

Un nouvel outil de diagnostic non intrusif d'une pile à combustible basé sur la mesure des singularités de la tension

Djedjiga BENOUIOUA^{1,2*}, Denis CANDUSSO^{1,2}, Fabien HAREL^{2,3}, Latifa OUKHELLOU⁴

¹ IFSTTAR / COSYS / LTN, 25 Allée des marronniers, F-78000 Versailles Satory.

² FC LAB, UTBM Bât. F, Rue Thierry Mieg, F-90010 Belfort Cedex.

³ Université de Lyon, IFSTTAR / AME / LTE, 25 Av. F. Mitterrand, Case24, Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex.

⁴ Université Paris Est, IFSTTAR / COSYS / GRETTIA, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2.

[*] Contact: djedjiga.benouioua@ifsttar.fr Tél.: +33 (0)3 84 58 36 13; Fax: +33 (0)3 84 58 36 36;
Autres adresses courriels: denis.candusso@ifsttar.fr, fabien.harel@ifsttar.fr, latifa.oukhellou@ifsttar.fr

RESUME – Nous nous proposons d'exploiter les informations révélées par la morphologie du signal de la tension d'une pile à combustible (PàC) de type PEM afin de développer un outil de diagnostic. L'essentiel de l'information contenue dans un signal « rugueux » se situe souvent dans ses singularités et ses structures irrégulières, la méthode des ondelettes et les outils d'analyse fractale apparaissent alors bien appropriés pour l'étude de signaux irréguliers tels que les tensions d'une PàC. Dans nos investigations, nous adoptons l'analyse multi-échelle fondée sur les ondelettes continues pour observer le comportement du signal de tension sur une large gamme d'échelles ; nous mettons en œuvre le formalisme multifractal basé sur les maxima locaux de la transformée en ondelettes (MMTO) afin de quantifier la force des singularités et leur distribution pour différentes conditions de fonctionnement de la PàC. La méthode développée permet de discriminer diverses conditions opératoires à l'aide des spectres de singularités calculés sur la seule base des signaux de tension d'une PàC.

MOTS-CLES – PEMFC, Diagnostic, Analyse de singularités, Ondelettes, Formalisme multifractal.

1. Introduction & Motivation

Les mécanismes de dégradation des piles à combustible (PàC) ne sont pas encore parfaitement connus et il existe aujourd'hui une réelle demande de la part des acteurs de la filière hydrogène pour le développement de nouveaux outils de diagnostic permettant d'identifier les conditions des défaillances à moindre coût. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de recherche du projet ANR DIAPASON 2 (<https://diapason2.eifer.uni-karlsruhe.de/index.php>) dont l'objectif principal est de mettre en œuvre des outils innovants de diagnostic non intrusif (avec une instrumentation limitée) pour les PàC de type PEM destinées à des applications transports et stationnaires. Dans la littérature, plusieurs méthodes de traitement du signal ont montré leurs performances pour le diagnostic des PàC, notamment : la transformée de Fourier [1] et les ondelettes [2]. Le nouvel outil de diagnostic proposé ici s'appuie sur une approche de traitement du signal innovante consistant à mesurer la signature de singularités estampillées dans le signal de la tension d'une PàC pour diverses conditions de fonctionnement (nominales et sévères).

2. Calcul du spectre de singularités

L'essentiel de l'information contenue dans un signal rugueux se situe souvent dans ses singularités et ses structures irrégulières. Pour analyser ces singularités, les ondelettes apparaissent comme un outil très adapté : ces structures élémentaires permettent de révéler le contenu utile du signal étudié. Cet outil, couplé avec la théorie des fractales, a donné naissance à un nouveau formalisme d'analyse de signaux irréguliers, l'analyse multifractale à base d'ondelettes [3]. La force (ou le degré) de singularité d'un point est alors mesurée à l'aide d'un paramètre, appelé l'exposant de Hölder « h ». Le spectre de singularités d'un signal résume quant à lui l'ensemble des exposants de Hölder ponctuels associés à des dimensions de Hausdorff $D(h)$ des sous-ensembles de points dits « Iso-Hölder ». Dans notre application,

l'exposant h de chaque point temporel est calculé à partir des maxima des modules de la transformée en ondelette (MMTO) du signal de tension. Les étapes de l'algorithme de calcul du spectre de singularités sont les suivantes :

- Déterminer la fonction de partition : $Z(q, s) = \sum_{l \in L(s)} \left(\sup_{(u, s') \in l, s' \leq s} |W_\psi(X)(u, s')|^q \right)$ où $W_\psi(u, s)$ est l'ondelette « analysatrice » à la position u et à l'échelle s . l est une ligne ou chaîne de maxima
- Calculer la fonction d'échelle : $\tau(q) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\inf \left(\frac{\log Z(q, s)}{\log s} \right) \right)$
- Calculer l'exposant de Hölder : $h = \frac{d\tau(q)}{dq}$
- Enfin, tracer le spectre de singularités : $D(h) = \inf_{q \in \mathbb{R}} (qh - \tau(q) + c)$ où c est une constante.

