

Estimation de l'état de santé des batteries lithium-ion par spectroscopie d'impédance passive en conditions dynamiques

Jules MILLET¹, Daniel DEPERNET¹, Ali SARI², Frédéric GUSTIN¹, Hugo HELBLING²

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

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

jules.millet@utbm.fr

RÉSUMÉ - La spectroscopie d'impédance électrochimique (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) est une méthode couramment utilisée pour évaluer l'état de santé des batteries lithium-ion. Toutefois, cette méthode requiert un système d'excitation dédié et ne peut généralement être appliquée qu'en régime stationnaire, ce qui complique fortement son intégration embarquée. L'objectif de ce travail est de développer une méthode d'EIS passive ne nécessitant aucun dispositif d'excitation externe et capable d'estimer l'impédance en conditions de fonctionnement dynamiques. L'article propose pour cela une méthode de mesure d'impédance fondée sur l'analyse du contenu harmonique naturellement présent dans les cycles de conduite des véhicules électriques. Pour ce faire, un algorithme de traitement du signal a été développé afin d'extraire et d'analyser ces harmoniques, tout en compensant les effets non stationnaires liés au courant. Cette approche permet, à l'aide du modèle développé dans cette étude, d'estimer l'état de santé de la cellule. La méthodologie est validée expérimentalement sur deux cellules lithium-ion soumises à des conditions dynamiques représentatives, avec une erreur d'estimation du SoH inférieure à 1 % par rapport à la valeur de référence obtenue par comptage de coulombs.

ABSTRACT - Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) is a method commonly used to assess the state of health of lithium-ion batteries. However, this technique requires a dedicated excitation system and can generally only be applied under steady-state conditions, which greatly complicates its onboard integration. The objective of this work is to develop a passive EIS method that does not require any external excitation device and is capable of estimating impedance under dynamic operating conditions. To this end, the paper proposes an impedance measurement approach based on the analysis of the harmonic content naturally present in electric vehicle driving cycles. A signal-processing algorithm was developed to extract and analyze these harmonics while compensating for non-stationary current effects. Using the model developed in this study, this approach enables the estimation of the cell's state of health. The methodology is experimentally validated on two lithium-ion cells under representative dynamic operating conditions, achieving a SoH estimation error below 1% compared with the reference value obtained through coulomb counting.

MOTS-CLES - EIS Passive, SoH Batterie, Cycle de conduite, ECM

1. Introduction

Au cœur de la transition énergétique, le secteur des transports reste aujourd'hui l'un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre [1]. Depuis plusieurs années, la tendance est donc au remplacement progressif des motorisations thermiques par des solutions électriques, qui permettent de réduire fortement les émissions de CO₂ lors de l'utilisation. Dans ce contexte, les batteries jouent un rôle central, notamment pour les applications de mobilité où les questions de performance, de durée de vie et de fiabilité deviennent essentielles.

Dans le cadre du plan d'investissement France 2030, différents programmes de recherche ont été mis en place pour améliorer les technologies liées au stockage et à la gestion de l'énergie. Le projet HYSySPEM, dans lequel s'inscrit ce travail, s'intéresse plus largement aux systèmes énergétiques hybrides destinés au transport lourd, comme les camions ou le domaine maritime.

Même lorsque plusieurs sources d'énergie coexistent au sein d'un même système, la batterie reste un élément clé. Elle est particulièrement sollicitée lors des phases transitoires, par exemple lors des accélérations, des variations de charge ou de la récupération d'énergie. Mieux comprendre son comportement et suivre son état de santé (State of Health, SoH) apparaît donc comme un enjeu majeur pour garantir la performance globale et la durabilité des solutions de mobilité électrique.

Ces recherches visent donc à évaluer l'état de santé 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, l'EIS, largement utilisée, est une solution prometteuse pour caractériser ces sources d'énergie en conditions embarquées.

