

Date : 14/04/2023

## Décision post-prognostique pour une stratégie conjointe de maintenance et de gestion de l'énergie pour un système de piles à combustible multi-piles

Ecole doctorale : EEATS Grenoble

Laboratoire d'accueil : GIPSA- LAB, UMR CNRS 5216, Grenoble

### Directeurs de thèse, GIPSA-Lab, Grenoble

Catherine CADET

catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Christophe BERENGUER

christophe.berenguer@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

### Co-encadrants

FEMTO-ST/SHARPAC

Zhongliang LI

zhongliang.li@univ-fcomte.fr

LIS/PECASE

Rachid OUTBIB

[rachid.outbib@lis-lab.fr](mailto:rachid.outbib@lis-lab.fr)

**Profil :** Candidat ayant des connaissances dans le domaine du diagnostic, du pronostic ou de la maintenance et de la fiabilité. Une connaissance de la technologie des piles à combustible serait appréciée

### Financement

Contrat doctoral du Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI)

**Mots clés** Prognostics and Health Management (PHM), Durée de vie résiduelle (RUL), Maintenance Prédictive, Piles à combustible, Multi-piles, EMS (Energy Management System).

Les candidats sont invités à transmettre leur CV, lettre de motivation et leurs résultats académiques des deux dernières années aux directeurs de thèses et co-encadrant

### Contexte et enjeux

La technologie des piles à combustible est l'une des solutions pour atteindre la neutralité climatique dans l'UE dans le secteur des transports et réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030. Les raisons sont dues à la fois à un rendement élevé, une grande densité énergétique et un impact limité sur les ressources environnementales [1]. La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), alimentée par de l'hydrogène et de l'air et produisant de la chaleur et de l'eau, est le dispositif le plus prometteur pour les applications de transport, en raison de ses faibles températures de fonctionnement et de sa rapidité de démarrage. Cependant, le déploiement des PEMFC est freiné par de multiples obstacles tels que leur coût élevé ou leur durée de vie plus courte que nécessaire. Le programme 2021-2027 du Partenariat européen pour l'hydrogène propre vise à optimiser les piles PEMFC pour en améliorer les performances, la durabilité et la fiabilité, ainsi qu'à mettre au point de nouvelles méthodes de surveillance de l'état de santé des piles et des systèmes [1].

Les systèmes de piles à combustible à multi-piles (MFC), composés de plusieurs piles organisées en réseau, sont prometteurs dans de nombreuses applications. En effet, ces systèmes peuvent étendre la fonctionnalité d'une pile unique et offrir plus de redondance, une meilleure durabilité et une architecture modulaire flexible par rapport à un système de piles à combustible à pile unique. En outre,

dans le domaine des applications de transport comme les bus, poids lourds ou les trains demandant une forte puissance (>200 kW) peuvent difficilement répondre à cette demande avec un système à pile unique, alors que ceux à piles multiples peuvent y parvenir [2]. Le principal levier d'action est le choix de la répartition de la demande d'énergie entre les piles grâce à un outil efficace de stratégie de gestion de l'énergie (EMS).

Pour résoudre les défis de durabilité et de coût des piles à combustible, l'approche "pronostic et gestion de l'état de santé" ou Prognostic and Health Management (PHM) a commencé à être développée pour les systèmes de piles à combustible. Il s'agit d'une approche systémique qui vise à évaluer l'état de santé des systèmes à partir d'informations de surveillance, à établir des pronostics et à aider à la prise de décision. Sur la base de l'approche PHM, diverses stratégies de gestion de l'énergie (EMS), utilisant l'analyse de l'état de santé ont été développées pour les systèmes MFC pour résoudre non seulement les problèmes de durabilité des piles à combustible mais également de consommation de carburant [3]. Cependant, l'approche PHM ne se limite pas à l'analyse de l'état de santé, mais peut fournir des informations exploitables permettant une prise de décision intelligente pour améliorer les performances, la sécurité, la fiabilité et la maintenabilité.

## **Objectifs**

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse de doctorat est de développer des méthodologies pour optimiser conjointement la stratégie de gestion de l'énergie et la maintenance, afin d'optimiser la durabilité des systèmes MFC tout en garantissant l'énergie requise pour faire fonctionner le système à long terme.

## **Méthodes**

Grâce à leur architecture modulaire flexible, les systèmes MFC permettent de gérer chaque pile au niveau individuel, ce qui augmente les possibilités d'action pour maximiser la durée de vie de chaque pile. Or, au cours d'un fonctionnement à long terme, les piles à combustible d'une MFC présenteront des niveaux de dégradation différents. Il est donc important de mettre au point des méthodologies qui permettent de gérer le système MFC avec des piles ayant des états de vieillissement différents, en développant des approches de décision post-pronostic aussi bien pour la maintenance que pour la gestion de l'énergie.

