

Modélisation macroscopique du comportement thermique d'un module de batterie de véhicules électriques.

Mohamed SOKORE^{1*}, Natacha DARMET¹, Benjamin REMY¹, Nicolas BLET¹

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

* (auteur correspondant : mohamed.sokore@univ-lorraine.fr)

Résumé – L'objectif de cette étude est d'analyser, à travers une approche numérique de modélisation macroscopique, le comportement thermique dynamique en régimes normal et dégradé d'un module de batterie électrique. Pour prédire ce comportement, et dans un souci d'inter-validation des résultats, un modèle 1D nodal (Matlab) et un modèle 2D par éléments finis (Comsol MultiPhysics), utilisant des cas de génération de chaleur dissipée lors d'une charge rapide, ont été développés. Des études sur les différents paramètres du module (géométrie, propriétés thermiques des matériaux, conditions aux limites) sont présentées pour analyser les phénomènes prépondérants. Le modèle 1D offre un outil rapide de prédimensionnement tandis que le modèle 2D permet de prendre en compte des effets thermiques dissymétriques.

Mots-clés : Modules de batterie, Modélisation nodale, Modélisation éléments finis, Analyse thermique.

Nomenclature

A	section, m ²
C	capacité thermique totale, J/K
c_p	capacité thermique massique, J/kg/K
e	épaisseur de la couche, m
H	hauteur de la couche, m
h_{conv}	coefficient d'échange convectif, W/m ² /K
q	densité volumique de chaleur, W/m ³
Q	source de chaleur interne, W
R_{th}	résistance thermique, K/W
S	surface d'échange, m ²
T	température, K
T_R	température de refroidissement, K

Symboles grecs

ρ	masse volumique, kg/m ³
λ	conductivité thermique, W/m/K

Indices et exposants

i	couche considérée
j	couche adjacente
ax	axial ou suivant l'épaisseur de la couche
$long$	suivant la hauteur de la couche
$conv$	convection
$cond$	conduction

1. Introduction

Les batteries lithium-ion sont largement utilisées dans les véhicules électriques et systèmes de stockage d'énergie en raison de leur compatibilité environnementale, de leur haute densité de stockage énergétique, de leur excellente performance de cycle et de l'absence d'effet de mémoire [1]. Malgré ces avantages, la gestion thermique des batteries lithium-ion peut être encore améliorée lors des conditions extrêmes et abusives (températures élevées ou basses, chocs, vibrations, ou défauts de fabrication), qui impliquent la dégradation des composants actifs de la batterie et par la suite l'emballement thermique [2–4]. Actuellement, un des défis majeurs dans la production de batteries haute performance est le développement de stratégies efficaces permettant d'éviter ou de limiter la propagation de l'emballement thermique afin de prolonger leur durée de vie et garantir leur sécurité.

L'ambition du projet MATICS (MATériaux Innovants pour Cellules de batterie Sécurisée), réunissant un consortium d'acteurs complémentaires français (Saint-Gobain Recherche, Enersens, Verkor, Lemta) est ainsi de concevoir de nouveaux designs de modules de batteries électriques à cellules lithium-ion de type de format pouch intégrant des matériaux innovants inter-cellules permettant de freiner, voire d'éviter, la propagation d'un éventuel emballement thermique au sein du module.

Les travaux présentés dans ce papier concernent les premiers développements d'un modèle thermique macroscopique du module développé dans le cadre du projet MATICS, afin d'appréhender le comportement thermique en régime dynamique du système. Ainsi, une comparaison entre un modèle 1D nodal et une modélisation plus fine 2D par éléments finis est présentée et diverses études paramétriques (matériau, refroidissement, ...) sont analysées.

2. Modèles numériques

2.1. Géométrie de travail, conditions limites et hypothèses

La Figure 1 présente la géométrie simplifiée 2D étudiée du module de batteries, suivant l'épaisseur des éléments. Elle intègre les parois externes, englobant les cellules lithium-ion de type pouch, séparées par des matériaux inter-cellules (pads) permettant une tenue mécanique globale lors du fonctionnement dynamique du module et de constituer des barrières thermiques entre cellules.

