

Estimation de la température interne de cellules Li-ion de grande capacité par impédancemétrie embarquée

Charles BECHARA, Guy FRIEDRICH, Christophe FORGEZ et Samuel CREGUT

Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval, Centre de Recherches de Royallieu, 60203 Compiègne Cedex.
Technocentre Renault, 1 Av. du Golf, 78280 Guyancourt, France.

charles.bechara@renault.com

RESUME – La température interne des accumulateurs électrochimiques constitue un paramètre crucial, ayant un impact significatif sur leur vieillissement et leur sécurité. En particulier, le phénomène d'emballement thermique doit être détecté précocement en raison de son évolution rapide et de ses conséquences potentiellement catastrophiques. Cependant, la mesure de la température pour chaque cellule au sein d'un pack batterie est coûteuse et ne permet généralement d'accéder qu'à la température externe des éléments. Par ailleurs, l'augmentation de la taille des cellules s'accompagne d'une hausse de leur capacité thermique, entraînant un décalage temporel significatif entre la température interne et la température de surface. Les techniques d'analyse par impédancemétrie offrent une méthode précise pour évaluer les paramètres et phénomènes électrochimiques, lesquels sont étroitement corrélés à la température interne des batteries. Cet article propose une approche innovante en utilisant une version embarquée de la technique d'impédancemétrie pour estimer la température interne des accumulateurs électrochimiques de grande capacité énergétique.

Mots-clés – Spectroscopie d'impédance électrochimique, Gestion thermique des batteries, Électronique embarquée.

1. INTRODUCTION

La transition mondiale vers une économie décarbonée et plus durable repose largement sur l'adoption généralisée des batteries, en particulier les batteries lithium-ion, reconnues pour leur haute énergie spécifique et leur densité de puissance élevée. Cependant, leur déploiement nécessite des systèmes embarqués fiables de gestion de batterie pour garantir des performances sûres et optimales. Comme les batteries doivent fonctionner dans une large gamme de conditions exigeantes, notamment des températures et des taux de charge/décharge élevés, les problèmes thermiques sont particulièrement significatifs. Bien que plus accessibles, les mesures de température en surface ne reflètent pas fidèlement l'état thermique du cœur de la batterie, notamment pour les cellules de grande taille et à haute capacité utilisées dans les véhicules électriques (VE). Leur volume important induit des gradients thermiques marqués entre la surface et l'intérieur, où la température peut être nettement plus élevée, compromettant ainsi la sécurité et la fiabilité et par conséquent, une estimation précise de la température globale de la batterie à bord est d'une importance critique. La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) est une technique non invasive permettant de mesurer l'impédance interne d'une batterie. L'objectif de l'EIS réside dans la détermination de l'impédance d'une cellule en mesurant sa réponse en tension alternative suite à une excitation de courant alternatif ou vice versa. Pour chaque fréquence d'excitation, l'impédance de la batterie est déduite par une division complexe de la tension sur le courant. La dépendance de l'impédance des cellules Li-ion vis-à-vis de leur température interne est un phénomène bien documenté. Dans [1], l'impédance d'une cellule Li-ion commerciale a été analysée sur une plage de température de -10 à 40 °C, à différents niveaux de charge. La résistance correspondant au demi-cercle de basse

fréquence est due aux réactions électrochimiques des électrodes et présente une forte dépendance par rapport à la température. Cette dépendance a été confirmée dans [2], où les auteurs ont trouvé qu'en général, pour tous les spectres EIS obtenus, la résistance de transfert de charge augmente de manière significative avec la baisse de la température. Les données montrent que l'augmentation de l'impédance interne, à mesure que la température diminue, provient de l'interface électrolyte-surface de l'électrode positive. Également, dans [3], les caractéristiques EIS des batteries Li-ion à différentes températures ont été étudiées. Les résultats ont montré une forte influence de la température sur la résistance de transfert de charge, ce qui confirme le lien entre les mesures d'impédances et la température.

Des méthodes d'estimation de la température basées sur des mesures d'impédance classiques (réalisées avec un appareil de laboratoire) sont très nombreuses dans la littérature. Dans [4], les auteurs ont trouvé une relation intrinsèque entre la partie réelle de l'impédance et la température à une fréquence de 10,3 kHz pour une batterie pouch de 2 Ah. Dans [5] et [6], les auteurs ont utilisé la partie réelle de l'impédance à une fréquence de 215 Hz comme paramètre d'entrée. Dans un travail plus récent [7], des mesures d'EIS sur une batterie Li-ion commerciale de 25 °C à 140 °C révèlent que la partie réelle à 100 Hz est un excellent indicateur de température en raison de sa haute sensibilité aux surchauffes. Dans [8], une estimation instantanée de la température interne d'une batterie Li-ion 18650 LiCoO₂ a été réalisée via des mesures EIS, établissant une relation entre la partie imaginaire à 300 Hz et la température interne. Dans [9], les données d'impédance ont servi à développer un modèle d'estimation de température basé sur la partie imaginaire à 200 Hz. Dans [10], les auteurs rapportent une corrélation entre la phase de l'impédance et la température dans la plage 40-100 Hz. Les travaux dans [11] confirment ce lien avec des batteries à électrodes en titanate. Zhu et al. [12] identifient la phase à 10 Hz comme indicateur de température pour une cellule LiFePO₄ de 30 Ah. Cependant, ces travaux reposent principalement sur des mesures EIS réalisées avec des équipements de laboratoire coûteux et encombrants, incompatibles avec les applications embarquées. De plus, les cellules utilisées dans ces études présentent généralement des capacités limitées, ne dépassant pas quelques dizaines d'ampères-heures. La principale difficulté des cellules lithium à haute capacité réside dans le fait que l'ordre de grandeur moyen de leur impédance reste inférieur à 1 mΩ, ce qui complique leur mesure.

