

Validation d'une méthode inverse pour estimer les propriétés thermiques d'une cellule de batterie cylindrique

Validation of an Inverse Method for Estimating the Thermal Properties of a Cylindrical Battery Cell

Houda ABOULFALAH^{1,2*}, Natacha DARMET¹, Benjamin REMY¹, Anas EL MAAKOUL², Reda RABEH², Nicolas BLET¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

² Université Internationale de Rabat, Pôle Energie, LERMA, 11100 Sala Al Jadida, Morocco

* Auteur correspondant (houda.aboulfalah@univ-lorraine.fr)

Résumé - Une méthode de caractérisation thermique inverse de type fil chaud est développée pour estimer les propriétés thermiques de cellules lithium-ion cylindriques. Un fil résistif inséré dans la cavité centrale, associé à des mesures de températures interne et externe sont utilisés expérimentalement. Les mesures sont couplées à un modèle quadripolaire unidimensionnel afin d'identifier à la fois la conductivité thermique radiale et la capacité thermique. L'article présente une première étude de validation de la méthode sur des matériaux de référence (polyéthylène haute densité, polychlorure de vinyle et téflon), par comparaison à des mesures par plan chaud et par calorimétrie différentielle à balayage. Les résultats d'identifications paramétriques, réalisées sur des échantillons de deux diamètres différents, mettent en avant la performance de la méthode sur de tels matériaux, sous réserve de quelques précautions expérimentales et d'estimation.

Abstract – An inverse hot-wire-based method has been developed to estimate the thermal properties of cylindrical lithium-ion cells. A resistive wire inserted into the central cavity, combined with internal and external temperature measurements, is used experimentally. The measurements are coupled with a one-dimensional quadrupole model to identify both radial thermal conductivity and thermal capacity. The article presents an initial validation study of the method on reference materials (high-density polyethylene, polyvinyl chloride, and Teflon), compared with measurements using hot plate and differential scanning calorimetry. The results of parametric identifications, carried out on samples of two different diameters, highlight the performance of the method on such materials, subject to a few experimental and estimation precautions.

Nomenclature

Acronymes

DSC Calorimétrie différentielle à balayage
LFP Lithium Fer Phosphate
PEHD Polyéthylène haute densité
PTFE Téflon
PVC Polychlorure de vinyle

Symbole latins

c_p Capacité thermique massique, J/kg/K
 C_w Capacité thermique du fil chaud, J/K
 h Coefficient de transfert thermique convectif, W/m²/K
 I_0, I_1 Fonctions modifiées de Bessel de première espèce (ordres 0 et 1)

K_0, K_1 Fonctions modifiées de Bessel de seconde espèce (ordres 0 et 1)

p Variable de Laplace p

R_c Résistance thermique de contact, K/W

r_e Rayon externe du cylindre, m

r_i Rayon interne du cylindre, m

S Surface latérale du cylindre, m²

t_f Temps final (s)

Symboles grecs

λ Conductivité thermique, W/m/K

ρ Masse volumique, kg/m³

ϕ_w Flux de chaleur imposé, W

1. Introduction

La chaleur produite dans les systèmes de stockage à batteries lithium-ion lors des phases de charge et de décharge peut entraîner une distribution thermique non uniforme au sein des cellules et des modules. Cette non-uniformité favorise le vieillissement prématuré, la dégradation des performances et l'apparition de risques en matière de sécurité. Il est donc indispensable de pouvoir caractériser et prédire avec précision le comportement thermique des batteries lithium-ion soumises à différentes conditions de fonctionnement.

La conception en spirale des cellules Li-ion cylindriques, illustrée à la Figure 1, pose des défis particuliers pour les mesures de conductivité thermique, car elles se caractérisent par un comportement anisotrope (radiale et axiale). Une pré-étude numérique [1] a cependant montré que les phénomènes radiaux pouvaient être modélisés par un modèle homogène avec une conductivité radiale équivalente. Les effets dus à la géométrie spirale (lignes de flux non radiales) sont principalement localisés très proches du centre de la cellule, et peuvent être ainsi représentés par une simple résistance (ou impédance) de contact.



