

Méthode de mesure d'impédance des batteries Li-ion pour le diagnostic des sources hybrides embarquées en régime dynamique

Jules MILLET¹, Daniel DEPERNET¹, Ali SARI², Frédéric GUSTIN³, Hugo HELBLING²

¹Université Marie et Louis Pasteur, UTBM, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France

²Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

³Université Marie et Louis Pasteur, Université de Franche-Comté, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France

RÉSUMÉ – Cet article présente un algorithme de traitement du signal développé pour l'analyse fréquentielle de cycles de conduite appliqués à des cellules Li-ion, dans une optique de diagnostic. L'approche vise à extraire l'impédance associée aux composantes fréquentielles naturellement présentes dans les cycles de fonctionnement à partir du courant et de la tension de batterie. L'algorithme repose sur plusieurs étapes : segmentation des signaux, compensation de la dérive, application de fenêtres, transformée de Fourier discrète et moyennage. Ce traitement améliore la précision des mesures d'impédance estimées à partir des données de fonctionnement. Les mesures ont été effectuées sur un banc d'essai conçu pour reproduire les conditions d'application réelles des cycles de conduite. Ce banc permet également d'effectuer des spectroscopies d'impédance électrochimique (EIS) de référence, utilisées pour valider les résultats de l'algorithme. Les résultats préliminaires montrent une bonne corrélation entre les impédances estimées par l'algorithme et celles obtenues par EIS, confirmant ainsi la pertinence de la méthode proposée. Ces résultats ouvrent la voie à des expérimentations futures sur des cycles de conduite plus complexes et représentatifs des conditions d'utilisation réelles.

Mots-clés – «EIS», «Batterie», «Mesure d'impédance passive», «Traitement du signal», «ECM», «Cycle de conduite»

1. INTRODUCTION

Au cœur de la transition énergétique, le secteur de la mobilité est une des sources principales d'émissions de gaz à effet de serre [1]. Au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été faits pour remplacer les moteurs à combustion interne par des moteurs électriques. Ces derniers, alimentés par des batteries ou des piles à combustible, permettent de réduire les émissions de CO₂ à l'utilisation.

Dans le cadre du plan d'investissement France 2030, des programmes de recherche ont été lancés pour optimiser ces technologies. Le projet HYSySPeM, dans lequel s'inscrivent ces travaux, vise à améliorer les systèmes énergétiques hybrides comprenant des systèmes de piles à combustible multi-stacks pour les applications de transport lourd, tels que les camions et les navires.

Les véhicules électriques à hydrogène sont considérés comme des véhicules hybrides, car ils dépendent de plusieurs sources d'énergie : une pile à combustible, utilisée principalement pour répondre à la demande énergétique lors des phases de fonctionnement stable, et une batterie, mobilisée pour gérer les phases transitoires telles que l'accélération ou la récupération d'énergie. Ces recherches visent à évaluer l'état de santé (State of Health, SoH) de ces sources d'énergie en développant des méthodes de diagnostic fiables. Cependant, la caractérisation de ces sources dans des conditions embarquées reste un défi de taille, ce qui motive le choix de cette étude pour l'aborder. Parmi les solutions potentielles, la spectroscopie d'impédance électrochimique (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS), large-

ment utilisée, est une solution prometteuse pour caractériser ces sources d'énergie en conditions embarquées.

2. MESURE D'IMPÉDANCE EN EMBARQUE

L'EIS repose sur l'application d'un signal d'excitation sinusoïdal à travers la source, à une fréquence donnée et à un point de fonctionnement fixe, afin d'analyser la réponse en tension et en courant. En répétant ce processus sur une large plage de fréquences, il devient possible de déterminer le spectre d'impédance. Cependant, dans un contexte embarqué où aucun équipement de laboratoire n'est disponible, il est nécessaire de trouver une méthode pour générer un signal d'excitation. Une solution, proposée par D. Depernet et al. [2], consiste à injecter le signal via le convertisseur en modulant le rapport cyclique. Toutefois, dans le cadre de l'architecture imposée par le projet HYSySPeM, les convertisseurs ne sont pas toujours présents au niveau de la source, ce qui implique que différentes méthodes d'EIS pourraient être utilisées pour obtenir l'impédance de chaque système.

Pour une pile à combustible équipée d'un convertisseur, l'injection du signal doit être la moins perturbatrice et durer le moins longtemps possible. Dans la littérature, ce type de méthode est qualifié d'EIS active [2] ou d'EIS dynamique (DEIS) [3], selon le régime statique ou dynamique dans lequel elle est exploitée. En revanche, lorsqu'une batterie est dépourvue de convertisseur, rendant l'injection directe de signaux d'excitation impossible, une approche alternative doit être envisagée. Plusieurs études évoquent alors le concept d'EIS passive (PEIS) [4, 5, 6], qui repose sur l'analyse fréquentielle des signaux de tension et de courant mesurés du cycle de conduite (Fig. 1).