Néanmoins, la mise en œuvre classique de l'EIS nécessite la génération d'un signal d'excitation dédié ainsi que le maintien de la batterie dans un état quasi stable, ce qui complique fortement son utilisation à bord d'un véhicule. La méthode proposée dans cet article vise justement à s'affranchir de ces contraintes en réalisant une mesure d'impédance en régime dynamique, en exploitant le contenu harmonique naturellement présent dans le système, sans perturber la disponibilité du véhicule. L'objectif est ainsi de remonter jusqu'au SoH de la batterie à partir de cette mesure.

2. Mesure d'impédance embarquée

L'EIS est une méthode qui consiste à injecter des stimuli de courant autour d'un point de fonctionnement fixe (régime stationnaire) afin de déterminer l'impédance de la batterie. Cependant, en embarqué, cette stationnarité est difficile à maintenir. Dans la littérature, des spectres d'impédance ont été tracés en fonction du courant, de la température, de l'état de charge (State of Charge, SoC) et du SoH, montrant que ces conditions impactent plus ou moins la stationnarité du système [2, 3]. Toutefois, chaque phénomène ne possède pas les mêmes constantes de temps : le courant a un effet quasi instantané sur l'impédance, alors que le SoH évolue sur des constantes de temps beaucoup plus longues [4]. Compte tenu de ces éléments, dans cette étude, où une analyse est réalisée sur des segments de l'ordre de la seconde, le courant est considéré comme le principal responsable de la non-stationnarité.

Concernant le stimulus de courant, il est généralement généré par différents appareils en laboratoire. Cependant, en embarqué, des moyens spécifiques doivent être mis en place. Deux méthodes ont alors été identifiées : l'EIS active et l'EIS passive. Dans la première approche, nommée EIS active, une étude a montré qu'il était possible de générer ce stimulus par le biais du convertisseur de puissance [5]. Cette méthode consiste à faire varier la modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation, PWM) afin de produire le signal d'excitation souhaité. Elle nécessite cependant de bloquer la source à un point de fonctionnement fixe et de synchroniser le traitement du signal avec le convertisseur. Une deuxième approche a alors été identifiée [6, 7, 8], appelée EIS passive, proposant d'exploiter le contenu harmonique naturellement présent dans le cycle de conduite. Ces travaux présentent des spectres obtenus à partir de ce contenu harmonique, montrant ainsi la faisabilité de cette approche.

Une étude a donc été menée afin d'identifier le contenu harmonique naturel potentiellement exploitable pour effectuer une EIS passive. Les convertisseurs de puissance utilisés dans la chaîne de traction génèrent des harmoniques de courant sur le bus continu. Ces harmoniques sont directement liées aux lois de commande des onduleurs, en particulier à la PWM. Le choix de la stratégie de modulation influence à la fois l'amplitude et la fréquence des composantes harmoniques observées sur le bus DC. Le spectre harmonique obtenu est relativement étendu, s'échelonnant de quelques dizaines de hertz à plusieurs kilohertz. En amplitude, les principales harmoniques basses fréquences du courant du bus continu sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} par rapport courant nominal de phase [9, 10, 11].

Ainsi, dans l'objectif d'exploiter ces mesures en conditions dynamiques, un algorithme de traitement du signal a été développé afin d'extraire les composantes fréquentielles exploitables et de corriger les effets liés à la non-stationnarité du courant. Le principe de cet algorithme repose sur l'identification du contenu harmonique présent dans le cycle de conduite puis sur l'estimation de l'impédance associée à chaque fréquence détectée. Une description détaillée ainsi qu'une validation spécifique de cet algorithme sont présentées dans [12].