Figure 1 : Cellules de batterie LFP 18650 : vue extérieure et coupe transversale

L'anisotropie de la conductivité thermique a été étudiée par de nombreux auteurs, à l'aide de différents dispositifs expérimentaux et hypothèses de modélisation, avec une grande disparité dans les valeurs estimées. Drake et al. [2] ont déterminé les propriétés thermiques de cellules de batterie lithium-ion fer phosphate (LFP) dans des conditions d'essai adiabatiques (chambre sous vide), en utilisant un flux thermique constant, appliqué sur une face circulaire pour l'estimation de la conductivité axiale, ou sur la surface latérale extérieure pour l'évaluation de la conductivité radiale. Une régression linéaire sur les mesures de températures externes en régime stabilisé permet d'estimer les propriétés à partir de modèles analytiques 1D. Les auteurs évaluent des conductivités thermiques axiales entre 30 et 32 W/m/K, et des conductivités radiales entre 0,15 et 0,20 W/m/K. Ils estiment également des capacités thermiques entre 1600 et 1720 J/kg/K. Ahmed et al. [3] montre que la prise en compte de la variabilité transitoire du flux appliqué peut améliorer l'estimation de la conductivité thermique radiale. Par l'adaptation d'un modèle analytique transitoire, ils estiment une valeur de 0,39 W/m/K pour des cellules LFP. Enfin, Koller et al. [4] ont adopté une caractérisation thermique couche par couche sur une cellule LFP, mesurant individuellement les propriétés thermiques de la cathode et de l'anode, et en estimant celles du séparateur (en raison de son épaisseur extrêmement faible). Cette approche permet de comprendre en détail la contribution de chaque matériau interne, mais nécessite des hypothèses supplémentaires et implique des précisions moindres.

Ces études soulignent la forte dépendance des propriétés thermiques mesurées à l'égard de la procédure expérimentale, des hypothèses de modélisation sous-jacentes et du niveau de résolution spatiale. Cela motive le besoin d'outils fiables et validés expérimentalement, capables de prédire avec précision le comportement thermique au niveau des cellules de batteries Li-ion, pour envisager correctement une conception thermique et un fonctionnement plus sûr des modules de batteries.

2. Dispositif expérimental et modèle paramétrique

Pour évaluer les propriétés thermiques des cellules Li-ion cylindriques, une procédure expérimentale inspirée de la méthode du fil chaud [5] est en cours d'adaptation sur des cellules LFP 18650 et 26650 (correspondant aux dimensions des cellules : $D = 18$ ou 26 mm, $H = 65$ mm). L'approche consiste à retirer les deux extrémités de la cellule afin d'éliminer les effets de bord axiaux et d'accéder à la cavité centrale de l'enroulement, dans laquelle un fil chauffant résistif peut être inséré. La découpe de la cellule nécessitant des précautions de sécurité strictes en raison des risques chimiques et thermiques, le protocole expérimental final est encore en cours de réalisation. Cependant, la méthode de caractérisation est testée de manière préliminaire sur divers matériaux de référence, dont les propriétés thermiques sont proches de celles des cellules de batterie ciblées *a priori* : le polyéthylène haute densité (PEHD), le polychlorure de vinyle (PVC) et le téflon (PTFE). Pour chaque matériau, des échantillons cylindriques de géométrie identique à celle des cellules 18650 et 26650 ont été fabriqués (Figure 2). L'objectif de la caractérisation est alors d'évaluer la conductivité thermique radiale (de façon usuelle pour ce type de méthode), mais également la capacité thermique. En effet, compte tenu des contraintes de sécurité, il ne sera pas envisageable d'effectuer des mesures par calorimétrie « standard » sur les vraies cellules.