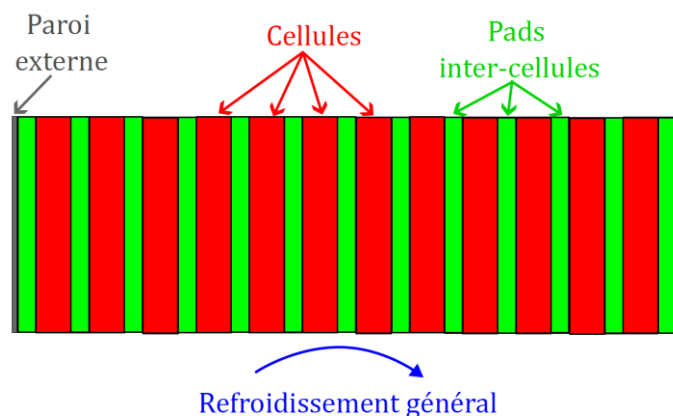


Figure 1 : Représentation schématique d'une géométrie simplifiée d'un module de batterie

Les propriétés des matériaux des parois externes et des pads sont isotropes, tandis que la conception interne spécifique d'une cellule implique une conductivité anisotrope. Alors que des propriétés thermiques constantes des cellules sont fournies par Verkor, des mesures spécifiques ont été réalisées pour les matériaux inter-cellules par Saint-Gobain Recherche et par le Lemta. Au Lemta, des mesures par plan chaud permettent d'évaluer l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température, alors que des mesures par calorimétrie différentielle donnent la thermodépendance de la capacité thermique [5]. Par souci de confidentialité, les dimensions et propriétés thermo-physiques réelles des composants ne sont pas communiquées. Seules des résistances thermiques et capacités thermiques équivalentes sont fournies dans le Tableau 1.

Initialement, l'ensemble du module est considéré à une température de source froide de 25 °C. La mise en charge du module est représentée par une densité volumique uniforme dans chaque cellule. Le refroidissement est modélisé par un coefficient de convection sur toute l'épaisseur en partie basse de module. Toutes les autres parois sont supposées adiabatiques.

L'hypothèse de contact parfait (résistance de contact négligée) est supposée entre les différentes couches constituant le module (compression lors de la mise en pack).

		Capacité thermique linéique	Résistance thermique
		$\frac{\rho \cdot c_p \cdot e}{J.m^2/K}$	$\frac{e/\lambda}{K.m^2/W}$
Cellule		$3,38.10^4$	axiale : $1,4.10^{-2}$ longitudinale : $3,2.10^{-3}$
Pad	Mat 1	$1,24.10^3$	$1,5.10^{-1}$
	Mat 2	$1,04.10^3$	$3,3.10^{-1}$
	Tricouche	$1,16.10^3$	$2,2.10^{-1}$
Paroi externe		$2,61.10^3$	$1,6.10^{-5}$

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques constantes des cellules, pads et parois externes.

2.2. Equations et méthodes de résolution

L'équation de la chaleur (1) est résolue pour prédire la distribution spatio-temporelle de la température au sein du module. Cette EDP prend en compte l'ensemble des termes sources et le transfert thermique par conduction à travers les composants du module.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q \quad (1)$$

où ρ et c_p sont, respectivement, la masse volumique et la capacité thermique massique, T est la température, λ est la conductivité thermique, et q est la somme des termes sources volumiques.

Dans le cas des cellules de batterie, q dépend de manière générale de la température et de l'état de charge et se divise en deux sources de chaleur principales [6, 7] : la chaleur entropique de la réaction électrochimique et les pertes électriques dues à la résistance interne des composants de la cellule. Pour résoudre l'équation (1), deux méthodes de résolution sont utilisées : la méthode nodale macroscopique et la méthode des éléments finis.

2.2.1. Méthode nodale 1D (circuit électrique équivalent)

La méthode nodale repose sur l'analogie formelle entre les phénomènes thermiques et électriques. Dans cette méthode, chaque couche (parois externes, cellules et pads) est représentée par une seule température (supposée uniforme dans le volume correspondant). Les échanges de chaleur en régime dynamique peuvent alors être facilement représentés par un schéma électrique équivalent (Figure 2) par résistances et capacités thermiques, avec sources de puissances pour les charges thermiques générées par les cellules.

Dès lors, la modélisation s'appuie simplement sur un système d'équations différentielles, par bilan sur chaque couche de température T_i , de la forme :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{th,ij}} + Q_i \quad (2)$$

avec $C_i = \rho_i c_{p,i} V_i$ capacité thermique totale, $R_{th,ij}$ résistances thermiques, $Q_i = q_i V_i$ source de chaleur interne. Les indices j représentent les couches adjacentes à la couche i .