3. Analyse multifractale des signaux de tension

La nature irrégulière et complexe des signaux de tension de la PàC justifie l'application de l'analyse multifractale pour l'extraction d'une information pertinente servant à identifier un défaut de fonctionnement. Pour ce faire, une campagne d'essais a été menée sur une pile CEA de type PEM (8 cellules à la surface active de 220 cm²). Des défauts ont été introduits volontairement en s'écartant des conditions opératoires de référence par des actions sur les débits de gaz, via les Facteurs de Stœchiométrie Anodique et Cathodique (FSA et FSC), et sur les pressions des réactifs (P) (tableau 1).

Tableau 1. Les conditions des essais avec I=110A et T°=80°C (courant et température nominaux)

Valeur des paramètres	Conditions nominales (Ref)	Défaut de débit cathodique	Défaut de débit anodique	Défaut de pression des gaz
FSC	2	1,3	2	2
FSA	1,5	1,5	1,3	1,5
P (bars abs)	1,5	1,5	1,5	1,3

Des spectres de singularités moyens (calculés à partir de 10 spectres enregistrés pour chacun des défauts) sont présentés en Figure 1 : les spectres mettent d'abord au jour de manière synthétique une information latente, complexe, présente dans les signaux de tension bruts et ils rendent ensuite possible une discrimination nette des différentes conditions de fonctionnement de la PàC. Par rapport aux autres conditions opératoires appliquées, le défaut de FSC impose ici une plus forte irrégularité de la tension avec des valeurs de h_{\min} et h_{\max} plus faibles.

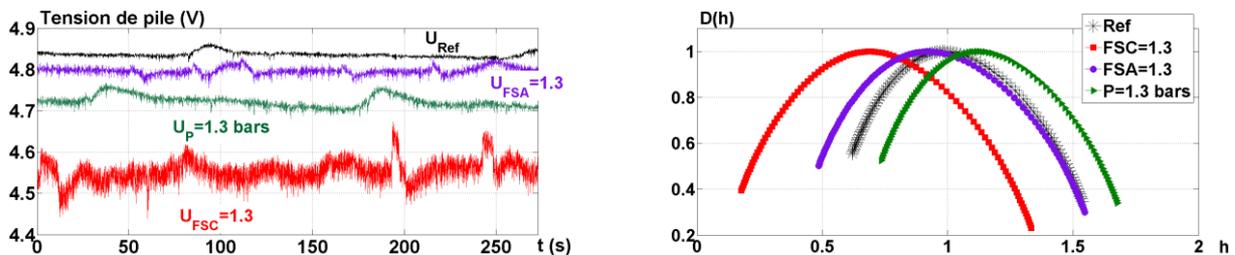


Figure 1 : Des signaux de tension (à gauche) et leurs spectres de singularités moyens (à droite).

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons montré l'aspect méthodologique de l'analyse multifractale de la tension de PàC, basée sur la transformée en ondelettes. L'estimation des spectres de singularités pour différentes conditions opératoires nous a permis d'extraire la signature de singularités d'un défaut dans le signal de tension. Cette signature sera exploitée par la suite pour identifier le défaut en appliquant des méthodes de classification adéquates.

5. Références

- [1] J. Chen, B. Zhou, « Diagnosis of PEM fuel cell stack dynamic behaviors », Journal of Power Sources 2008;177(1):83-95.
- [2] N. Yousfi Steiner, D. Hissel, P. Moçoteguy, D. Candusso, « Non-intrusive diagnosis of polymer electrolyte fuel cells by wavelet packet transform », International Journal of Hydrogen Energy 2001;36(1):740-746.
- [3] E. Bacry, J.F. Muzy, A. Arnéodo, « Singularity spectrum of fractal signals from wavelet analysis: Exact results », Journal of Statistical Physics 1993;70(3-4):635-674.