2.1. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure 2) consiste à insérer un fil chauffant résistif en nickel-chrome ($D = 0,5$ mm), alimenté par une source de courant continu, placé au centre de l'échantillon cylindrique. Un thermocouple de type N ($D = 0,5$ mm) est introduit en contact direct avec le fil chauffant afin de mesurer l'augmentation de la température interne. Un mince revêtement est néanmoins appliqué entre les deux afin d'empêcher toute interférence électrique sur la mesure de température. Une pâte thermique est enfin ajoutée afin de minimiser la résistance de contact interne entre la source et le matériau. Un second thermocouple identique est fixé sur la surface externe par l'intermédiaire d'un adhésif en aluminium, afin de mesurer une température moyenne circonférentielle. Les deux mesures de température sont placées à mi-hauteur de l'échantillon, afin d'éviter les effets de bords bidimensionnels. Un multimètre est utilisé pour mesurer la tension aux bornes de la portion du fil en contact avec le cylindre, afin d'estimer le flux thermique linéique appliqué à l'échantillon.

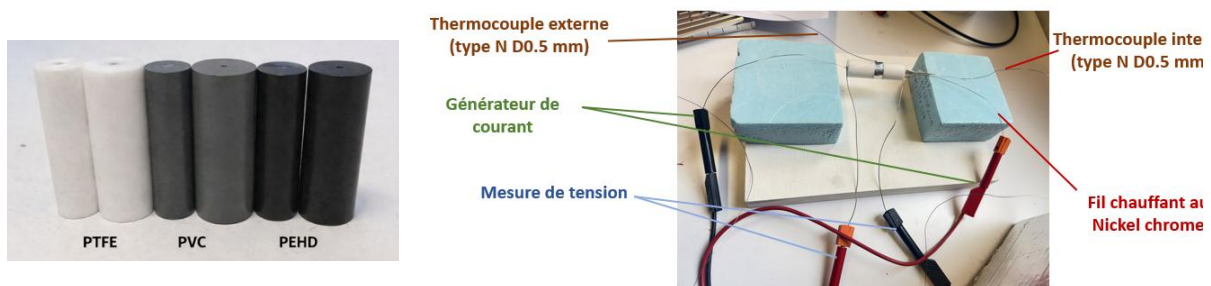


Figure 2 : Échantillons de référence testés (à gauche) et dispositif expérimental par fil chaud avec thermocouples internes et externes (à droite)

Le test en régime transitoire consiste simplement en l'application d'un créneau de flux thermique. Des vérifications préliminaires sont effectuées afin de s'assurer que l'échantillon se trouve bien à l'équilibre thermique (température uniforme) en début de test, afin d'être au plus près de la modélisation inverse utilisée. La Figure 3 permet d'apprécier les réponses des températures interne et externe à cette sollicitation, pour l'échantillon 18650 en PTFE.

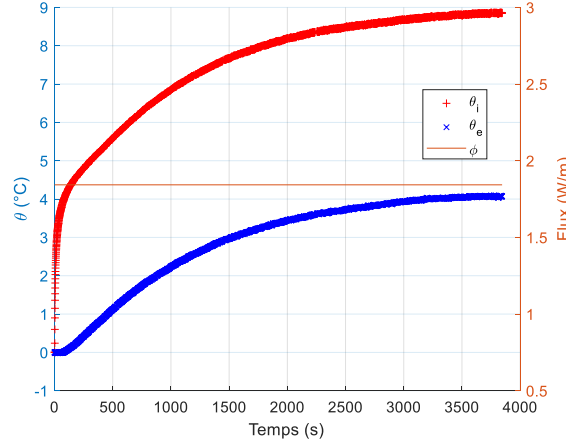


Figure 3 : Thermogramme expérimental pour un essai sur l'échantillon PTFE 18650

2.2. Modélisation quadripolaire pour l'estimation des paramètres

Un modèle quadripolaire radial unidimensionnel en régime dynamique entre la température interne et la température externe est utilisé (Eq. (1)) pour estimer les paramètres thermiques de l'expérience : la capacité thermique C_w du fil chaud (hypothèse de corps mince), la résistance thermique de contact R_c entre le fil et l'échantillon, la capacité thermique massique c_p (ou plus directement le produit ρc_p) et la conductivité thermique radiale λ du matériau, ainsi que le coefficient de transfert thermique convectif externe h .

$$\begin{pmatrix} \bar{\theta}_i \\ \bar{\phi}_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C_w p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1/hS \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\theta}_e \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

avec $\theta(t) = T(t) - T_{init}$ la variation de température par rapport à l'état initial (supposé uniforme), ϕ_w le flux de chauffe, S la surface d'échange externe, et p la variable de Laplace. La notation $\bar{\theta}$ désigne la transformée de Laplace de θ .