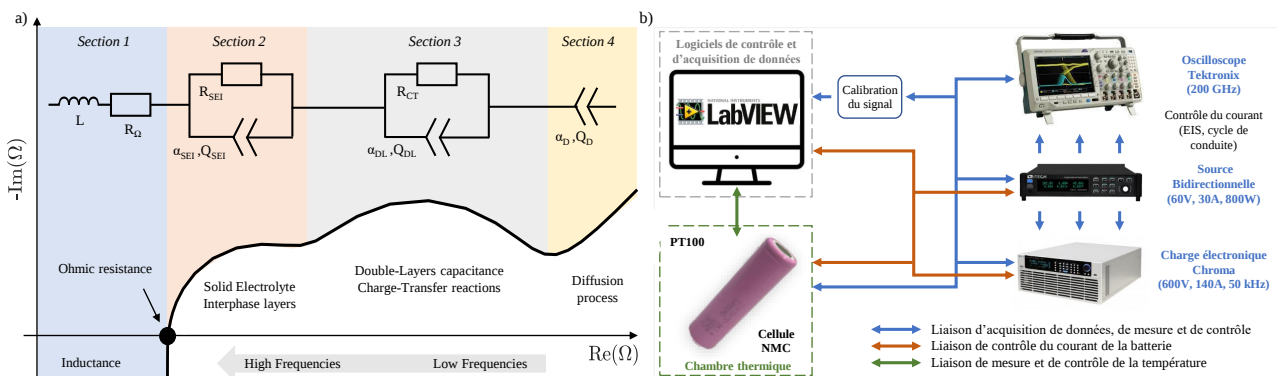


Figure 1: a) Phénomènes électrochimiques associés aux paramètres ECM, b) Banc d'essai

Un modèle a été développé afin d'exploiter ces mesures d'impédance pour en déduire le SoH. Ce modèle, basé sur un circuit électrique équivalent (Equivalent Circuit Model, ECM), permet d'associer les phénomènes électrochimiques

prédominants de la cellule à des composants électriques (Figure 1.a). Ainsi, à l'image des spectres d'impédance, les paramètres du modèle varient en fonction de la température, du SoC et du SoH.

Sur cette base, des modèles mathématiques ont été construits afin de pouvoir, à partir d'une mesure passive d'impédance embarquée, de mesures de température et d'une estimation du SoC, remonter jusqu'au SoH de la cellule.

3. Identification du modèle ECM pour l'estimation du SoH

Dans cette étude, le SoH est défini à partir de la capacité mesurée de la cellule. Il est calculé comme le rapport entre la capacité disponible lors de la caractérisation et la capacité nominale de la cellule à l'état neuf :

$$SoH = \frac{C_{mesurée}}{C_{nominale}} \times 100 \quad (1)$$

La capacité mesurée est déterminée par comptage de coulombs lors d'une décharge complète réalisée entre 4.2 V et 2.7 V à 25 °C.

Cette valeur de SoH sert de référence pour la construction du modèle. Les paramètres identifiés à partir de l'ECM sont ainsi associés aux valeurs de SoH obtenues expérimentalement, afin d'établir une relation entre l'évolution de l'impédance de la cellule et son état de santé. Les paramètres ECM constituent ainsi des indicateurs permettant de quantifier indirectement le vieillissement de la cellule à partir des mesures d'impédance.

La construction du modèle est une étape essentielle pour l'estimation de l'état de santé. Le modèle reliant les paramètres de l'ECM à la température, au SoC et au SoH est établi à partir d'EIS de référence réalisées sur une cellule saine.

3.1 Banc d'essai

Un dispositif de laboratoire permet un contrôle précis du courant appliqué à la cellule. La tension et le courant sont mesurés afin de permettre l'EIS. Un circuit de calibration, plus une sélection des plages sur l'oscilloscope permet d'assurer une mesure fiable du courant et de la tension. L'ensemble du banc d'essai est contrôlé pour assurer l'enregistrement des données de tension, de courant et de température de surface de cellule (Figure 1.b). Le banc est également équipé d'une chambre thermique, ce qui permet de tester la cellule dans différentes conditions de température.

Ce banc expérimental est conçu pour la caractérisation de cellules par EIS. Les mesures peuvent être réalisées dans des conditions maîtrisées de courant, de température et SoC. Les données sont ensuite traitées par un algorithme qui analyse les signaux à chaque fréquence injectée. Il adapte la fréquence d'échantillonnage et la fenêtre d'acquisition afin d'obtenir un nombre optimal de points de mesure, garantissant ainsi une estimation précise de l'impédance.