De nombreuses solutions d'impédancemétrie embarquée ont été proposées dans la littérature. Dans [13], un convertisseur DC-DC triphasé réalise des mesures EIS in situ sur des batteries de véhicules électriques. Dans [14], un système EIS optimisé pour les batteries haute capacité des véhicules électriques est présenté. Le prototype atteint une erreur inférieure à 14 μΩ pour une batterie de 70 Ah. Bien que ces techniques d'impédancemétrie soient adaptées à une mise en œuvre dans un environnement embarqué, elles utilisent des méthodes relativement complexes

pour générer le courant d'excitation, telles que des convertisseurs de puissance DC/DC ou des modulateurs/démodulateurs. Les auteurs dans [15] implémentent une solution d'impédancemétrie embarquée en connectant une cellule en série avec deux MOSFET en configuration à demi-pont pour générer un courant d'excitation en onde carrée, dont la fréquence est contrôlable. Ils obtiennent ensuite des données d'EIS à différentes températures. Une relation polynomiale est ensuite établie entre la température et le module de l'impédance à 0,15 Hz. Cependant, bien que proche de notre contexte embarqué, ce travail se limite à une cellule de capacité moyenne (50 Ah) avec des impédances d'ordre de grandeur moyen supérieur à 1 mΩ.

Dans cet article, nous proposons une méthode d'estimation de la température interne des cellules lithium-ion de grande capacité, basée sur une technique d'EIS embarquée à faible coût. La section 2 présente la solution de mesure d'impédance embarquée, en la comparant aux approches classiques utilisées en laboratoire. La section 3 détaille le dispositif expérimental, comprenant des essais réalisés sur un pack de batteries constitué de huit cellules, chacune ayant une capacité de 175 Ah. Nous y décrivons également le protocole expérimental conçu pour obtenir des mesures d'impédance à différentes températures et états de charge, en vue d'analyses ultérieures. Dans la section 4, nous analysons les résultats expérimentaux afin d'identifier un critère d'impédance pertinent permettant une estimation robuste de la température interne des cellules lithium-ion. Nous procéderons aussi à la validation du critère sélectionné à l'aide d'essais appropriés. Enfin, la section 5 conclut en synthétisant les principaux résultats de cette étude et en proposant des perspectives pour de futurs travaux.

2. NOTIONS D'IMPÉDANCEMÉTRIE POUR L'ANALYSE D'ACCUMULATEURS ÉLECTROCHIMIQUES

2.1. Technique EIS classique

Les principes de fonctionnement d'un impédancemètre classique de laboratoire sont assez simples et peuvent être modélisés par le circuit présenté dans la Figure 1. L'impédancemètre peut être modélisé par son circuit équivalent de Thévenin, composé d'une source linéaire AC idéale en série avec une résistance interne. Rappelons que l'EIS est réalisée en injectant un courant ou une tension AC au Dispositif Sous Test (DST), et en mesurant respectivement la tension ou le courant alternatif correspondant. Dans notre contexte, le DST est une cellule de batterie. Le signal d'excitation est obtenu par un générateur de signal. La réponse du DST est ensuite analysée dans le domaine fréquentiel, généralement en utilisant un analyseur de réponse en fréquence. L'impédance est alors calculée en déterminant la variation d'amplitude et le décalage de phase du signal de sortie en fonction du signal d'entrée. Bien que ces appareils présentent des mesures très précises et robustes, ils demeurent encombrants et coûteux, ce qui les rend incompatibles avec une application embarquée.

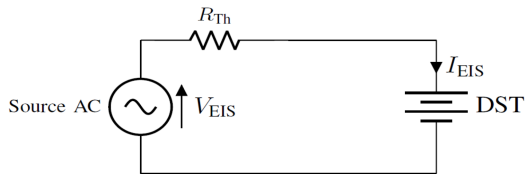


FIG. 1. Circuit équivalent d'une technique de mesure EIS de laboratoire.

2.2. Technique EIS embarquée

Contrairement à l'approche EIS basée en laboratoire, notre technique embarquée proposée repose sur un principe assez différent. La Figure 2 illustre le mieux la méthode. Le DST, qui peut représenter soit une seule cellule soit un ensemble de cellules, est connecté en série avec une résistance de puissance, une

résistance shunt et un transistor à effet de champ (FET). Le DST est la seule source d'énergie du circuit. Ainsi, aucune source d'énergie supplémentaire n'est requise. Le FET est contrôlé en mode de commutation par un signal de contrôle qui génère un courant EIS commuté I_{EIS} avec une seule polarité, à la fréquence d'excitation EIS désirée. Le spectre de fréquences du courant ainsi généré contient donc la fréquence EIS et des harmoniques indésirables de haute fréquence. La résistance shunt sert de capteur de courant pour mesurer I_{EIS} . La résistance de puissance R_d est présente pour fixer l'amplitude de crête du courant à une valeur désirée. En réponse à une demande de mesure EIS, le système génère un signal de contrôle ON-OFF qui est appliqué à la grille du FET. Ce processus génère un courant commuté contenant l'harmonique d'excitation EIS, avec une amplitude déterminée par la valeur R_d , si R_{shunt} est négligée. Comme l'énergie est extraite du DST pour générer l'excitation, le courant présente un offset. La tension aux bornes de R_{shunt} est acquise par l'une des entrées/sorties du processeur central et envoyée à un filtre anti-repliement afin d'éliminer les composantes indésirables à haute fréquence. Ensuite, le signal traité est dirigé vers un convertisseur analogique-numérique (ADC_{shunt}) pour la numérisation et le traitement ultérieur. Lorsque le courant commuté traverse la cellule (éventuellement un empilement de cellules), une surtension est induite en raison de l'impédance interne de la cellule. Cette surtension est acquise et pré-traitée de manière similaire à la chute de tension à travers le shunt. Une fois que les échantillons de tension et de courant ont été acquis, l'impédance est obtenue par le biais d'une division complexe de la tension par le courant dans le domaine fréquentiel. Pour obtenir les représentations du domaine fréquentiel (complexe) des signaux acquis, le système applique l'algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT).