Une résistance thermique de conduction axiale prend en compte les demi-épaisseurs des deux couches adjacentes :

$$R_{th,cond-ax,ij} = \frac{e_i/2}{\lambda_{ax,i}A} + \frac{e_j/2}{\lambda_{ax,j}A} \quad (3)$$

avec A la section (supposée identique pour chaque couche) du système. e_i et e_j correspondent aux épaisseurs des deux couches adjacentes.

Les résistances thermiques longitudinales incluent à la fois la résistance de convection et la conduction sur la demi hauteur :

$$R_{th,conv} = \frac{H_i/2}{\lambda_{long,i}S_i} + \frac{1}{h_{conv}S_i} \quad (4)$$

avec H_i la hauteur de la couche considérée et S_i la surface d'échange.

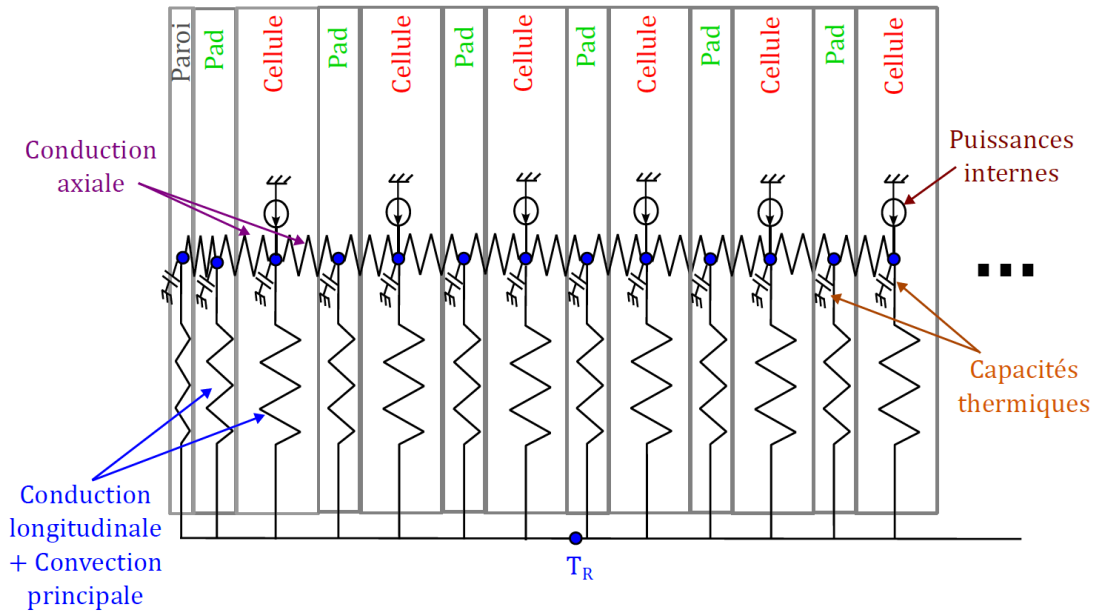


Figure 2 : Schéma électrique équivalent de la modélisation 1D/1,5D du module de batterie

2.2.2. Méthode des éléments finis 2D

Pour comparaison, l'équation locale (1) est résolue en 2D, sur la géométrie de la Figure 1, sous le logiciel Comsol MultiPhysics par éléments finis, avec maillage spatial et gestion de la discrétisation temporelle adaptés à la bonne convergence des simulations.

3. Résultats et discussions

3.1. Comparaison des modèles numériques en régimes normal et dégradé

Une première simulation en régime normal avec une dynamique de charge rapide identique dans chaque cellule a été réalisée afin de comparer le niveau et l'évolution des températures au sein du module, issus des deux modélisations. Le matériau utilisé pour les pads inter-cellules correspond ici au Mat1 du Tableau 1.

De manière qualitative (Figure 3), les résultats sous Comsol montrent une uniformisation suivant l'épaisseur assez rapide du champ de température au sein du module. Un plus fort gradient thermique suivant la hauteur est par contre simulé en 2D, du fait du refroidissement unilatéral en partie basse. Un refroidissement plus prononcé au niveau des parois externes est

également simulé du fait d'une plus grande conductivité thermique de la paroi, et un pad adjacent isolant cette paroi du reste du module.