Afin d'étudier le comportement de l'impédance en fonction du SoH, des cellules sont cyclées en courant. Le banc permet ainsi de caractériser ces cellules par EIS.

3.2 Caractérisation de la cellule

La caractérisation de la cellule est une étape cruciale pour comprendre le comportement de l'impédance en fonction du courant, du SoC, de la température et du SoH. Les travaux ont été réalisés sur une cellule lithium-ion de technologie NMC (Nickel Manganèse Cobalt), couramment utilisée dans les applications de mobilité électrique. Les principales caractéristiques de la cellule sont une capacité nominale de 2.6 Ah, une tension nominale de 3.6 V et une plage de fonctionnement comprise entre 2.7 V et 4.2 V.

Une campagne d'essais a donc été menée afin d'obtenir des EIS de référence en fonction de ces différents paramètres.

Les EIS ont été réalisées à courant nul afin de limiter les variations de température et d'état de charge. L'un des principaux intérêts de travailler dans ces conditions est de minimiser la puissance thermique dissipée par la cellule. Cela permet ainsi de caractériser précisément le comportement de l'impédance à la température extérieure imposée. Cette approche permettra par la suite de mieux associer les spectres de référence à la température de surface mesurée en temps réel.

En conséquence, une campagne de mesures a été réalisée à l'aide du système de supervision du banc d'essai, afin de caractériser finement le comportement de la cellule (Tableau I). Dans cette approche, un cyclage en courant a été retenu, car il offre un bon compromis entre une dégradation accélérée et un vieillissement représentatif des conditions réelles d'utilisation.

Quelques échantillons de ces diagrammes de Nyquist sont montrés dans la Figure 2.a et 2.b. Notamment, les spectres d'impédance en fonction de la température et du SoH mettent en évidence un impact marqué sur la variation de l'impédance de la cellule. Dans les deux cas, comme le montre la Figure 2, la capacité de double couche ainsi que

Tableau I: Protocole de mesure et de vieillissement pour la caractérisation EIS

#	Séquence de caractérisation	Conditions
1	Coulomb counting (mesure de capacité)	Décharge de 4.2 V à 2.7 V à 1 A, $T = 25^{\circ}\text{C}$
2	Mesures EIS à différents niveaux de SoC	Injection de courant à 0.5 C pour SoC = 100%, 65% et 30%, $T = 25^{\circ}\text{C}$
3	Répétition des mesures EIS à différentes températures	$T = 40^{\circ}\text{C}, 15^{\circ}\text{C}, 5^{\circ}\text{C}$ et -5°C
4	Phase de cyclage	50 cycles de charge/décharge à température ambiante, $I = 0.5\text{C}$
5	Répétition de la phase de caractérisation	Phase de caractérisation répétée tous les 50 cycles

la résistance de transfert de charge sont les paramètres les plus fortement affectés. Dans la littérature, ces variations sont largement décrites et attribuées notamment au dépôt de lithium (lithium plating), à la perte de surface active ou encore à la dissolution d'espèces ([13]).

Connaissant à présent le comportement de l'impédance dans ces différentes conditions, les paramètres du modèle ECM peuvent être déterminés afin de suivre leur évolution.

3.3 Paramètres ECM=f(SoC, T, SoH)

À partir du modèle de circuit électrique présenté précédemment (Figure 1.a), les valeurs des paramètres sont déterminées pour toutes les EIS en fonction du SoC, de la température et du SoH. Pour ce faire, un algorithme d'optimisation est utilisé afin de trouver la meilleure solution possible pour chaque paramètre. La fonction fmincon, disponible sous Matlab, permet de réaliser cette optimisation. Celle-ci se base sur des valeurs minimales, maximales et initiales afin d'optimiser chaque paramètre.