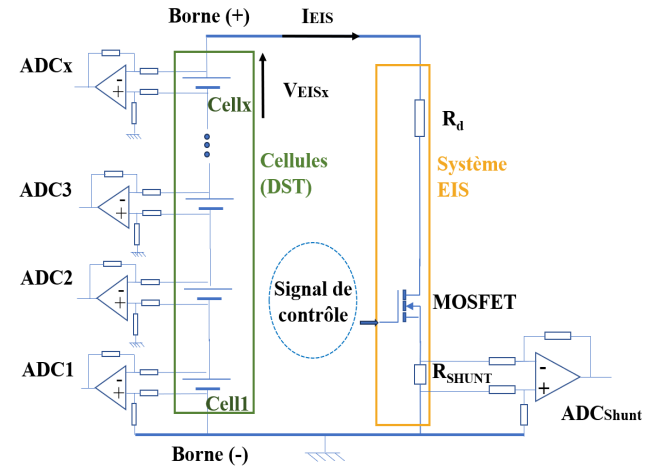


FIG. 2. Circuit équivalent de la technique embarquée de mesure EIS.

La solution embarquée présentée, qui sera utilisée dans les travaux ultérieurs, doit relever plusieurs défis liés à la mesure d'impédance dans le contexte des cellules à forte capacité énergétique. Premièrement, les ADC utilisés pour mesurer la tension (voir Figure 2) doivent offrir une résolution extrêmement élevée afin de détecter des surtensions très faibles. En effet, les cellules lithium à haute capacité présentent des impédances particulièrement faibles. Lorsqu'elles sont excitées par un courant I_{EIS} , la surtension générée reste faible, car elle est proportionnelle à l'impédance. Par conséquent, les ADC doivent être capables de détecter des surtensions pouvant descendre jusqu'à 750 μV. Deuxièmement, ces cellules haute capacité sont largement utilisées dans les véhicules électriques, dont les batteries se composent de cellules connectées en série. Dans ce contexte, tout système de gestion thermique doit être en mesure de surveiller individuellement la température de chaque cellule. En conséquence, notre système de mesure d'impédance doit être capable

de mesurer simultanément l'impédance de toutes les cellules en série dans un pack. Cela est rendu possible grâce à l'architecture illustrée dans la Figure 2, qui repose sur des mesures différentielles. Les amplificateurs opérationnels utilisés pour ces mesures différentielles doivent donc posséder un taux de réjection en mode commun très élevé, et ce, sur une large plage de fréquences.

3. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

3.1. Description du matériel

Pour développer un estimateur de la température interne d'une cellule lithium basé sur des mesures d'impédance, il est essentiel de disposer de données d'impédance enregistrées à différentes températures. Par ailleurs, étant donné qu'une cellule électrochimique fonctionne dans divers états de charge (SoC), il est également crucial que ces mesures soient réalisées à plusieurs SoC. À cette fin, un dispositif expérimental permettant de collecter des données d'impédance à diverses températures et pour différents SoC a été implémenté et est présenté dans la Figure 4. On a choisi de travailler sur un pack batterie composé de 8 cellules Li-NMC/Graphite connectées en série, tel que chacune possède une tension nominale 3,67 V et de capacité chiffrée à 175 Ah. Les cellules de ce pack présentent une impédance avec un ordre de grandeur moyen inférieur à 1 m Ω . Le pack est équipé d'une thermistance CTN située au centre du pack, vers la face supérieure. Également, il comporte un connecteur d'instrumentation permettant de mesurer les tensions des cellules individuelles, ainsi que celle de la thermistance. Afin de charger ou décharger le pack à différents niveaux de SoC, une alimentation DC réversible est utilisée. L'alimentation est une ITECH IT-M3111 DC Power Supply, avec des spécifications maximales de 400 W, 30 V et 70 A. Cet appareil est programmable, ce qui permet de le piloter facilement à l'aide d'un logiciel séquenceur pour activer ou désactiver la charge/décharge selon les besoins. De plus, il est possible de récupérer à tout moment les ampères-heures injectés/consommés, ce qui permet un suivi continu de la charge et de la décharge, ainsi que l'élaboration des stratégies de cyclage en boucle fermée. Pour réaliser les mesures EIS, une carte électronique conçue selon l'architecture présentée à la Figure 2, a été utilisée. Cette carte dispose de 8 entrées dédiées à la mesure de tensions analogiques. La résistance R_d a été fixée à 13 Ω , ce qui permet de générer un courant de décharge sinusoïdal d'amplitude crête variant en fonction de la tension du pack entre 2 et 2,6 A. Elle est capable de réaliser des balayages EIS dans une plage de fréquences comprise entre 1 Hz et 5 kHz. La résistance shunt de mesure de courant est fixée à 50 m Ω . Cette carte est également équipée d'un processeur central chargé de gérer les signaux de commande et d'assurer le traitement des données afin de déterminer l'impédance. Parallèlement avec une mesure d'impédance, une mesure de la thermistance peut être effectuée afin de déterminer la température du module au moment des mesures EIS. Le PC central du banc d'essai remplit deux fonctions principales. Premièrement, il est connecté à la carte PCB-EIS via une liaison USB afin de lancer des commandes permettant d'effectuer des mesures EIS. À l'issue de chaque mesure, un fichier CSV est généré. Ce fichier contient, pour chaque fréquence d'excitation EIS, les valeurs des impédances obtenues (partie réelle, partie imaginaire, module, phase) pour chacune des 8 cellules du pack, ainsi que la température enregistrée par la CTN au moment de la mesure. Deuxièmement, le PC permet de piloter l'alimentation DC à travers une liaison Ethernet. Cette configuration permet l'envoi de commandes d'activation ou de désactivation de l'alimentation, ainsi que la récupération des informations concernant les ampères-heures chargés et déchargés. De plus, un log collecte et enregistre en temps réel les informations issues du processus. Ces deux fonctions sont assurées par un script Python exécuté sur le PC. Ce script permet d'implémenter des séquences d'actions automatisées, définissant ainsi un protocole expérimental détaillé dans la suite. La Figure 5 pré-