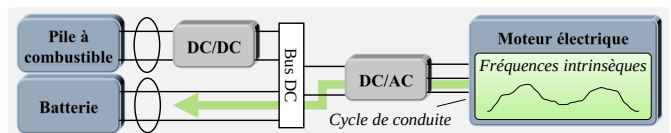


FIG. 1. Principe de fonctionnement de l'EIS passive

Il convient de distinguer clairement la DEIS (EIS dynamique) de la PEIS (EIS passive). La DEIS consiste à exciter activement la source de puissance à l'aide d'un dispositif en fonctionnement dynamique, c'est-à-dire lorsque le courant varie [7], [11]. À l'inverse, la PEIS repose sur l'analyse des composantes fréquentielles naturellement présentes dans les signaux de tension et de courant du système. L'étude suivante se concentre sur la caractérisation embarquée de la batterie au moyen de la méthode PEIS. Une analyse de faisabilité est ainsi menée afin de déterminer s'il est possible d'estimer l'impédance à partir d'un cycle de conduite, en vue du diagnostic de la batterie.

2.1. EIS passive appliquée à la batterie

Plusieurs études portent sur l'utilisation du cycle de conduite pour évaluer l'impédance du système sans utiliser de signaux d'excitation. Les signaux de courant et de tension doivent donc être analysés pour détecter les fréquences des régimes dynamiques afin de les exploiter pour déterminer l'impédance de la batterie.

Lohmann et al. [4] présentent un travail similaire, analysant le contenu fréquentiel d'un cycle de conduite. L'algorithme de Goertzel est utilisé en supposant que les fréquences détectées sont déjà connues. Cette étude pose les bases, mais présente un cas où l'algorithme de traitement du signal recherche exclusivement les fréquences injectées.

B. Liebhart et al. [5] abordent une partie de ce sujet et cherchent à obtenir l'impédance d'une batterie lithium-ion à partir des régimes dynamiques d'un cycle de conduite. En appliquant une méthode de traitement du signal, ils parviennent principalement à calculer l'impédance de la batterie dans les hautes fréquences.

Plus récemment, B. Yang et al. [6] ont réutilisé une partie de la méthode PEIS, précédemment présentée par Liebhart et al. [5], et l'ont appliquée à différents cycles de conduite en milieu urbain, montagneux et rural. Les résultats sont prometteurs car ils traitent les cycles de conduite sans connaissance préalable de leur contenu fréquentiel.

L'ensemble de ces recherches constituent une première base pour l'utilisation du cycle de conduite comme source d'excitation. Cependant, ce type d'analyse n'est pas simple, car l'impédance d'une batterie varie significativement non seulement avec le courant, mais aussi avec l'état de charge (State of Charge, SoC) et la température [7, 8, 9]. Cela souligne la nécessité d'un traitement du signal robuste, capable de calculer l'impédance avec précision dans des conditions passives et dynamiques.

2.2. Traitement du signal en régime dynamique

En s'appuyant sur les travaux de N. Liebhart et al. [5], un algorithme de traitement du signal a été développé pour estimer l'impédance à partir des signaux issus de cycles de conduite (Fig. 2). Contrairement aux signaux classiquement utilisés en EIS, les signaux provenant des cycles de conduite sont caractérisés par leur nature non périodique, non linéaire, et un contenu fréquentiel aléatoire. Pour répondre à ces particularités, une méthodologie rigoureuse a été mise en œuvre afin de permettre le calcul fiable de l'impédance dans ces conditions.

Segmentation : La segmentation consiste à découper les signaux de tension et de courant en plusieurs segments de durée identique. Ces durées sont définies en fonction des trois plages de fréquences ciblées : haute (3000 Hz à 300 Hz), moyenne (300 Hz à 30 Hz) et basse (30 Hz à 0,1 Hz). Ce découpage permet d'observer avec précision l'ensemble des fréquences constituant le spectre d'impédance de la batterie. Ainsi, les signaux sont segmentés de manière adaptée à la plage de fréquences sélectionnée.

Compensation de la dérive : Lors de la mesure d'impédance, la modification de l'état stationnaire du système entraîne une dérive de la réponse en tension [10]. Celle-ci doit donc être corrigée, après acquisition, afin de ne pas influencer la mesure d'impédance. Chaque segment est donc redressé et corrigé, à l'aide de filtre, afin de supprimer cette dérive.