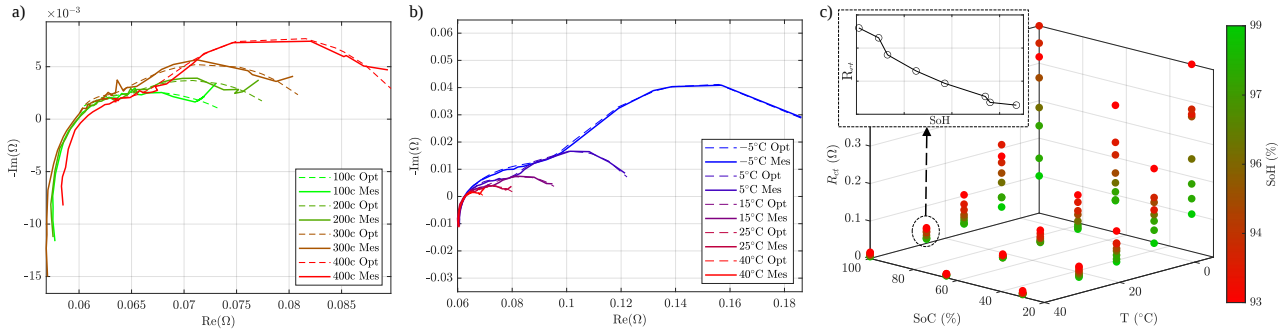


Figure 2: a) Spectres de référence à 25°C, 0A, 65% SoC pour différents SoH, b) Spectres de référence au 200ème cycle, 0A, 65% SoC pour différentes températures, c) Variation de R_{ct} en fonction de la température, du SoC et du SoH

La Figure 2.c montre l'évolution du paramètre R_{ct} en fonction du SoC, du SoH et de la température. Les points en vert correspondent aux valeurs de R_{ct} en début de vie, tandis que les points en rouge représentent les valeurs après 400 cycles réalisés. L'évolution de ce paramètre est ainsi visible pour les différentes conditions testées.

3.4 Mise en oeuvre du modèle

L'objectif de ce modèle est de déterminer le SoH de la cellule à partir de grandeurs d'entrée mesurées en conditions embarquées, telles que la température, le SoC et l'impédance. Ce modèle est construit sur la base de l'un des paramètres ECM identifiés précédemment. Pour cela, le paramètre issu du modèle ECM sélectionné doit présenter une variation significative en fonction du SoH. Le choix du paramètre R_{ct} repose sur sa forte sensibilité aux mécanismes de vieillissement des batteries lithium-ion, largement rapportée dans la littérature [14]. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude (Figure 2.c) confirment également une évolution marquée de ce paramètre avec le SoH. Bien que R_{ct} soit également influencé par la température et le SoC, ces variables sont prises en compte dans le modèle afin d'isoler leur contribution. Bien que d'autres paramètres de l'ECM présentent également une dépendance au vieillissement, les variations observées sur R_{ct} se sont révélées les plus exploitables dans les conditions étudiées. Ce paramètre a donc été retenu comme unique variable d'entrée du modèle, afin de limiter sa complexité tout en conservant une bonne sensibilité au vieillissement de la cellule. Il s'agit ici d'un modèle paramétrique simplifié fondé sur un paramètre issu de l'ECM, et non d'un modèle électrochimique complet.

En observant les figures 2.a et 2.b, on constate que les variations de l'impédance à basse température et à faible SoH (400 cycles) suivent des tendances similaires. Il devient donc essentiel, dans cette étude, de pouvoir distinguer les valeurs de la résistance de transfert de charge aux différentes températures. Le choix a ainsi été fait d'intégrer une mesure de la température de surface afin de dissocier les variations dues au SoH de celles liées à la température. La température de surface constitue également un indicateur indirect des sollicitations en courant, à travers la puissance thermique dissipée dans la cellule, et permet ainsi de prendre en compte une partie des effets thermiques induits par son fonctionnement dynamique. Enfin, le SoC demeure également un paramètre important, pris en compte par une méthode de comptage de coulombs (Coulomb Counting), permettant ainsi son estimation.

