis, *Journal of Power Sources*, 109-2 (2002), 313-320.
- [12] M. Fleckenstein, S. Fischer, O. Bohlen, and B. Bäker, Thermal Impedance Spectroscopy - A method for the thermal characterization of high power battery cells, *Journal of Power Sources*, 223 (2013), 259-267.
- [13] P. Keil, K. Rumpf, and A. Jossen, Thermal impedance spectroscopy for Li-ion batteries with an IR temperature sensor system, *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition* (Barcelone, Espagne, 17-20 nov. 2013), 1-11.
- [14] J. P. Schmidt, A. Weber, and E. Ivers-Tiffée, A novel and precise measuring method for the entropy of lithium-ion cells: ΔS via electrothermal impedance spectroscopy, *Electrochimica Acta*, 137 (2017), 311-319.

Remerciements

Cette étude est financée par le CRITT M2A et BPI France dans le cadre du projet OECTE, lauréat du plan France Relance. Les auteurs tiennent à remercier les techniciens d'essai électrique pour leur assistance lors de la phase expérimentale, qui a été entièrement réalisée au sein du CRITT M2A.