Fenêtrage & FFT : Un fenêtrage est ensuite appliqué pour limiter les fuites spectrales et réduire les discontinuités aux extrémités du signal. Comme les signaux étudiés sont aléatoires et non périodiques, des fenêtres telles que celles de Hamming, Hanning ou Gaussienne sont utilisées pour atténuer les effets de bord [11]. Cela permet d'améliorer la qualité du spectre obtenu. Ensuite, afin de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel, une Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform, FFT) est utilisée [12].

Moyennage : Le moyennage permet de lisser les variations aléatoires dû au bruit ou à la variabilité du signal. De plus, il

permet un moyennage des valeurs d'impédance pour chaque fréquence détectée sur une fenêtre temporelle choisie plus petite que la constante de temps de variation de l'impédance de la batterie, ceci afin de fiabiliser les mesures obtenues.

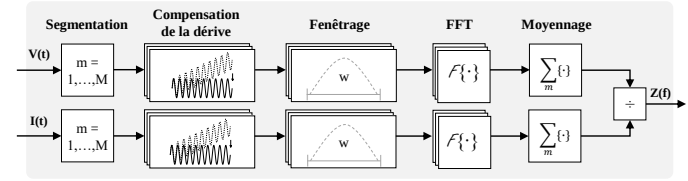


FIG. 2. Méthode de traitement du signal pour la mesure d'impédance en régime dynamique

Le paramétrage de cet algorithme joue un rôle déterminant dans la précision des mesures d'impédance. En effet, des paramètres tels que les fréquences de coupure des filtres, la durée et le recouvrement des segments, le nombre de points par segment ou encore le temps de moyennage influencent significativement le spectre d'impédance obtenu. Cette flexibilité constitue l'un des principaux avantages de la méthode.

Développé sous MATLAB et validé par des simulations, l'algorithme permet d'estimer l'impédance aux fréquences présentes dans le cycle, dans des conditions dynamiques. À présent, l'objectif est de tester cette méthode à l'aide de mesures réalisées sur banc d'essai, issues de véritables cycles de conduite.

3. APPLICATION SUR UN CYCLE DE CONDUITE RÉEL

Les tests sont réalisés sur une cellule cylindrique Samsung ICR18650-26F, dont la cathode est composée de NMC111, avec une tension nominale de 3,7 V et une capacité nominale de 2600 mAh.

3.1. Banc d'essai et caractérisation de la cellule

Une charge électronique Chroma, connectée en parallèle à une source ITECH, permet un contrôle précis du courant imposé à la batterie. Les tensions et courants circulant dans le circuit sont visualisés et mesurés avec précision à l'aide d'un oscilloscope Tektronix. La variation de tension induite par l'excitation en courant étant très faible, un gain et un offset sont appliqués via une carte de calibration afin d'optimiser la résolution de la mesure de tension. L'ensemble du dispositif est piloté par une interface LabVIEW, qui assure l'enregistrement automatique des données de tension, de courant et de température.

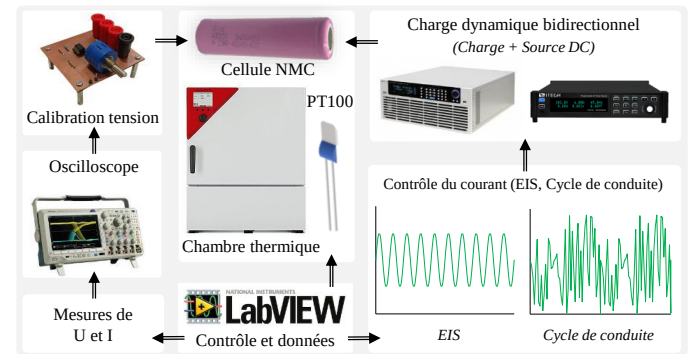


FIG. 3. Banc d'essai utilisé pour la campagne de mesure

Ce banc d'essai (Fig. 3), équipé d'une chambre thermique, permet de tester des cellules à différentes températures. En complément de la mesure de température interne de la chambre, un dispositif de mesure de température de surface a été intégré. Pour cela, une sonde PT100 connectée en configuration quatre fils à une carte National Instruments via un système Compact-DAQ permet de mesurer la température de surface de la cellule avec précision [13]. Par ailleurs, la mesure de la tension en cir-

cuit ouvert (OCV) combinée à un comptage coulométrique permet d'estimer l'état de charge de la cellule. [14].

Avant de tester l'EIS passive à travers un cycle de conduite, une campagne de caractérisation de la cellule a d'abord été réalisée à l'aide de mesures EIS de référence. Ce banc permet en effet de caractériser les cellules en fonction du courant, de la température et du SoC.