Les coefficients du quadripôle thermique du matériau sont donnés par [6] :

$$\begin{aligned} A &= a_2 [I_0(a_1)K_1(a_2) + I_1(a_2)K_0(a_1)] \\ B &= [I_0(a_2)K_0(a_1) - I_0(a_1)K_0(a_2)] / (2\pi\lambda) \\ C &= 2\pi\lambda a_1 a_2 [I_1(a_2)K_1(a_1) - I_1(a_1)K_1(a_2)] \\ D &= a_1 [I_0(a_2)K_1(a_1) + I_1(a_1)K_0(a_2)] \end{aligned} \quad (2)$$

avec $a_1 = r_i \sqrt{\frac{\rho c_p}{\lambda} p}$ et $a_2 = r_e \sqrt{\frac{\rho c_p}{\lambda} p}$

Différentes configurations de modélisation (impédance et/ou transmittance), utilisant la température interne, la température externe ou les deux, ont été étudiées (à partir d'une analyse de sensibilité détaillée) afin d'identifier la stratégie d'estimation la plus sensible et précise à l'estimation des deux propriétés du matériau. Le modèle le plus adapté semble alors être une identification des paramètres par le biais du modèle d'impédance thermique interne $\bar{Z}_i$:

$$\bar{\theta}_i = \bar{Z}_i \bar{\phi}_w \quad (3)$$

Avec un échelon de puissance de chauffe d'amplitude Q_w , la réponse en température interne peut alors s'exprimer (en développant le modèle (1)) par :

$$\bar{\theta}_i = \frac{A + CR_c + (B + DR_c)hS}{C + DhS + (A + CR_c + (B + DR_c)hS)C_wp} \frac{Q_w}{p} \quad (4)$$

La transformée de Laplace inverse est alors évaluée numériquement par algorithme de De Hoog [7]. L'identification paramétrique par méthodes inverses, entre le modèle et les mesures internes de température, est effectuée par minimisation des moindres carrés par régression de Levenberg-Marquardt non-linéaire [8].

2.3. Mesures de référence indépendantes

Pour établir des valeurs de capacités thermiques de référence, des mesures par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) sont effectuées sur chacun des matériaux. Elles sont réalisées à 20°C pour le PVC et le PEHD. Pour le PTFE, la mesure est effectuée à 40°C, pour éviter la zone de transition de phase solide-solide qu'il subit entre 20°C et 35°C [9]. La valeur de la capacité thermique volumique obtenue par DSC a une précision d'environ $\pm 5\%$. En outre, une mesure de masse (précision 0,03%) permet d'évaluer la masse volumique. L'ensemble complet des propriétés mesurées est résumé dans le Tableau 1.

Matériau	T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg/K)	$(\rho c_p)_{\text{ref}}$ (J/m ³ /K)
PEHD	20	968	1810	$1,75 \times 10^6$
PVC	20	1418	928	$1,32 \times 10^6$
PTFE	40	2170	990	$2,15 \times 10^6$

Tableau 1 : Résultats de la calorimétrie différentielle à balayage et de mesures de masse

Des mesures par plan chaud en régime permanent [5] (mesures par résistance thermique) fournissent des valeurs de référence pour la conductivité thermique, aux mêmes températures. Cette méthode permet d'obtenir pour ce type de polymères à faible conductivité thermique une précision de l'ordre de $\pm 5\%$. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Matériau	T (°C)	λ_{ref} (W/m/K)
PEHD	20	0,35
PVC	20	0,21
PTFE	40	0,23

Tableau 2 : Conductivités thermiques mesurées à l'aide de la méthode du plan chaud permanent

3. Résultats de l'estimation de la conductivité thermique radiale et de la capacité thermique par fil chaud

3.1. Résultats de l'estimation paramétrique sur la géométrie 18650

De premiers essais ont été effectués sur la géométrie 18650, de plus faible diamètre, sur chacun des trois matériaux testés. Pour estimer la répétabilité du protocole expérimental, trois tests ont été réalisés pour une configuration donnée. Cela permet d'estimer des valeurs moyennes de paramètres identifiés, et une incertitude type sur la valeur estimée due à la mesure.