Au regard de la tendance observée sur la Figure 2.c, le choix s'est porté sur un modèle polynomial, jugé le plus à même de représenter fidèlement l'évolution des données. Ce polynôme relie donc la résistance de transfert de charge R_{ct} au SoC, à la température et au SoH. Les variables sont préalablement normalisées entre 0 et 1 afin d'éviter les effets d'échelle et d'améliorer la stabilité numérique du modèle.

Un polynôme de degré 2 est retenu pour cette équation, ce qui constitue un compromis entre la précision de l'ajustement et la complexité du modèle. Les non-linéarités observées expérimentalement peuvent être correctement représentées par des termes quadratiques sans recourir à des degrés supérieurs. L'équation (2) représente ainsi ce modèle, où l'indice n désigne les grandeurs normalisées.

L'estimation du SoH est ensuite obtenue par inversion de ce modèle polynomial. Cette inversion conduit à la résolution d'une équation du second degré en SoH_n , dont la solution est retenue avant dénormalisation afin de retrouver la valeur réelle du SoH.

$$R_{ct,n} = a_0 + a_1 SoC_n + a_2 T_n + a_3 SoH_n + a_4 SoC_n^2 + a_5 T_n^2 + a_6 SoH_n^2 + a_7 SoC_n T_n + a_8 SoC_n SoH_n + a_9 T_n SoH_n \quad (2)$$

4. Suivi du SoH en condition dynamique

Maintenant que le polynôme est construit et permet de remonter jusqu'au SoH, il est nécessaire de mesurer les différents paramètres en embarqué, que ce soit la température, le SoC ou encore l'impédance (paramètre R_{ct}).

L'objectif de cette étude est de travailler en conditions dynamiques. Un cycle a donc été retenu. 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 par la cellule a pu être estimé. Ce cycle a ensuite été utilisé afin de reproduire des conditions dynamiques représentatives, à savoir une dynamique de température intégrée au protocole et une dynamique du SoC découlant directement du profil de courant appliqué (Figure 3.a). Le contenu harmonique naturellement présent de ce cycle a donc été étudié dans ces conditions.

Tableau II: Protocole d'essai pour la mesure en condition dynamique

#	Processus	Valeurs
1	Mettre à température la chambre thermique	30 min avant le test à 25°C
2	Mesure OCV, Calcul SoC	Instantanément avant le test
3	Fixer la nouvelle température de la chambre thermique	5°C, condition dynamique
4	Injecter le cycle de conduite	1000 sec, Fe = 1 kHz
5	Recommencer l'injection du cycle tant que la température n'est pas atteinte	Répéter 5

Le protocole d'essai, présenté dans le Tableau II, a été mis en œuvre sur le banc décrit précédemment pour deux cellules présentant des SoH différents. Les mesures de courant, de tension et de température de surface sont enregistrées dans des fichiers qui sont ensuite traités par l'algorithme développé. Cet algorithme de traitement du signal permet ainsi d'évaluer l'impédance dans ces conditions en se basant sur le contenu naturel du cycle.

La Figure 3.b montre les mesures d'impédance obtenues pour la cellule 1, évoluant avec les conditions dynamiques. Un moyennage sur une fenêtre de 100 secondes a été retenu afin de disposer d'un nombre suffisant de composantes fréquentielles exploitables pour l'identification du spectre, tout en conservant une résolution temporelle compatible avec le suivi des variations de température et de SoC. Les 9 spectres d'impédance sont ensuite optimisés afin d'obtenir la valeur du paramètre R_{ct} et ainsi suivre son évolution. Par la même occasion, sur chaque plage de 100 secondes, le SoC moyen et la température de surface moyenne sont calculés, permettant d'obtenir l'ensemble des paramètres nécessaires