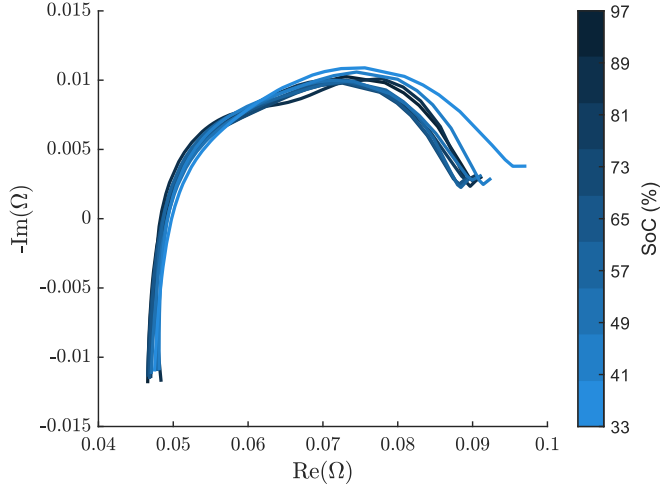


FIG. 4. Spectres d'impédance de référence réalisés à différents SoC, à 0.5A, à 5°C

Les spectres EIS de référence ainsi obtenus, associés aux mesures de température de surface et au SoC, permettront de valider les résultats obtenus par EIS passive.

3.2. Impédances mesurées dans le cycle de conduite

Cette partie est donc consacrée à l'analyse fréquentielle d'un cycle de conduite et des impédances qui en résultent. La puissance du bus DC mesurée lors d'un cycle de conduite réel d'un poids lourd sur l'itinéraire Lyon–Milan constitue la base de cette étude. À partir de la tension du bus et d'une stratégie de gestion de l'énergie, le courant requis à la batterie a pu être estimé. Le signal initial a été échantillonné à une fréquence de 1 Hz, ce qui limite l'observation des perturbations dynamiques à celles inférieures à cette fréquence. Toutefois, avant de considérer des signaux à plus haute fréquence d'échantillonnage – et donc d'intégrer des perturbations plus fines – il est pertinent d'évaluer la présence de composantes fréquentielles inférieures à 1 Hz dans le cycle Lyon–Milan.

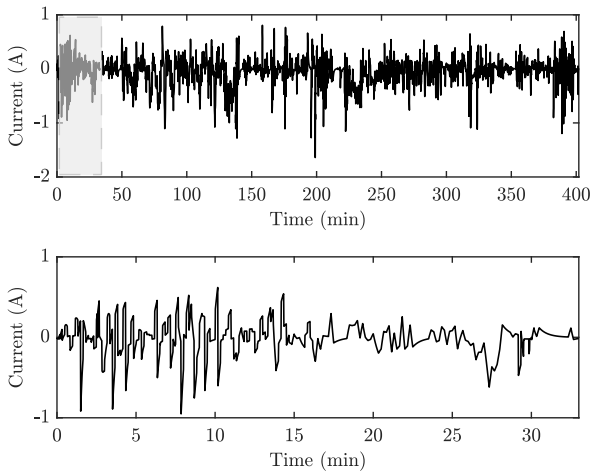


FIG. 5. Cycle de conduite entre Lyon et Milan sur une durée de 7 heures, avec un zoom sur les 33 premières minutes

Pour ce faire, le profil de courant dans la batterie a été reproduit à l'aide du banc d'essai décrit précédemment, permettant d'injecter fidèlement le signal souhaité. Lors de cette expérimentation, le signal mesuré a été échantillonné à 50 Hz afin de maximiser la résolution temporelle et le nombre de points par segment. Étant donné que le cycle complet Lyon–Milan dure environ 7 heures, seules les 33 premières minutes ont été retenues pour cette étude en raison du nombre de points à enregistrer. (Fig. 5).

Il convient également de noter que le cycle d'origine repose sur un pack batterie complet, tandis que les travaux expérimentaux ultérieurs sont réalisés à l'échelle d'une cellule. Un facteur d'échelle a donc été appliqué afin d'adapter le courant mesuré au courant nominal de la cellule testée.

Le cycle de 33 minutes a donc été testé à des températures de 25°C et 5°C, dans le but d'analyser la réponse en tension et en courant pour ces deux conditions thermiques, à l'aide de l'algorithme de traitement du signal dédié à la mesure passive et dynamique de l'impédance. Étant donné la fréquence d'échantillonnage du cycle (1 Hz) et conformément au théorème de Shannon, la fréquence maximale détectable est limitée à 0.5 Hz. L'algorithme est configuré pour des segments de 100 points, ce qui permet une détection précise de la fréquence de 0.5 Hz pour l'harmonique de rang 1, lorsque celle-ci est présente.