sente le banc d'essai global décrit.

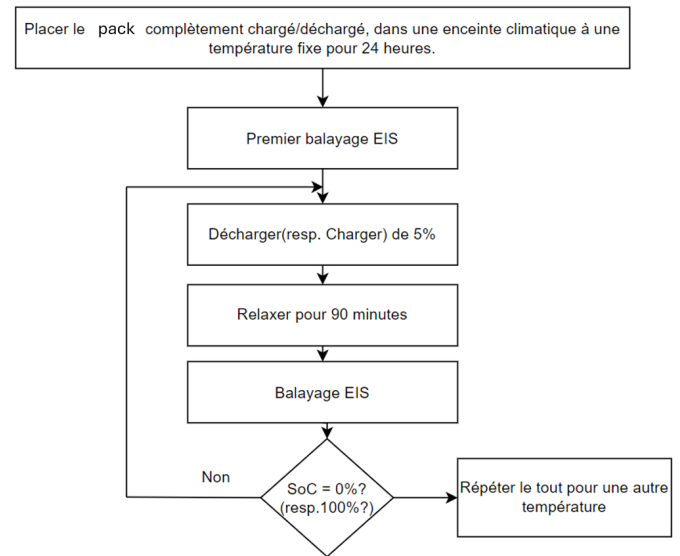


FIG. 3. Protocole expérimental implémenté pour générer les données d'impédance à plusieurs températures et plusieurs SoC.

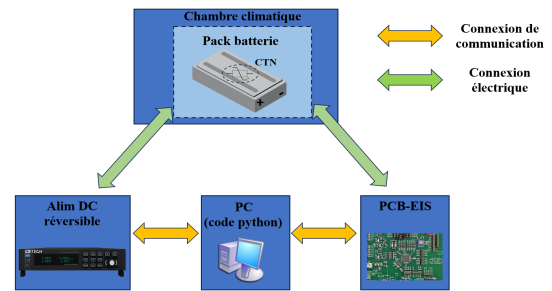


FIG. 4. Schéma du banc expérimental implémenté pour générer les données d'impédance à plusieurs températures et plusieurs SoC.

3.2. Protocole expérimental

Comme mentionné précédemment, il est essentiel d'acquérir des données d'impédance à différentes températures afin de permettre une estimation fiable de la température via la mesure de l'impédance interne. Par ailleurs, étant donné que la batterie doit fonctionner à différents SoC, il est nécessaire d'obtenir ces données d'impédance pour plusieurs niveaux de SoC à une même température. À cette fin, le protocole présenté dans la Figure 3 a été conçu et mis en œuvre. Tout d'abord, le pack est placé dans une chambre climatique à une température donnée pendant 24 heures afin d'assurer une homogénéisation thermique complète. Le pack est aussi entièrement chargé ou déchargé. Une première mesure d'impédance est réalisée en effectuant un balayage fréquentiel de 1 Hz à 5 kHz, avec 10 points par décade. Le temps d'acquisition de la tension et du courant est fixé à 3,5 secondes par fréquence. Ce temps de mesure a été choisi de manière optimale afin de minimiser la consommation d'énergie du pack, puisque conformément à la Figure 2, la réalisation d'une mesure d'impédance implique un prélèvement d'énergie sur celui-ci. À l'issue de ce balayage, les mesures d'impédance des 8 cellules sont enregistrées dans un fichier CSV. Ensuite, une alimentation DC est activée pour décharger ou charger le pack par paliers de Δ SoC de 5 %, en utilisant un courant faible de C/18 afin de limiter le réchauffement interne du pack. Ce dernier est ensuite laissé au repos pendant 90 minutes, après quoi un nouveau balayage EIS, identique au premier, est effectué. Ces étapes sont

répétées successivement jusqu'à ce que le pack soit complètement chargé ou déchargé. L'ensemble du protocole est ensuite répété à une autre température. Ce protocole a été répété pour des températures comprises entre -5°C et 55°C , par incréments de 5°C . À l'issue de l'implémentation de ce protocole, des mesures d'impédance ont été obtenues pour chacune des 8 cellules du pack, à 41 fréquences, 13 températures et 21 niveaux de SoC ($0\% \leftrightarrow 100\%$).