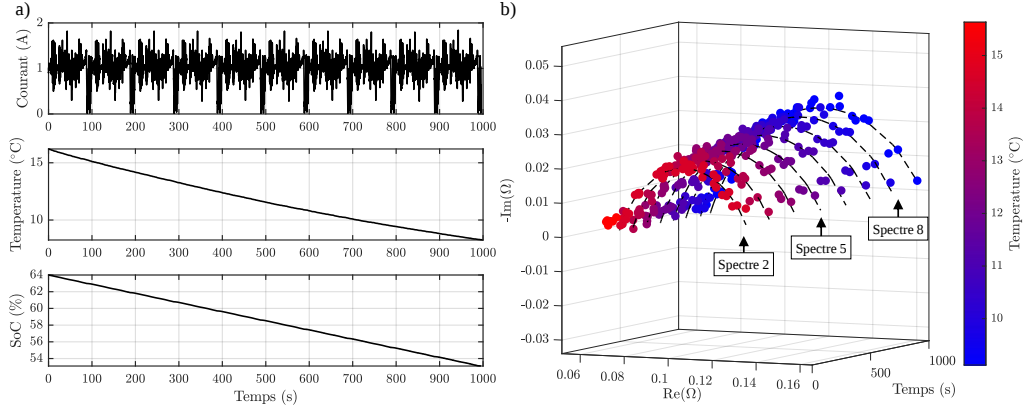


Figure 3: a) Cycle dynamique en courant, en température et en SoC mesuré, b) EIS Passive obtenue en condition dynamique pour la cellule 1

à l'estimation du SoH. Cette mesure a également été réalisée sur une deuxième cellule en suivant le même protocole. Les paramètres mesurés sont regroupés dans le Tableau III pour chaque cellule.

Ainsi, en utilisant le modèle polynomial, il devient possible de réaliser une estimation du SoH pour les deux cellules (Tableau III). Pour vérifier ces valeurs, un comptage de coulombs a été effectué au préalable pour identifier la capacité réelle de la cellule.

Tableau III: SoH estimé pour deux cellules différentes

Cellule 1 (SoH réel : 92.10%)					Cellule 2 (SoH réel : 97.13%)				
Spectre	$R_{ct}(\Omega)$	SoC (%)	Température (°C)	SoH (%)	Spectre	$R_{ct}(\Omega)$	SoC (%)	Température (°C)	SoH (%)
1	Pas assez de fréquences détectées				1	0.0374	99.44	13.89	96.43
2	0.0603	62.89	14.63	92.97	2	0.0242	98.35	12.89	97.50
3	0.0654	62.34	13.71	92.93	3	0.0339	97.27	11.92	97.00
4	0.0716	61.79	12.82	92.83	4	0.0302	96.18	11.00	97.39
5	0.0774	61.25	11.97	92.75	5	0.0355	95.10	10.08	97.24
6	0.0835	60.70	11.17	92.65	6	0.0335	94.01	9.21	97.52
7	0.0897	60.15	10.44	92.56	7	0.0469	92.93	8.36	97.98
8	0.0936	59.61	9.75	92.56	8	0.0349	91.84	7.55	97.77
9	0.1034	59.06	9.12	92.32	9	0.0521	90.75	6.77	97.08
SoH estimé moyenné (%)				92.69	SoH estimé moyenné (%)				97.21

Le SoH de référence calculé est de 92.10 % pour la cellule 1 et de 97.13 % pour la cellule 2, servant d'élément de comparaison pour les valeurs obtenues. Le SoH moyen a été calculé sur les 8 ou 9 spectres pour la cellule 1, soit 92.69 %, ce qui correspond à une erreur d'environ 0.64 % par rapport au SoH de référence. Pour la cellule 2, un SoH moyen de 97.21 % a été mesuré, donnant une erreur de 0.08 % par rapport à la valeur de référence. Ces résultats montrent que, lorsque le contenu harmonique est suffisant, il est possible d'estimer le SoH en conditions dynamiques.