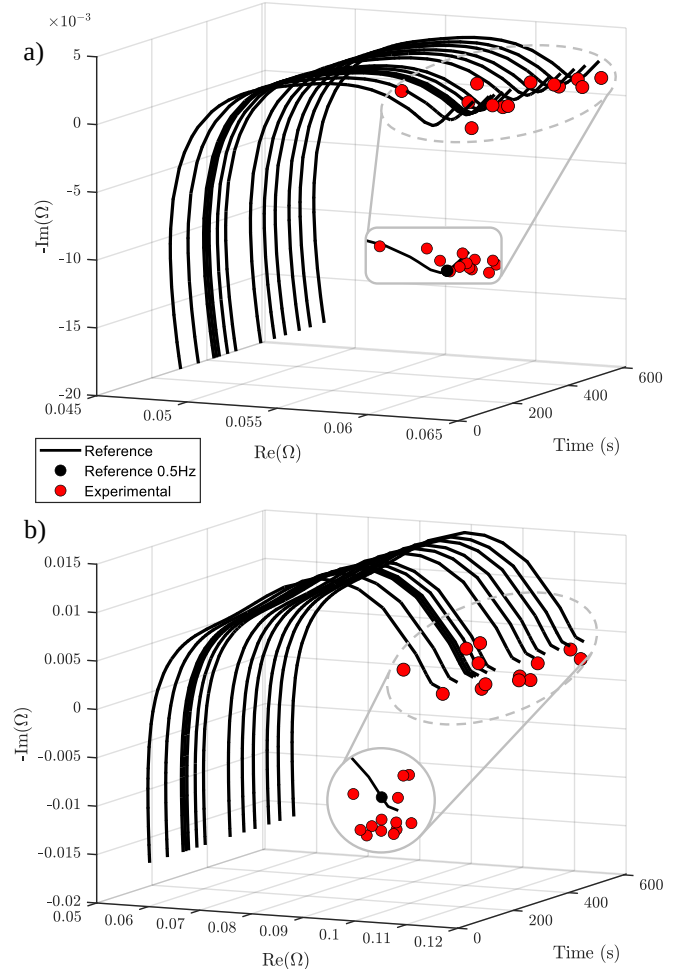


FIG. 6. Mesures d'impédance aux fréquences détectées dans le cycle à 25°C a) et 5°C b) comparées aux EIS de référence

L'utilisation de cet algorithme est particulièrement importante dans ce cycle, où le SoC, la température et le courant évoluent de manière dynamique. Ainsi, la segmentation du signal et la correction de dérive dans chaque segment sont indispensables pour garantir un calcul précis de l'impédance. Chaque

segment contient 100 points, avec un taux de recouvrement de 90 %, sur une durée totale de 2000 secondes, ce qui conduit à environ 10 000 segments. Le contenu fréquentiel de chaque segment est alors analysé à la fréquence d'échantillonnage choisie (50 Hz).

Les 33 premières minutes du cycle ont été injectées par le dispositif Chroma à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz, tandis que les signaux ont été acquis à une fréquence de 50 Hz. Les premiers résultats (Fig. 6) révèlent la détection d'impédances à une fréquence de 0.5 Hz sur l'ensemble de la durée du signal, à des températures de 25°C et 5°C. Une représentation de l'impédance en fonction du temps est présentée afin d'illustrer que la fréquence de 0.5 Hz est détectée entre 0 et 800 secondes, mais ne l'est plus au-delà. Cela met en évidence la difficulté d'anticiper le contenu fréquentiel d'un signal. Les EIS de référence, préalablement établies, ont pu être associées grâce à l'estimation du SoC et de la température de surface. Cela permet d'établir les premiers résultats : à savoir, des points mesurés proches de l'impédance de référence à 0.5 Hz.

Les points d'impédance légèrement décalés par rapport à la référence sont dus à l'étude de signaux non linéaires et non périodiques. Ces facteurs ont un effet significatif sur la mesure de l'impédance, ce qui rend moins fiable l'analyse basée sur un seul point. C'est précisément pour cette raison que l'on a introduit la notion de moyennage. Par ailleurs, en raison de la segmentation temporelle et du recouvrement des fenêtres d'analyse, une même fréquence peut être détectée à plusieurs reprises. Il est donc pertinent aussi de moyenner les valeurs d'impédance associées à une même fréquence sur une période donnée. Cette durée de moyennage ne doit pas trop être étendue car divers phénomènes électrochimiques engendrés par les variations de température ou l'évolution de l'état de charge — peuvent influencer l'impédance et, par conséquent, déformer le spectre obtenu. Dans notre cas, les mesures ont été effectuées à température extérieure constante, et l'impédance s'est révélée peu sensible à l'état de charge dans ces conditions. Cette stabilité a été confirmée par des EIS de référence réalisées avant et après le cycle, ainsi que par des mesures de température de surface. Pour déterminer une durée de moyennage optimale, trois valeurs ont été testées : 50, 100 et 200 secondes. L'évaluation de la meilleure option repose sur le calcul de l'écart relatif entre les mesures du cycle et la référence, à la fréquence de 0.5 Hz (Fig. 7). Naturellement, plus le temps de moyennage est long, moins le nombre de points disponibles est élevé.