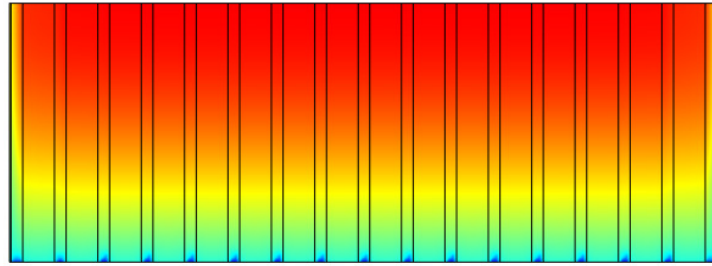


Figure 3 : Vue du champ thermique 2D à un instant donné.

La Figure 4.a représente alors l'évolution temporelle des températures maximale, minimale et moyenne au sein d'une cellule, calculées par le modèle 2D, et celle de la température correspondant pour le modèle nodal 1D. On peut apprécier plus quantitativement les gradients thermiques suivant la hauteur d'une cellule. On constate en outre, du fait des hypothèses fortes de la méthode nodale, que cette représentation 1D permet de représenter a priori convenablement l'évolution temporelle de la température maximale d'une cellule.

De ce constat, on compare sur la Figure 4.b les profils de température suivant l'épaisseur du module, pour différents temps, pour le modèle 1D et pour les températures maximales calculées par le modèle 2D, situées en partie haute de module. Les profils correspondent globalement bien entre les deux modèles, même si le modèle 1D surestime les gradients thermiques entre les cellules et les pads aux premiers instants de la charge.

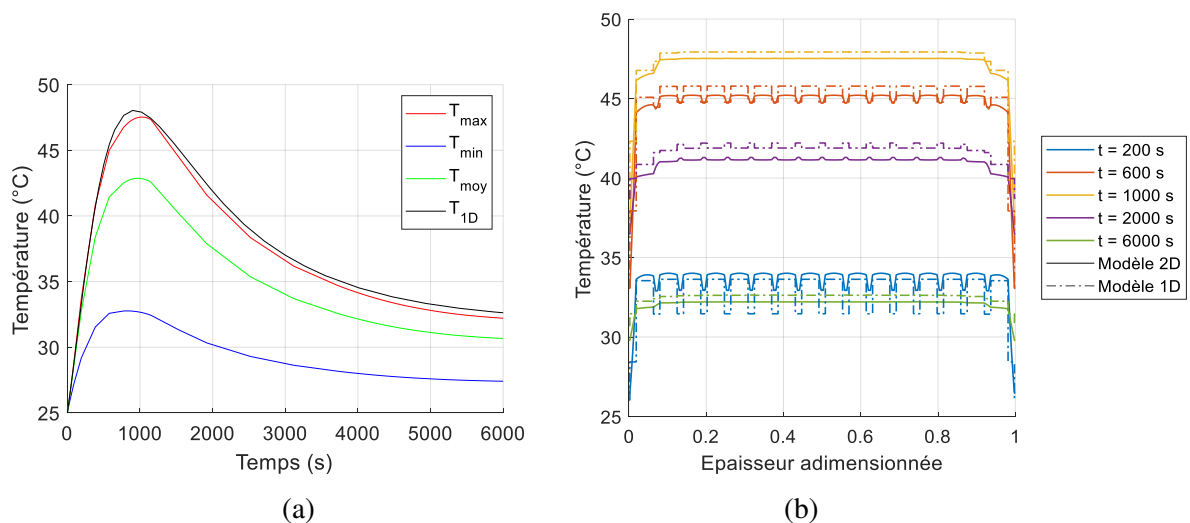


Figure 4 : Comparaison des modèles 1D et 2D dans le cas d'un régime dynamique normal :
(a) Evolution temporelle des températures. (b) Profils axiaux des températures pour différents temps

Pour commencer à apprécier le comportement potentiel du module lors d'un régime thermique dégradé d'une cellule, une seconde simulation est effectuée en considérant la même dynamique de charge rapide pour les cellules, sauf une subissant une charge doublée. Les mêmes types de graphes que le cas précédemment sont présentées sur la Figure 5. Là encore, les résultats du modèle 1D correspondent très bien aux températures maximales calculées sur l'ensemble du module par le modèle 2D. D'après le profil axial, on constate que les pads isolants jouent très bien leur rôle dans ce cas. Alors que les températures de la cellule sursollicitée (« hot ») augmente grandement par rapport au cas précédent, la plupart des autres

cellules gardent leur niveau de températures du régime normal. Seules les cellules adjacentes (« adj ») voient leurs températures croître mais de façon minime.