5. Conclusion

Cet article a proposé une méthode permettant d'estimer le SoH à partir de l'impédance mesurée en régime dynamique et du contenu naturellement présent dans le système. Une bonne partie de cette méthode repose sur l'élaboration d'un algorithme de traitement du signal permettant de mesurer l'impédance dans ces conditions. Un modèle paramétrique a également été construit en fonction des paramètres influençant l'impédance, notamment le SoC, la température et le SoH. Les différents paramètres ont ainsi été mesurés sur un cycle représentatif de conditions réelles. Le SoH a pu être estimé avec une erreur inférieure à 1 % par rapport à la valeur de référence obtenue par comptage de coulombs.

L'approche proposée présente également un intérêt pour une intégration embarquée. En effet, la mesure d'impédance est obtenue à partir du contenu harmonique naturellement présent dans le système, sans nécessiter de générateur de perturbation dédié ni de modification de la stratégie de commande du véhicule. La méthode repose uniquement sur l'exploitation de mesures déjà disponibles au sein du BMS (courant, tension et température), ce qui réduit significativement les contraintes matérielles associées à sa mise en oeuvre.

Les résultats obtenus sur deux cellules montrent la faisabilité de l'approche proposée. Une validation sur un plus grand nombre de cellules permettra néanmoins de mieux quantifier la robustesse et la validité de la méthode.

Dans l'objectif d'améliorer cette estimation, l'intégration d'un modèle thermique permettant d'estimer la température interne de la cellule offrirait une évaluation plus précise de la température et permettrait ainsi de mieux discriminer l'influence de la température de celle du SoH.

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.

This work was supported by a grant from the French State, managed by the National Research Agency under the Investments for the Future program, reference ANR-21-ESRE-0033.

Références

- [1] Forum International des Transports. *Perspectives des transports FIT 2023*. Perspectives des transports FIT. OECD, April 2024.
- [2] Xinghao Du, Jinhao Meng, Yassine Amirat, Fei Gao, and Mohamed Benbouzid. Feature selection strategy optimization for lithium-ion battery state of health estimation under impedance uncertainties. *Journal of Energy Chemistry*, 101:87–98, February 2025.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Bernhard Liebhart, Lidiya Komsiyiska, and Christian Endisch. Passive impedance spectroscopy for monitoring lithium-ion battery cells during vehicle operation. *Journal of Power Sources*, 449:227297, February 2020.
- [8] 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.
- [9] B.P. McGrath and D.G. Holmes. A General Analytical Method for Calculating Inverter DC-Link Current Harmonics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(5):1851–1859, 2009.
- [10] Jianjun Hu, Ying Yang, Meixia Jia, Yongjie Guan, Chunyun Fu, and Shuiping Liao. Research on Harmonic Torque Reduction Strategy for Integrated Electric Drive System in Pure Electric Vehicle. *Electronics*, 9(8):1241, August 2020.
- [11] Cheng Guo, Ziyue Xin, Jing Han, Liangdeng Hu, and Bin Lu. Review of the calculation of DC-link capacitor current. *Frontiers in Energy Research*, 11:1240755, August 2023.
- [12] Jules Millet, Daniel Depernet, Ali Sari, Frédéric Gustin, and Hugo Helbling. Passive impedance spectroscopy of EV Lithium-ion batteries in transient operation. *Results in Engineering*, 29:109746, March 2026.
- [13] Charles Lorenzo, David Bouquain, Samuel Hibon, and Daniel Hissel. Synthesis of degradation mechanisms and of their impacts on degradation rates on proton-exchange membrane fuel cells and lithium-ion nickel–manganese–cobalt batteries in hybrid transport applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 212:107369, August 2021.
- [14] Qunming Zhang, Cheng-Geng Huang, He Li, Guodong Feng, and Weiwen Peng. Electrochemical Impedance Spectroscopy Based State-of-Health Estimation for Lithium-Ion Battery Considering Temperature and State-of-Charge Effect. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8:1–1, December 2022.