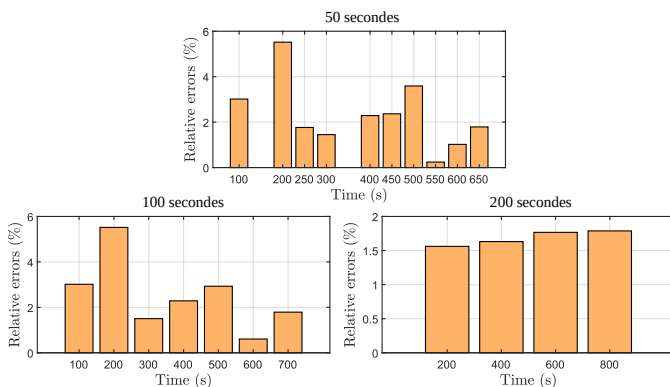


FIG. 7. Erreurs relatives pour les moyennages de l'impédance sur 50, 100 et 200 secondes pour le cycle Lyon/Milan

À ce stade, il est difficile de définir un seuil précis pour l'erreur relative à ne pas dépasser. L'approche retenue consiste donc à identifier la durée de moyennage pour laquelle la variation de l'erreur relative est la plus faible. Plus tard, la durée de moyennage sera fixée en fonction de la constante de temps thermique et de la variation du SoC. L'analyse des erreurs relatives issues des histogrammes montre que le moyennage sur 200 secondes est le plus pertinent. Dans ce cas, l'erreur relative reste inférieure

à 2 %, ce qui constitue un résultat satisfaisant pour la suite de l'étude.

Les impédances mesurées à 25°C et 5°C au cours du cycle sont donc moyennées sur cette durée (Fig. 8).

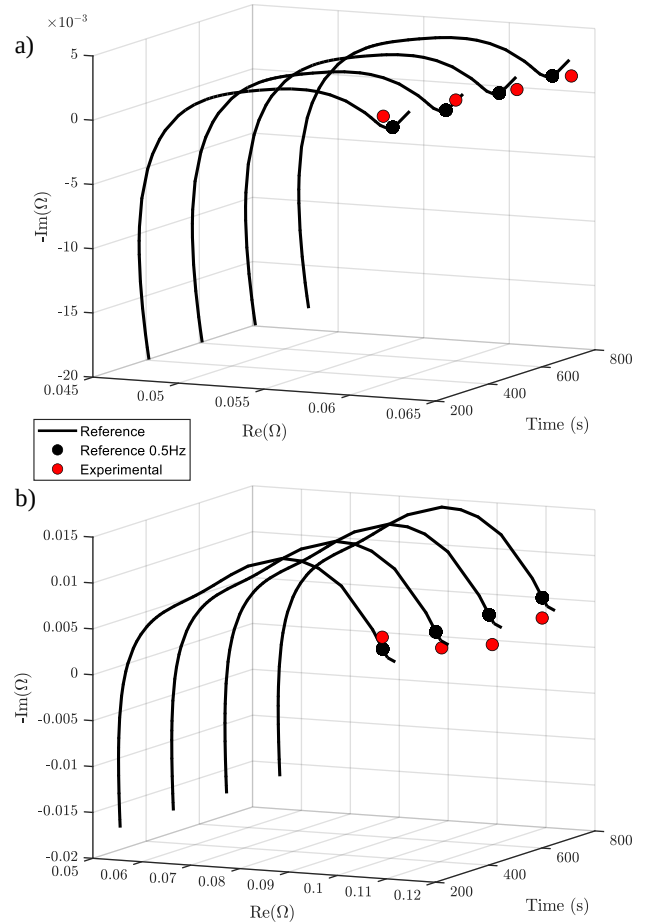


FIG. 8. Impédances moyennées sur 200 secondes à 25°C a) et 5°C b)

Sur l'ensemble du cycle, 4 impédances sont donc identifiées et comparées aux EIS de référence correspondantes. Le point noir correspond à la référence à 0.5 Hz, tandis que le point rouge représente le résultat obtenu après moyennage. Une bonne corrélation est observée entre la fréquence de référence et celle détectée au cours du cycle de conduite.