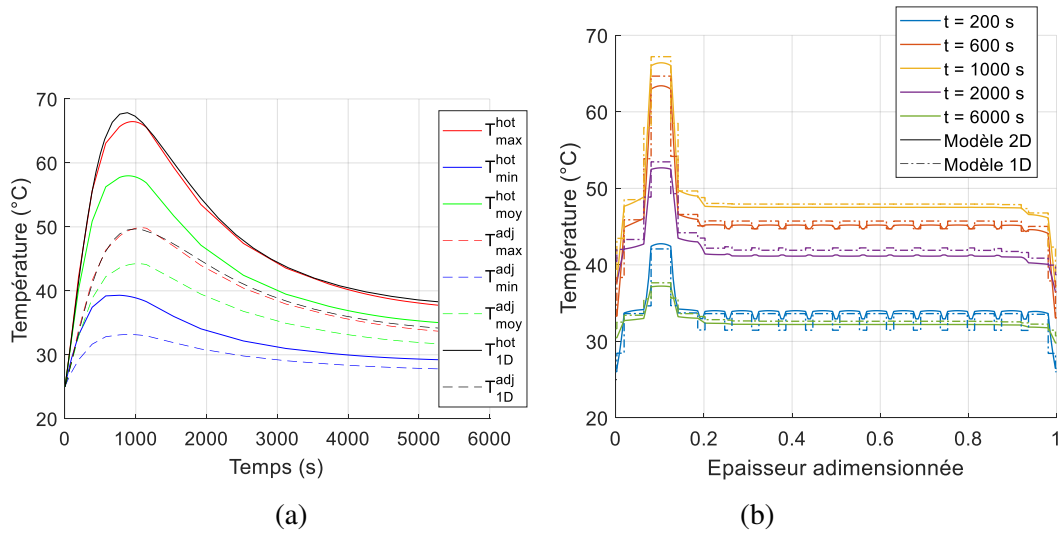


Figure 5 : Comparaison des modèles 1D et 2D dans le cas d'un régime dynamique dégradé :
(a) Evolution temporelle des températures. (b) Profils axiaux des températures pour différents temps

Il est à noter qu'à partir des mesures effectuées par plan chaud et calorimétrie, la thermodépendance des conductivités et capacités thermiques des matériaux inter-cellules a pu être implémentée dans ces modèles. Compte tenu de la faible variation de ces propriétés sur la plage de températures des simulations ($\Delta\lambda/\lambda < 12\%$ et $\Delta c_p/c_p < 15\%$), son impact reste très minime sur les champs de températures calculés.

3.2. Effets du matériau inter-cellules

Dans le cadre du projet MATICS, diverses solutions sont développées pour offrir le meilleur compromis pour les pads inter-cellules en termes d'efficacité de barrière thermique et de tenue mécanique. On se propose donc ici de comparer les résultats numériques 2D pour trois configurations de pads, à épaisseur totale identique : Mat1 seul, Mat2 seul et un assemblage tricouche Mat1-Mat2-Mat1.

Dans le cas du régime normal, le champ spatio-temporel de températures est peu impacté par le changement de matériau. Un léger effet lors du mode dégradé est néanmoins visible sur la Figure 6. On observe en effet que moins le matériau est diffusif, plus les températures de la cellule en sursollicitation augmentent : de 2°C sur les températures maximales, de 1,2°C sur les températures minimales, pour 1,5°C sur les températures moyennes. A l'inverse, les cellules adjacentes voient leurs températures maximales plus faibles, de l'ordre de 1°C. Ainsi, le matériau joue d'autant plus son travail de barrière thermique en « confinant » thermiquement la cellule en surchauffe. L'impact sur les températures minimales de cellule est moins prononcé, car celles-ci sont directement liées à la performance du système de refroidissement.