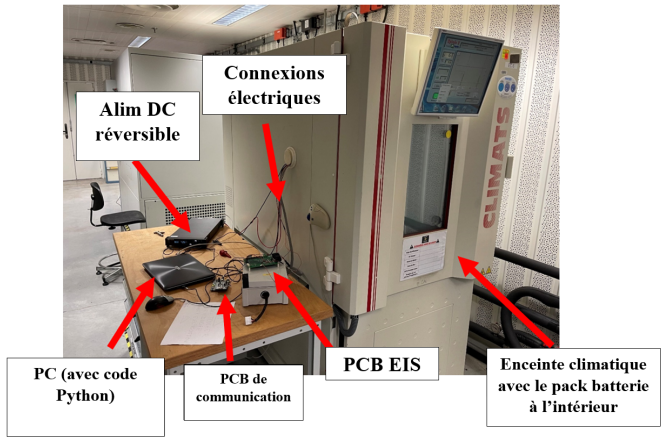


FIG. 5. Photo du banc expérimental implémenté.

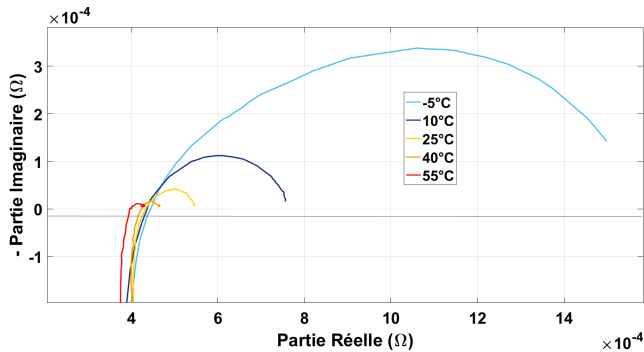


FIG. 6. Spectres EIS de la cellule #2 du module à plusieurs températures, SoC = 50%.

4. ESTIMATEUR DE TEMPÉRATURE BASÉ SUR DES MESURES D'IMPÉDANCE

La Figure 6 présente les spectres EIS d'une même cellule (#2 du pack) obtenus à un SoC de 50 % pour différentes températures. Comme le montre la figure, les spectres d'impédance varient en fonction de la température à laquelle les mesures ont été effectuées : à mesure que la température augmente, les spectres tendent à se rétrécir et à se rapprocher de l'origine (décalage vers la gauche). Ce phénomène s'explique par le fait que l'impédance électrochimique d'une batterie au lithium est inversement proportionnelle à la température et diminue en valeur lorsque la température augmente. On peut également observer que l'impédance moyenne est de l'ordre de grandeur inférieur à $1\text{ m}\Omega$, ce qui constitue une caractéristique intrinsèque des cellules lithium de très grande capacité. En raison de la dépendance de l'impédance à la température, il est possible de développer un estimateur de température basé sur des mesures EIS. L'impédance, dépendante de la fréquence d'excitation, fournit plusieurs composantes telles que la partie réelle (résistance), la partie imaginaire (réactance), le module et la phase. Une analyse approfondie est donc nécessaire pour identifier la composante et la fréquence optimales à utiliser comme critère d'entrée pour l'estimateur.

4.1. Choix de la composante d'impédance la plus adaptée

Afin de choisir la composante d'impédance la plus adaptée pour un estimateur de température performant, 2 facteurs ont été étudiés. La première étape consiste à réaliser une revue de la littérature afin d'identifier la composante de l'impédance la plus couramment utilisée pour l'estimation de la température. Ces travaux sont regroupés dans le Tableau 1. La seconde repose sur une analyse exploratoire des données (AED), une méthode permettant d'examiner et de comprendre les caractéristiques principales d'un jeu de données avant toute analyse approfondie. Dans notre cas, l'objectif est de déterminer s'il existe une relation évidente entre une composante spécifique de l'impédance et la température. Il existe plusieurs méthodes pour explorer l'éventuelle relation entre chaque composante de l'impédance et la température, notamment à travers la création de nuages de points, d'histogrammes, etc. Cependant, il est difficile de représenter dans un seul graphique les variations de l'impédance en fonction de trois facteurs simultanément (fréquence, température, SOC). Pour surmonter cette limitation, nous avons calculé, pour chaque composante de l'impédance, le coefficient de corrélation de Pearson (r) entre toutes ses valeurs mesurées et la température mesurée par la CTN et à laquelle ces valeurs ont été acquises. Le coefficient r quantifie la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables continues. Il prend des valeurs comprises entre -1 et $+1$, où $+1$ indique une relation linéaire positive parfaite, -1 une relation linéaire négative parfaite, et 0 l'absence de relation linéaire. Un coefficient proche de $+1$ ou -1 suggère une forte corrélation, tandis qu'une valeur proche de 0 indique une relation faible. Les résultats de ce coefficient sont également présentés dans le Tableau 1. On observe que la partie réelle de l'impédance constitue un choix pertinent pour l'estimation de la température, comme l'ont démontré les nombreux travaux antérieurs. De plus, d'après nos mesures, elle présente la plus grande corrélation (en valeur absolue) avec la température par rapport aux autres composantes. La partie réelle est intrinsèquement liée à la température : la résistance ohmique augmente avec la température, tandis que la résistance de transfert de charge diminue. Le coefficient de corrélation de $-0,51$ reste modéré, car il est calculé sur l'ensemble des fréquences EIS mesurées. Or, à haute fréquence ($>1\text{ kHz}$), l'impédance est surtout influencée par les champs magnétiques des câbles de mesure, et non par la température de la cellule. La section suivante identifie une fréquence optimale, mieux corrélée à la température.

TABEAU 1. Travaux bibliographiques sur chaque composante de l'impédance, ainsi que son coefficient de corrélation de Pearson avec la température.