Dans une approche de diagnostic visant à estimer l'état de santé des batteries, une identification paramétrique du modèle électrique équivalent (Equivalent Circuit Model, ECM) est nécessaire afin de faciliter l'analyse.

3.3. Estimation des paramètres ECM en vue du diagnostic

L'estimation du SoH des batteries lithium-ion est un enjeu central pour l'évaluation de leur durée de vie. Parmi les approches disponibles, celle basée sur les modèles de circuits électriques équivalents s'est largement imposée, notamment grâce à sa capacité à relier les phénomènes électrochimiques internes à des éléments électriques mesurables [15, 16].

Plusieurs travaux ont montré que des paramètres clés de l'ECM — tels que la résistance ohmique (R_Ω), la résistance de la couche SEI (R_{SEI}) et la résistance de transfert de charge (R_{CT}) — varient avec le vieillissement [17, 18].

L'approche adoptée dans cette étude repose sur l'identification de ces paramètres à partir d'EIS de référence et d'EIS passive, en s'appuyant sur un modèle ECM (Fig. 9) validé par la littérature [19].

Il est observé que la somme des résistances R_Ω , R_{SEI} et R_{CT} correspond à la zone de transition entre le transfert de charge et

la diffusion, généralement localisée autour de 0,5 Hz pour les cellules utilisées. Cette fréquence, identifiée au sein du cycle de conduite Lyon-Milan, est ainsi exploitée : l'impédance réelle mesurée à cette fréquence est directement assimilée à la résistance série de la batterie ($R_{\Omega} + R_{SEI} + R_{CT}$). La cohérence observée entre l'évolution de cette résistance série, issue de la mesure passive, et celle des paramètres extraits des EIS de référence permet d'interpréter cette mesure comme un indicateur pertinent du vieillissement.

C'est d'ailleurs pour cette raison que l'association de l'EIS passive à une EIS de référence doit être la plus fiable possible. En effet, la capacité à différencier les valeurs de la résistance série à différentes températures, grâce à la mesure de la température de surface, permet de discriminer les variations dues au SoH. Il en va de même pour l'estimation du SoC, qui permet de dissocier les effets du SoC de ceux du SoH.

Cette observation ouvre ainsi la voie à l'utilisation de la mesure passive comme indicateur indirect du vieillissement de la batterie.

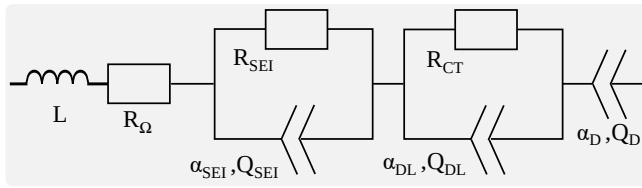


FIG. 9. Modèle électrique équivalent de batterie

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, une méthode de mesure d'impédance a été développée afin d'analyser le contenu fréquentiel d'un cycle de conduite et d'en déduire l'impédance associée. Cette méthode repose sur un algorithme de traitement du signal intégrant la segmentation, la compensation de la dérive et le moyennage. L'algorithme proposé permet non seulement d'identifier les composantes fréquentielles présentes dans le cycle, mais aussi de le faire en régime dynamique, c'est-à-dire lorsque l'état de charge et la température varient.

Un banc d'essai a été utilisé pour injecter des cycles de conduite réels, permettant ainsi d'analyser la réponse en tension du système. Grâce à la mesure de la température de surface et à l'estimation du SoC, il est possible de mettre en correspondance les mesures d'impédance obtenues avec une EIS de référence. Une identification des paramètres d'un modèle ECM a également été réalisée, dans le but d'évaluer d'éventuelles variations de l'état de santé de la batterie.

Dans les travaux futurs, l'objectif sera d'analyser des cycles de conduite avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée, afin d'étendre la plage de fréquence détectable par la méthode. De plus, une estimation de la température interne à l'aide d'un modèle thermique permettrait d'améliorer la précision de l'association entre l'EIS de référence et l'impédance mesurée en conditions dynamiques.

5. REMERCIEMENTS

This work has been supported by the EIPHI Graduate school (contract "ANR-17-EURE-0002" and the Region of Bourgogne Franche-Comté).

The HYSySPeM project was funded by the "France 2030" government investment plan managed by the French National Research Agency, under the reference ANR-22-PEHY-0018.

6. RÉFÉRENCES

[1] Forum International des Transports. *Perspectives des transports FIT 2023*. Perspectives des transports FIT. OECD, April 2024.