3.3. Refroidissement du module

Pour terminer, une dernière étude sur l'efficacité du système de refroidissement est présentée. Les Figures 7 et 8 comparent ainsi l'effet de l'ajout d'une résistance thermique de contact entre le refroidissement et le bas du module (équivalent à une diminution du coefficient d'échange h_{conv}), dans le cas de simulations avec l'utilisation du matériau Mat1. L'impact de cette modification de refroidissement est immédiat sur le niveau de températures des cellules.

Pour des résistances thermiques faibles ($R_c = 10^{-3} \text{ K.m}^2/\text{W}$), le pic de température maximale varie par exemple de $47,5^\circ\text{C}$ à 49°C en régime normal, et de $66,5^\circ\text{C}$ à $68,7^\circ\text{C}$ en régime dégradé. Un effet sur le gradient thermique global, entre le haut et le bas de la cellule, est également visible, avec une diminution de la différence $T_{\max} - T_{\min}$ de $0,3^\circ\text{C}$ (en moyenne temporelle sur la charge en régime normal), du fait de températures minimales plus élevées. Une trop grande résistance de contact potentielle ($R_c = 10^{-2} \text{ K.m}^2/\text{W}$) change considérablement la réponse inertielle du système, par le biais d'une augmentation du temps caractéristique. L'effet des matériaux inter-cellules reste cependant efficace en régime dégradé (Figure 8) malgré la modification de niveau de températures : la cellule adjacente subit ainsi des valeurs de températures bien moindres que la cellule sursollicitée, quelle que soit la valeur de R_c .

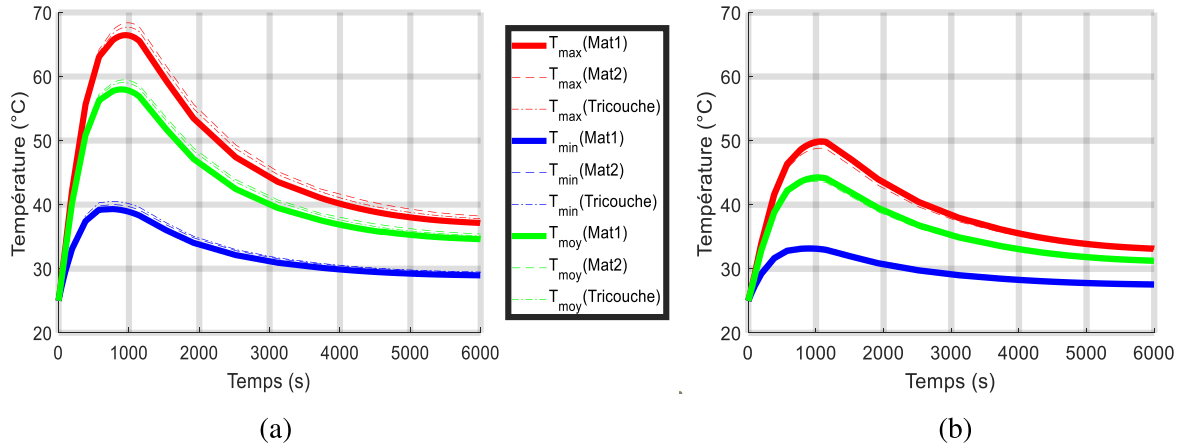


Figure 6 : Comparaison des évolutions temporelles des températures des cellules en régime dégradé pour les trois matériaux testés : (a) Cellule sursollicitée (b) Cellule adjacente

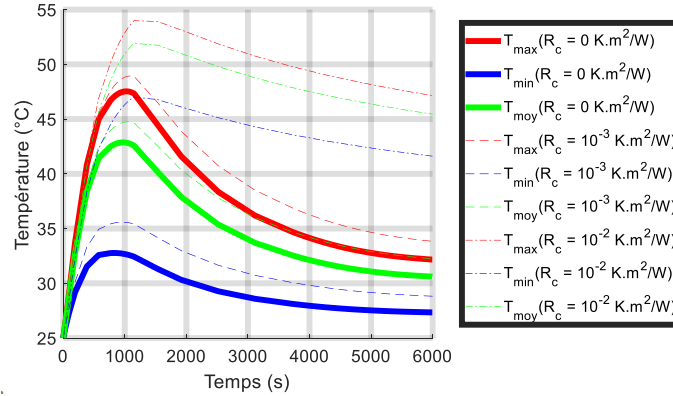


Figure 7 : Comparaison des évolutions temporelles des températures des cellules lors d'une modification du refroidissement du module, en régime dynamique normal