Afin d'appréhender la meilleure méthodologie à adopter permettant une estimation la plus précise possible de la conductivité radiale et du produit ρc_p , une première optimisation est

réalisée sur la durée complète de l'expérience, afin d'identifier l'évolution des couplages possibles entre paramètres. Les sensibilités réduites de la température aux paramètres ($\beta \cdot \partial \theta_i / \partial \beta$) sont alors évaluées en fonction du temps pour chacun des 5 paramètres à identifier (Figure 4 – exemple pour le PTFE 18650). On observe que les sensibilités aux paramètres du fil et du contact thermique (C_w et R_c) se situent aux tout premiers instants. Ensuite, la sensibilité à la conductivité thermique λ est forte aux instants courts et décorrélée de celles aux autres paramètres. S'ensuit une sensibilité au produit ρc_p suffisamment significative et décorrélée de celle de la conductivité entre 300 s et 1500 s. Entre temps (à partir de 500 s), la sensibilité au coefficient d'échange externe prend de l'ampleur et semble en outre complètement corrélé à celle de ρc_p à partir de 1500 s. En tendant vers le régime permanent, la corrélation entre R_c , λ et h devient irrémédiable.

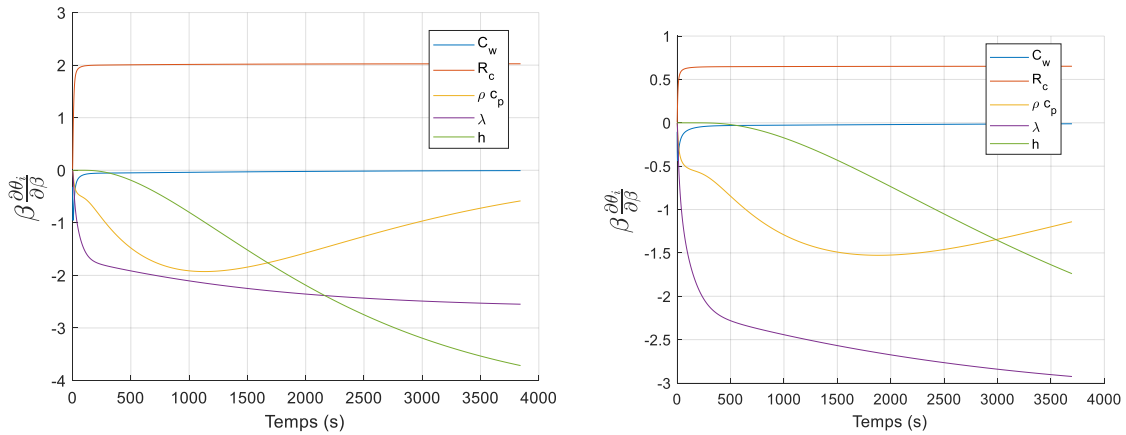


Figure 4 : Sensibilités aux paramètres de la température interne en fonction du temps pour les échantillons en PTFE 18650 (à gauche) et 26650 (à droite)

Par cette première analyse, il semble donc intéressant d'effectuer une étude quantitative de l'impact du temps final de thermogramme sur les valeurs des paramètres obtenues par méthode inverse. Pour cela, pour chaque matériau, le calcul d'optimisation est effectué pour des temps finaux t_f compris entre 300 s et 1800 s. Pour l'ensemble des matériaux, les résultats paraissent les plus probants pour des valeurs de t_f situées entre 500 s et 800 s. Les valeurs estimées de λ et ρc_p , ainsi que l'erreur relative vis-à-vis des mesures de référence par DSC et fil chaud sont donc résumées pour ces valeurs de t_f dans les Tableaux 3 à 5.