Composante	Articles	Coefficient r avec la température
Partie réelle	[4],[5],[6],[7].	-0,51
Partie imaginaire	[9],[8].	-0,29
Module	[15].	-0,47
Phase	[10],[11],[12].	+0,24

4.2. Choix de la fréquence EIS optimale

Pour implémenter un estimateur de température en utilisant la partie réelle de l'impédance, il est crucial de déterminer la fréquence de mesure optimale. Cette fréquence doit maximiser la sensibilité de la partie réelle de l'impédance aux variations de température tout en minimisant les variations dues à l'état de charge. Cela assure des mesures précises et fiables, indépendamment des fluctuations du SoC. La fréquence choisie doit également être applicable uniformément à toutes les cellules de la batterie pour garantir la cohérence des mesures et des estimations de température dans tout le système. Afin de trou-

ver la fréquence dont la partie réelle (PR) associée varie le plus en fonction de la température, l'algorithme suivant a été implémenté :

- Pour chaque fréquence d'excitation EIS :
- Pour chaque cellule :
 - Pour chaque SoC :
 - On constitue un vecteur de PR contenant 13 éléments, correspondant aux 13 points de température effectués.
 - On identifie les valeurs maximale et minimale de ce vecteur, puis on calcule l'écart entre ces deux valeurs. Cet écart maximal est attribuable uniquement à la variation de température.

Ensuite, pour simplifier l'analyse, on moyenne les écarts selon le SoC puis selon les cellules. On obtient finalement un vecteur d'écart pour chaque fréquence.

La Figure 7 montre l'écart maximal de l'impédance (lié à la température) pour chaque fréquence d'excitation. On peut distinguer trois régions : La zone verte [1 Hz, 10 Hz] qui présente un grand écart de la PR, ce qui montre une variation perceptible avec la température, la zone orange [20 Hz, 100 Hz] qui présente un écart moyen de la PR, ce qui montre une variation moyenne avec la température et la zone rouge [200 Hz, 5 kHz] qui présente un faible écart de la PR, ce qui montre une légère variation avec la température. On observe que la variation de la partie réelle diminue avec l'augmentation de la fréquence. Ceci s'explique par le fait qu'à basse fréquence, l'impédance est dominée par les processus électrochimiques lents (réactions de transfert de charge, diffusion ionique), très sensibles à la température. À haute fréquence, les phénomènes rapides (migration ionique, effets inductifs) deviennent dominants, étant moins influencés par les variations thermiques.

Avant de sélectionner la fréquence la plus appropriée pour l'estimation de la température, il convient de rappeler que l'estimateur doit être robuste aux variations du SoC. Autrement dit, le critère d'entrée de l'estimateur doit présenter une invariance maximale vis-à-vis du SoC. À cette fin, l'algorithme précédent a été réexécuté en isolant uniquement les écarts dus aux variations de SoC. La Figure 8 montre la variation de l'écart maximal (dû uniquement à la variation de SoC) pour chaque fréquence d'excitation. Les résultats des Figures 7 et 8 montrent que la plage de fréquence avec les plus grandes variations de température présente également les plus grandes variations avec le SoC, et inversement. La fréquence optimale, située dans la zone orange (20-100 Hz), présente des variations moyennes pour ces deux paramètres. La fréquence de 100 Hz est retenue comme meilleur candidat afin de limiter au maximum la variation avec le SoC.

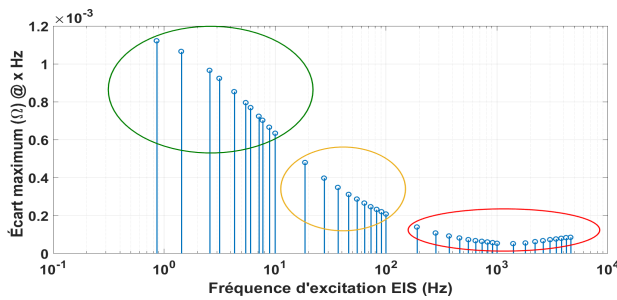


FIG. 7. L'écart maximum de la partie réelle en ohms (dû à la température) pour chaque fréquence, en moyenne sur les cellules et les SoCs.

4.3. Construction de l'estimateur de température

Après avoir établi la partie réelle à 100 Hz comme critère d'entrée pour un éventuel estimateur de température basé sur des mesures EIS, il est maintenant temps d'élaborer ce dernier. Étant donné que les cellules de ce pack sont identiques, il est possible de développer un estimateur basé sur les données d'impédance

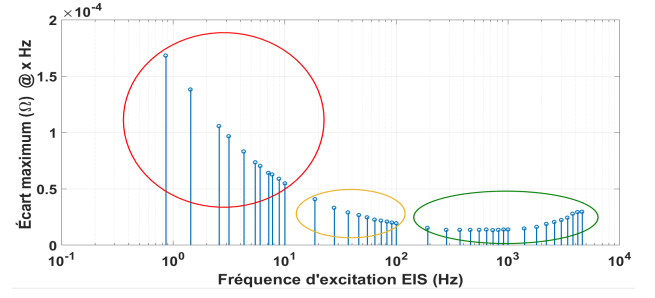


FIG. 8. L'écart maximum de la partie réelle en ohms (dû au SoC) pour chaque fréquence, en moyenne sur les cellules et les températures.