[2] Daniel Depernet, Abdellah Narjiss, Frédéric Gustin, Daniel Hissel, and Marie-Cécile Péra. Integration of electrochemical impedance spectroscopy functionality in proton exchange membrane fuel cell power converter. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(11):5378–5388, March 2016.

[3] Yanlin Xiao, Lijun Yang, Xu Wu, Xiyang Zhong, Ping Wang, Yupeng Liu, Siqian Li, and Sidun Fang. Passive measurement of the dynamic electrochemical impedance spectroscopy of a module-level battery based on a programmable electronic load. *Journal of Power Sources*, 635:236517, April 2025.

[4] Nils Lohmann, Peter Haussmann, Patrick Wesskamp, Joachim Melbert, and Thomas Musch. Employing Real Automotive Driving Data for Electrochemical Impedance Spectroscopy on Lithium-Ion Cells. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4(2):308–317, April 2015.

[5] Bernhard Liebhart, Lidiya Komsiyyska, and Christian Endisch. Passive impedance spectroscopy for monitoring lithium-ion battery cells during vehicle operation. *Journal of Power Sources*, 449:227297, February 2020.

[6] Bowen Yang, Dafang Wang, Beike Yu, Facheng Wang, Shiqin Chen, Xu Sun, and Haosong Dong. Research on online passive electrochemical impedance spectroscopy and its outlook in battery management. *Applied Energy*, 363:123046, June 2024.

[7] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, Ch. Wimmer, T. Soczka-Guth, and D.U. Sauer. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. *Journal of Power Sources*, 196(12):5334–5341, June 2011.

[8] Ranjun Huang, Xueyuan Wang, Bo Jiang, Siqi Chen, Guangxu Zhang, Jiangong Zhu, Xuezhe Wei, and Haifeng Dai. Revealing the electrochemical impedance characteristics of lithium-ion battery (nickel-cobalt-aluminum vs. graphite) under various alternating current amplitudes. *Journal of Power Sources*, 566:232929, May 2023.

[9] Aurelien Lievre, Ali Sari, Pascal Venet, Alaa Hijazi, Mathilde Ouattara-Brigaudet, and Serge Pelissier. Practical Online Estimation of Lithium-Ion Battery Apparent Series Resistance for Mild Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6):4505–4511, June 2016.

[10] C. A. Schiller, F. Richter, E. Gülzow, and N. Wagner. Validation and evaluation of electrochemical impedance spectra of systems with states that change with time. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 3(3):374–378, 2001.

[11] Jérôme Antoni and Johan Schoukens. A comprehensive study of the bias and variance of frequency-response-function measurements: Optimal window selection and overlapping strategies. *Automatica*, 43(10):1723–1736, October 2007.

[12] Ulrich Oberst. The Fast Fourier Transform. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 46(2):496–540, January 2007.

[13] Thomas Brand. Simple Realization of a Fully Integrated 4-Wire RTD Temperature Measurement System for High Precision Measurement Applications. 2019.

[14] R. Ranjith Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, S. Devakirubakaran, K. Sathya Sekar, and Lucian Mihet-Popa. Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications. *IEEE Access*, 11:105761–105809, 2023.

[15] Sara Drvarič Talian, Sergio Brutti, Maria Assunta Navarra, Jože Moškon, and Miran Gaberscek. Impedance spectroscopy applied to lithium battery materials: Good practices in measurements and analyses. *Energy Storage Materials*, 69:103413, May 2024.

[16] Xinghao Du, Jinhao Meng, Yassine Amirat, Fei Gao, and Mohamed Benbouzid. Exploring impedance spectrum for lithium-ion batteries diagnosis and prognosis: A comprehensive review. *Journal of Energy Chemistry*, 95:464–483, August 2024.

[17] Jiahua Li, Taotao Li, Yajun Qiao, Zijian Tan, Xianghui Qiu, Hui Deng, Wei Li, Xiao Qi, and Weixiong Wu. Internal temperature estimation method for lithium-ion battery based on multi-frequency imaginary part impedance and GPR model. *Journal of Energy Storage*, 118:116287, May 2025.

[18] Zheyuan Pang, Kun Yang, Zhengxiang Song, Pengcheng Niu, Guangyang Chen, and Jinhao Meng. A new method for determining SOH of lithium batteries using the real-part ratio of EIS specific frequency impedance. *Journal of Energy Storage*, 72:108693, November 2023.

[19] Sudnya Vaidya, Daniel Depernet, Salah Laghrouche, and Daniela Chrenko. State of temperature detection of Li-ion batteries by intelligent gray box model. *Journal of Power Sources*, 585:233624, November 2023.