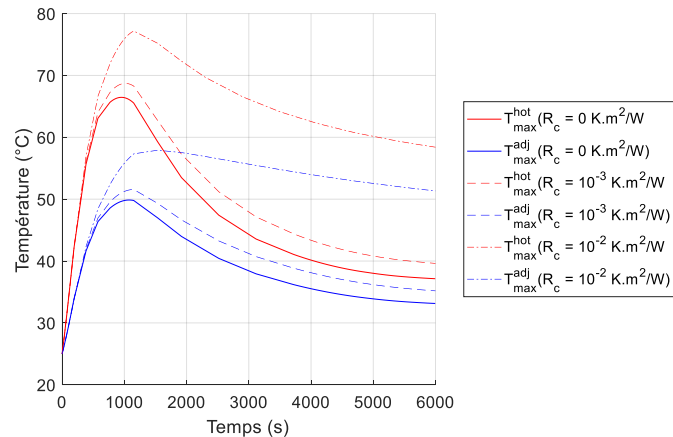


Figure 8 : Comparaison des évolutions temporelles des températures maximales des cellules lors d'une modification du refroidissement du module, en régime dynamique dégradé

4. Conclusion

Le comportement thermique dynamique d'un module de batterie de véhicules électriques est analysé en régimes normal et dégradé à travers une série d'études paramétriques effectuées par le biais de deux modèles numériques de modélisation macroscopique : un modèle 1D nodal et un modèle 2D par éléments finis.

Alors que le modèle 2D permet de simuler correctement les gradients thermiques, notamment suivant la hauteur du module (refroidi uniquement en partie basse), le modèle 1D permet d'évaluer correctement les températures maximales du système quel que soit le régime dynamique de fonctionnement. Cette approche 1D peut permettre ainsi aux partenaires industriels d'avoir un outil rapide de prédimensionnement fournissant les limites hautes de niveau de températures. Les simulations 2D présentées permettent en outre de mettre en avant l'efficacité thermique des matériaux inter-cellules développés dans le cadre du projet MATICS, en confinant la cellule sursollicitée et en protégeant les cellules adjacentes. La performance du système de refroidissement des cellules de batterie apparaît également essentielle pour prédire un comportement dynamique correct du système complet.

Ce travail de modélisation sera enrichi par la prise en compte des phénomènes mécaniques internes (lié à la dilatation thermique des cellules pouch) et de leur couplage avec les phénomènes thermiques. En outre, une représentation réaliste d'un emballage thermique sera également effectuée à partir de tests expérimentaux dédiés pour conclure sur la performance et l'efficacité des matériaux développés, que ce soit en termes de barrières thermiques ou en termes de tenue mécanique du module lors de dynamiques normale ou dégradée.

Références

- [1] Chai Z, Liu Z, Xue Q, *et al.*, Efficient coupled mechanical-electrical-thermal modeling and safety assessment of lithium-ion battery under mechanical abuse, *J. of Energy Storage*, 114 (2025) 115917.
- [2] Shan C, Guanghui G, Fangfang L, Study on the performance of LiMn₂O₄ using spent Zn–Mn batteries as manganese source. *J Solid State Electrochem.* 18 (2014) 1495–1502.
- [3] Julien CM, Mauger A, Zaghbi K, Groult H, Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries, *Inorganics* 2, (2014) 132–154.
- [4] Zhao C, Kang W, Zhao S, Shen Q, Hydrazine–hydrothermal synthesis of pure-phase O-LiMnO₂ for lithium-ion battery application, *Micro & Nano Letters*, 6 (2011) 820–822.
- [5] Jannot Y, Degiovanni A, *Thermal properties measurement of materials*, ISTE WILEY (2018)
- [6] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J, A General Energy Balance for Battery Systems, *J. Electrochem. Soc.* 132:5 (1985).
- [7] Thomas KE, Newman J, Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes, *J. Electrochem. Soc.*, 150 (2003) A176.

Remerciements

Le projet MATICS est financé par l'Etat, via BpiFrance, dans le cadre de France 2030.

Les mesures de propriétés thermiques réalisées au LEMTA ont été menées au sein de la plateforme expérimentale Métro'NRJ, labellisée INFRA+.