d'une seule cellule. La Figure 9 représente le nuage de points reliant la température de la cellule n°2 enregistrée par la CTN avec sa partie réelle à 100 Hz et le SoC. Il apparaît que l'évolution de la température est significative en fonction du critère choisi pour un même SoC, et qu'elle est quasiment insensible aux variations de SOC pour une même valeur du critère. Cela renforce la pertinence du choix de la partie réelle à 100 Hz. Toutefois, l'information relative au SoC demeure essentielle pour l'estimateur, car en son absence, les performances de ce dernier pourraient se dégrader. Le nuage de points obtenu forme une surface sur laquelle il est possible de définir une surface lisse et continue pouvant la recouvrir. Cette surface peut être modélisée sous la forme d'un modèle polynomial d'ordre 3 de la forme suivante :

$$\hat{T} = \begin{bmatrix} 1 \\ PR \\ SoC \\ PR^2 \\ PR \times SoC \\ SoC^2 \\ PR^3 \\ PR^2 \times SoC \\ PR \times SoC^2 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec $\hat{T}$ la température estimée en °C, PR le critère choisi (partie réelle à 100 Hz) en Ohms et SoC représente l'état de charge en %. Le terme cubique relatif au SoC a été omis. Une régression polynomiale a été effectuée sur les données présentées dans la Figure 9 en utilisant ce modèle. La partie réelle à 100 Hz a été normalisée avec une moyenne de $0,491 \times 10^{-3} \Omega$ et un écart type de $6,759 \times 10^{-5} \Omega$. Le SoC a été normalisé avec une moyenne de 50% et un écart type de 30,33%. Le fit a été réalisé avec un $r^2 = 0,996$ et un RMSE = 1,09°C.

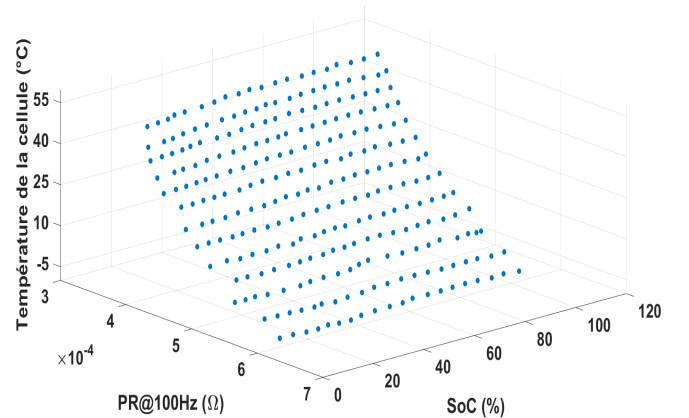


FIG. 9. Température de la cellule numéro 2 (enregistrée par la CTN) en fonction de la partie réelle à 100 Hz et le SoC.

4.4. Validation de l'estimateur de température

Afin de valider l'estimateur obtenu, nous avons procédé à la collecte de mesures d'impédances effectuées à des températures et des niveaux de SoC sélectionnés de manière arbitraire. Cela nous a permis d'obtenir des parties réelles de l'impédance à 100 Hz, relevées à différentes températures et niveaux de SoC. Ces points de validation ont été mesurés après une stabilisation thermique de 24 heures et une relaxation suffisante pour atteindre le niveau de SoC souhaité. Cinq points ont ainsi été obtenus. De plus, afin d'élargir le jeu de données de validation tout en vérifiant la répétabilité de l'estimateur, le protocole décrit à la Figure 3 a été répété pour les températures suivantes : 10°C, 25°C, 40°C et 50°C. Le choix des températures de 40°C et 50°C s'explique par le fait qu'à ces températures, les impédances présentent des ordres de grandeur très faibles par rapport à celles mesurées à d'autres températures, ce qui peut remettre en question leur répétabilité et leur précision. Au total, 89 points de validation ont été obtenus : 84 points issus du protocole appliqué aux quatre températures (21 points par température) et 5 points collectés sans règle prédéfinie. Ensuite, les parties réelles à 100 Hz des 89 points collectés sont extraites et utilisées comme première variable d'entrée du modèle polynomial. Le SoC auquel chaque point a été collecté est également utilisé comme seconde variable d'entrée. La Figure 10 présente une comparaison entre les températures estimées et les températures de référence mesurées par la CTN de la cellule numéro 2 du pack. Il convient de rappeler que, puisque les points ont été collectés après stabilisation thermique du pack, la température mesurée par la CTN peut être considérée comme représentative de celle de la cellule. D'après la Figure 10, il est observable que le modèle polynomial parvient à prédire efficacement la température de la cellule # 2 en se basant uniquement sur son SoC et la partie réelle à 100 Hz, avec une médiane d'erreur d'environ 1,5°C, un RMSE de 1,6°C, et une erreur absolue maximale d'environ 3,6°C.

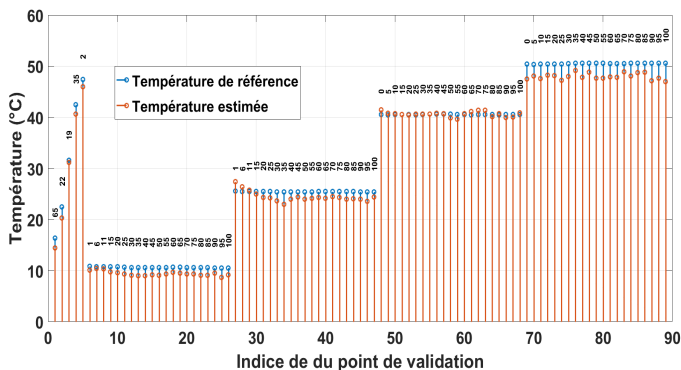


FIG. 10. Comparaison entre la température de la cellule #2 du pack estimée par le modèle polynomial (en orange) et la température de référence enregistrée par la CTN (en bleu). Le SoC correspondant à chaque point est indiqué au-dessus de celui-ci.

