

# Approches de diagnostic basées sur l'impédancemétrie pour le suivi de l'état de santé des piles à combustible et batteries lithium-ion en usage embarqué

**Jules MILLET<sup>1</sup>, Daniel DEPERNET<sup>1</sup>, Ali SARI<sup>2</sup>, Frédéric GUSTIN<sup>3</sup>, Hugo HELBLING<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Université Marie et Louis Pasteur, UTBM, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France <sup>2</sup>

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

<sup>3</sup> Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-90000 Belfort, France

Le projet HYSySPEM vise à optimiser les systèmes énergétiques hybrides intégrant des piles à combustible multi-stacks et des batteries, destinés aux applications de transport lourd. Ces systèmes reposent sur l'association d'une pile à combustible et d'une batterie, éventuellement complétée par des convertisseurs de puissance pour améliorer la gestion énergétique.

Les travaux menés portent principalement sur l'évaluation de l'état de santé (SoH) de ces sources d'énergie, à travers le développement de méthodes de diagnostic fiables. La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS), déjà largement utilisée en laboratoire, a été retenue comme outil de caractérisation pour une utilisation en conditions embarquées.

La mise en œuvre de l'EIS nécessite de travailler en régime permanent et avec une source d'excitation, des conditions rarement réunies dans un système embarqué. Une étude de faisabilité a donc été menée sur les sources d'excitation disponibles dans le système, ainsi que sur la possibilité de travailler en régime dynamique.

Une première étape a consisté à représenter le comportement réel des piles et des batteries. Pour cela, des modèles dynamiques ont été élaborés à partir de modèles statiques. Ces modèles, obtenus via des mesures EIS de référence réalisées dans différentes conditions (courant, température, état de charge), ont permis de déterminer les paramètres des modèles de circuit équivalent associés à chaque source. Cette approche rend possible le suivi de l'impédance dans des situations proches de l'embarqué, c'est-à-dire en régime dynamique.

Afin de mesurer l'impédance dans ces conditions, une méthode de traitement du signal a été développée, reposant sur la segmentation des signaux et la compensation de la dérive [1]. Le choix a été fait de concevoir une méthode non intrusive, n'exigeant ni blocage de la commande, ni synchronisation complexe entre convertisseur de puissance et gestion d'énergie. Deux types d'EIS ont alors été distingués [2][3]:

- L'EIS active, lorsque le convertisseur de puissance génère des signaux d'excitation,
- L'EIS passive, qui exploite le contenu fréquentiel intrinsèquement présent dans le système,

Grâce à la méthode développée et aux modèles dynamiques, l'EIS en régime dynamique a pu être validée pour les deux types d'EIS.

Après validation de cette approche, un cycle de conduite réel (trajet Lyon–Milan) a été utilisé, permettant d'appliquer aux piles à combustible et aux batteries les profils de courant correspondants. Les résultats montrent une bonne corrélation entre l'EIS de référence et les mesures d'impédance en conditions dynamiques.

- [1] C. A. Schiller, F. Richter, E. Gülzow, et N. Wagner, « Validation and evaluation of electrochemical impedance spectra of systems with states that change with time », *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 3, n° 3, p. 374-378, 2001, doi: 10.1039/b007678n.
- [2] D. Depernet, A. Narjiss, F. Gustin, D. Hissel, et M.-C. Péra, « Integration of electrochemical impedance spectroscopy functionality in proton exchange membrane fuel cell power converter », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, n° 11, p. 5378-5388, mars 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.010.
- [3] B. Liebhart, L. Komsiyyska, et C. Endisch, « Passive impedance spectroscopy for monitoring lithium-ion battery cells during vehicle operation », *J. Power Sources*, vol. 449, p. 227297, févr. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227297.