D'après ces résultats, on constate que pour les différents temps de fin de thermogrammes t_f choisis astucieusement, la précision de l'estimation sur ρc_p des trois matériaux est meilleure que celle sur la conductivité, qui est déjà relativement bonne. Alors qu'il apparaît une sous-estimation pour les valeurs de conductivités pour le PVC et PTFE, celle du PEHD paraît surestimée, par rapport aux valeurs de référence. Les écarts relatifs restent cependant globalement très faibles, inférieurs à 15%. Pour l'estimation du produit ρc_p , la méthode apparaît légèrement moins bonne pour le PEHD, que pour les deux autres matériaux, même si les écarts relatifs sont minimes (inférieurs à 7%).

Ainsi, pour ce type de matériaux avec la géométrie 18650, la méthode par fil chaud, avec identification d'impédance interne, semble efficace afin d'estimer les deux propriétés thermiques voulues (conductivité radiale et capacité thermique), sous peu qu'on réduit le thermogramme au régime purement transitoire et avant que la sensibilité à la convection externe ne soit trop élevée.

t_f (s)	λ (W/m/K)	$\Delta\lambda/\lambda_{\text{ref}}$	ρc_p (J/m ³ /K)	$\Delta(\rho c_p)/(\rho c_p)_{\text{ref}}$
500	0,380±5%	+8,5%	1,86×10 ⁶ ±11%	+6,3%
600	0,382±4%	+9,1%	1,84×10 ⁶ ±9%	+5,1%
700	0,385±3%	+10,0%	1,81×10 ⁶ ±6%	+3,6%
800	0,389±3%	+11,2%	1,78×10 ⁶ ±6%	+1,9%

Tableau 3 : Valeurs des propriétés thermiques estimées pour le PEHD, pour différents temps finaux de thermogramme, et erreurs relatives aux valeurs de référence (fil chaud et DSC)

t_f (s)	λ (W/m/K)	$\Delta\lambda/\lambda_{\text{ref}}$	ρc_p (J/m ³ /K)	$\Delta(\rho c_p)/(\rho c_p)_{\text{ref}}$
500	0,181±6%	-13,7%	1,36×10 ⁶ ±4%	+2,9%
600	0,181±6%	-13,8%	1,36×10 ⁶ ±3%	+2,9%
700	0,183±5%	-12,8%	1,33×10 ⁶ ±2%	+1,1%
800	0,185±6%	-12,1%	1,32×10 ⁶ ±3%	+0,0%

Tableau 4 : Valeurs des propriétés thermiques estimées pour le PVC, pour différents temps finaux de thermogramme, et erreurs relatives aux valeurs de référence (fil chaud et DSC)

t_f (s)	λ (W/m/K)	$\Delta\lambda/\lambda_{\text{ref}}$	ρc_p (J/m ³ /K)	$\Delta(\rho c_p)/(\rho c_p)_{\text{ref}}$
500	0,206±2%	-10,5%	2,18×10 ⁶ ±13%	+1,3%
600	0,206±1%	-10,6%	2,18×10 ⁶ ±10%	+1,4%
700	0,207±1%	-10,1%	2,14×10 ⁶ ±9%	-0,4%
800	0,208±3%	-9,7%	2,11×10 ⁶ ±8%	-1,8%

Tableau 5 : Valeurs des propriétés thermiques estimées pour le PTFE, pour différents temps finaux de thermogramme, et erreurs relatives aux valeurs de référence (fil chaud et DSC)

3.2. Résultats de l'estimation paramétrique sur la géométrie 26650

Les mêmes essais et approches ont été effectués sur les échantillons 26650. Les sensibilités aux paramètres (Figure 4) évoluent de manière similaire à celles pour la géométrie 18650, avec des variations retardées pour λ , ρc_p et h , du fait du diamètre plus grand. En outre, on observe une sensibilité plus forte à la conductivité vis-à-vis de celle de ρc_p , par rapport au cas de plus petit diamètre, où les sensibilités étaient globalement du même ordre de grandeur.

Ces différences ont un impact direct sur la précision de l'estimation de ces deux propriétés. En adaptant les temps finaux t_f (entre 800 s et 1100 s) pour l'identification paramétrique, l'écart relatif par rapport aux valeurs de référence pour le PEHD est de l'ordre de 17% sur λ et de 12% sur ρc_p ; pour le PVC, de 19% sur λ et de 23% sur ρc_p , et pour le PTFE de 4% sur λ et de 17% sur ρc_p . Ainsi, l'ensemble des estimations apparaissent moins performantes (excepté sur la conductivité thermique du PTFE) par rapport aux essais sur les échantillons de plus petits diamètres.