Le même processus de validation a été appliqué à la cellule n°5, avec des résultats similaires : une erreur médiane d'environ 1,5 °C, une RMSE de 1,33 °C et une erreur maximale de 2,9 °C. Ces résultats montrent que l'estimateur se généralise bien à l'ensemble des cellules du pack, avec des performances comparables sur toutes les cellules. Cette approche permet un suivi thermique précis de chaque cellule à partir d'une seule mesure, simplifiant ainsi la gestion thermique du pack.

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une méthode embarquée à faible coût pour l'estimation de la température interne des cellules lithium-ion de grande capacité, basée sur la spectroscopie d'impédance électrochimique. Les résultats obtenus sur un pack de batteries de 175 Ah démontrent que la partie réelle de l'impé-

dance à 100 Hz est un critère pertinent, sensible aux variations de température et peu affecté par les fluctuations de l'état de charge. Un modèle polynomial a été élaboré, permettant une estimation simultanée pour l'ensemble des cellules du pack, dont les impédances sont d'un ordre de grandeur inférieur à $1m\Omega$. La méthode atteint une RMSE d'environ 1.5°C sur l'ensemble des cellules. Les travaux futurs devront explorer l'influence du courant de charge sur les mesures EIS embarquées, afin d'approfondir la compréhension du comportement dynamique des batteries en conditions réelles.

6. RÉFÉRENCES

- [1] P. Suresh, A. Shukla, et N. Munichandraiah, "Temperature dependence studies of a.c. impedance of lithium-ion cells," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 32, pp. 267–273, 2002, doi : <https://doi.org/10.1023/A:1015565404343>.
- [2] A. Keefe et J. Dahn, "Temperature Dependent Electrochemical Impedance Spectroscopy Studies of Lithium Ion Batteries," in *ECS Meeting Abstracts*, vol. MA2019-03, pp. 207–207, 2019, doi : [10.1149/MA2019-03/2/207](https://doi.org/10.1149/MA2019-03/2/207).
- [3] X. Wu, Z. He, T. Wang, X. Li, D. Yang, Q. Wang, et Y. Li, "Effects of temperature on electrochemical impedance spectroscopy of the LiFePO₄ battery," in *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.*, vol. 675, art. 012220, 2021, doi : [10.1088/1755-1315/675/1/012220](https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012220).
- [4] J. P. Schmidt, S. Arnold, A. Loges, D. Werner, T. Wetzel, et E. Ivers-Tiffée, "Measurement of the internal cell temperature via impedance : Evaluation and application of a new method," *J. Power Sources*, vol. 243, pp. 110–117, 2013, doi : [10.1016/J.JPOWSOUR.2013.06.013](https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.06.013).
- [5] R. Richardson, P. Ireland, et D. Howey, "Battery internal temperature estimation by combined impedance and surface temperature measurement," *J. Power Sources*, vol. 265, pp. 254–261, 2014, doi : [10.1016/j.jpowsour.2014.04.129](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.129).
- [6] R. Richardson et D. Howey, "Sensorless battery internal temperature estimation using a Kalman filter with impedance measurement," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 6, 2015, doi : [10.1109/TSTE.2015.2420375](https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2420375).
- [7] I. Lalinde, A. Berrueta, A. Soto, J. Arza, P. Sanchis, et A. Ursúa, "Temperature indicators and overtemperature detection in lithium-ion batteries based on electrochemical impedance spectroscopy," in *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics (ISIE)*, 2023, pp. 1–6, doi : [10.1109/ISIE51358.2023.10228079](https://doi.org/10.1109/ISIE51358.2023.10228079).
- [8] N. Spinner, C. Love, S. Rose-Pehrsson, et S. Tuttle, "Expanding the operational limits of the single-point impedance diagnostic for internal temperature monitoring of lithium-ion batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 174, 2015, doi : [10.1016/j.electacta.2015.06.003](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.003).
- [9] K. Carthy, H. Gullapalli, et T. Kennedy, "Real-time internal temperature estimation of commercial Li-ion batteries using online impedance measurements," *J. Power Sources*, vol. 519, art. 230786, 2022, doi : [10.1016/j.jpowsour.2021.230786](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230786).
- [10] R. Srinivasan, B. Carkhuff, M. Butler, et A. Baisden, "Instantaneous measurement of the internal temperature in lithium-ion rechargeable cells," *Electrochim. Acta*, vol. 56, pp. 6198–6204, 2011, doi : [10.1016/j.electacta.2011.03.136](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.136).
- [11] R. Schwarz, K. Semmler, M. Wenger, V. R. H. Lorentz et M. März, "Sensorless battery cell temperature estimation circuit for enhanced safety in battery systems," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 001536–001541, doi : [10.1109/IECON.2015.7392319](https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392319).
- [12] J. Zhu, Z. Sun, X. Wei, et H. Dai, "Battery internal temperature estimation for LiFePO₄ battery based on impedance phase shift under operating conditions," *Energies*, vol. 10, no. 1, p. 60, 2017, doi : [10.3390/en10010060](https://doi.org/10.3390/en10010060).
- [13] Z. Gong et al., "An EV-scale demonstration of in-situ battery electrochemical impedance spectroscopy and BMS-limited pack performance analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 9, pp. 9112–9122, Sept. 2023, doi : [10.1109/TIE.2022.3215833](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3215833).
- [14] Y.-N. Lee, S.-W. Jo, G. Rahim, S.-G. Lee, et K. Kwon, "Small-perturbation electrochemical impedance spectroscopy system with high accuracy for high-capacity batteries in electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Jan. 2024, doi : [10.1109/TIE.2024.3436676](https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3436676).
- [15] Y. Zheng et al., "Sensorless state of temperature estimation for smart battery based on electrochemical impedance", *25th European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1–8, doi : [10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264452](https://doi.org/10.23919/EPE23ECCEurope58414.2023.10264452).