La méthode proposée semble donc être intéressante dans le cas où les sensibilités aux propriétés du matériau (conductivité et capacité thermique) sont du même ordre de grandeur. D'autres essais sur des échantillons en polystyrène (conductivité d'un ordre de grandeur plus faible – 0,03 W/m/K - et donc sensibilité bien plus grande à λ) ont pu confirmer cette observation.

4. Conclusion

La méthode expérimentale par fil chaud, couplée au modèle quadripolaire radial unidimensionnel d'impédance thermique interne, permet d'identifier de manière fiable la conductivité thermique et la capacité thermique volumique des matériaux étudiés, notamment pour la géométrie de plus petit diamètre (18650). La méthode reste cependant limitée au cas où les sensibilités des deux propriétés sont du même ordre de grandeur. Ainsi, une dégradation de l'estimation a été constatée pour les échantillons de plus grand diamètre (26650), même si celle-ci reste correcte (avec des écarts relatifs inférieurs à 25%).

Comme relaté dans cet article, d'autres modèles ont été testés pour améliorer l'identification paramétrique, notamment en se servant de la mesure externe (via impédance ou transmittance), sans réel impact. Le fait est que les sensibilités de la température de paroi externe à λ et ρc_p sont directement corrélées et que celle au coefficient d'échange h est plus rapidement impactante.

Les prochains travaux seront les essais sur cellules réelles lithium-ion, en mode passif (par sécurité lors de l'ouverture), et les estimations associées des propriétés thermiques équivalentes (conductivité radiale et capacité thermique), via la méthode présentée dans cet article. Cette méthodologie sera confrontée à d'autres approches basées sur des cycles de charge et décharge (en mode actif), nécessitant toutefois de bien modéliser la chaleur interne générée par la cellule. En outre, une méthodologie spécifique sera développée pour l'estimation de la conductivité axiale des cellules.

Références

- [1] H. Aboulfalah, B. Remy, N.Blet, A. El Maakoul, R. Rabeh, Etude de la conduction thermique spirale dans les cellules lithium-ion cylindriques, *Work in Progress - Congrès de la SFT* (Chambéry 2025)
- [2] S.J. Drake, D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinzl, et A. Jain, Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells, *J. Power Sources*, 252 (2014) 298-304
- [3] M.B. Ahmed, S. Shaik, et A. Jain, Measurement of radial thermal conductivity of a cylinder using a time-varying heat flux method, *Int. J. Therm. Sci.*, 129 (2018) 301-308.
- [4] M. Koller, J. Unterkofler, G. Glanz, D. Lager, A. Bergmann, et H. Popp, Radial Thermal Conductivity Measurements of Cylindrical Lithium-Ion Batteries—An Uncertainty Study of the Pipe Method, *Batteries*, 8-2 (2022) 16
- [5] Y. Jannot and A. Degiovanni, *Thermal properties measurement of materials*, ISTE and John Wiley & Sons (2018).
- [6] D. Maillet, S. André, J. Batsale, A. Degiovanni and C. Moyne, *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*, John Wiley & Sons Ltd (2000).
- [7] F.R. De Hoog, J.H.Knight, et A.N.Stokes, An improved method for numerical inversion of Laplace transforms, *SIAM J. Sc. Stat. Comp.*, 3-3 (1982) 357-366.
- [8] N.R. Draper et H. Smith, *Applied Regression Analysis*, John Wiley & Sons (1981)
- [9] J. Blumm, A. Lindemann, M. Meyer and C. Strasser, Characterization of PTFE Using Advanced Thermal Analysis Techniques, *Int. J. of Thermophysics*, 31 (2010) 1919–1927.

Remerciements

Ce travail bénéficie du soutien financier de l'appel à projets collaboratifs entre l'Université de Lorraine (France) et l'Université Internationale de Rabat (Maroc).