Les travaux de recherche débiteront par une analyse bibliographique et une synthèse critique de l'état de l'art des méthodes de prise de décision post-pronostic, et de leur mise en œuvre dans le domaine des systèmes de production/stockage d'énergie et des piles à combustibles.

La première partie du travail de recherche consistera ensuite à proposer une structure décisionnelle de maintenance pour un système MFC visant à décider, sur la base d'informations de pronostic, quelle pile à combustible individuelle doit être remplacée dans le système, et quand. Basée sur les informations disponibles sur la dégradation des piles et sur le profil de charge futur, la règle de décision de maintenance permettra de décider dynamiquement du remplacement des piles individuelles au sein du système MFC de façon à minimiser un critère de coût global d'opération du système.

Ensuite, la deuxième partie du travail consistera à l'étude conjointe de la stratégie de gestion de l'énergie (EMS) et de la politique de maintenance et de remplacement afin d'élaborer une politique de gestion prescriptive complète [4]. Les développements se concentreront principalement sur les véhicules lourds, et plus spécifiquement des simulations s'appuieront sur des cycles de conduite d'autobus urbains.

## **Références**

- [1] Clean Hydrogen Partnership, [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are_en)
- [2] S. Zhou, L. Fan, G. Zhang, J. Gao, Y. Lu, P. Zhao, C. Wen, L. Shi, Z. Hu, A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management,

Applied Energy, Volume 310, 2022, 118555, ISSN 0306-2619,  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118555>.

- [3] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, R. Outbib, C. Bérenguer. Post-prognostics decision-making strategy for load allocation on a stochastically deteriorating multi-stack fuel cell system, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, SAGE Publications, 2023, 237(1), [10.1177/1748006X221086381](https://doi.org/10.1177/1748006X221086381), <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03626797v1>
- [4] S. Dirkes, J. Leidig, P. Fisch, S. Pischinger, Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part I: State of the art and conceptual design, Energy Conversion and Management, Volume 277, 2023, 116598, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116598>

## Post-prognostic Decision for a Joint Maintenance and Energy Management Strategy for Multi-Stack Fuel Cell Systems

Doctoral school : EEATS Grenoble

Host laboratory : GIPSA- LAB, UMR CNRS 5216, Grenoble

### Thesis directors, GIPSA-Lab, Grenoble

Catherine CADET

catherine.cadet@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Christophe BERENGUER

christophe.berenguer@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

### Co-supervision

FEMTO-ST/SHARPAC

Zhongliang LI

zhongliang.li@univ-fcomte.fr

LIS/PECASE

Rachid OUTBIB

[rachid.outbib@lis-lab.fr](mailto:rachid.outbib@lis-lab.fr)

**Profile:** Candidate with knowledge in the field of diagnosis, prognosis or maintenance and reliability. Knowledge of fuel cell technology would be appreciated.

### Funding

Doctoral contract from the Ministry of National Education, Higher Education, Research and Innovation (MESRI)

**Key words** Prognostics and Health Management (PHM), Remaining Useful Life (RUL), Predictive maintenance, Fuel cells, Multi-stack, EMS (Energy Management System).

Candidates are invited to send their CV, covering letter and academic results for the last 2 years to the thesis directors and co-supervisors

### Context and issues

**Fuel cell technology** is one of the solutions to achieve climate neutrality in the EU in transportation sector and reduce drastically greenhouse gas emissions by 2030, due to their high efficiency, energy density and limited impact on environmental resources [1]. The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), fuelled by hydrogen and air and producing heat and water, is the most promising device for transport applications, because of low operational temperatures and quick startup. However, the PEMFC deployment is held down by multiple barriers such as their high cost or their shorter than required lifetime. The European Clean Hydrogen Partnership agenda 2021-2027 target for PEMFC stacks their optimisation for higher performance, durability and reliability and new methods for stack and system state-of-health monitoring [1].

**Multi-stack fuel cell (MFC) systems**, composed of multiple stacks organised in a network, are promising in multiple applications. Indeed, these systems can extend the functionality of a single stack and offer more redundancy, enhanced durability, and flexible modular architecture compared with a single stack fuel cell system. Moreover, in the field of transport applications, transports such as **heavy-duty vehicles** or power trains with high-power demands (>200 kW) can hardly meet power demands with a single-stack system whereas multi-stacks systems can achieve it [2]. The main action leverage is

the choice of power demand distribution between the fuel cell stacks thanks to an efficient Energy Management Strategy (EMS) tool.

To solve fuel cell durability and cost challenges, **Prognostic and Health Management (PHM)**, has started its development for fuel cell systems. PHM is a systematic approach that can deal with system assessment, prognostics, and decision-making support. Based on PHM approach, a variety of energy management strategies (EMS) that distributes energy to the different elements of a system using health-state analysis have been developed for MFC systems to tackle fuel cell durability as well as fuel consumption challenges [3]. However, PHM approach is not limited to health-analysis but can provide actionable information to enable intelligent decision-making for improved performance, safety, reliability, and maintainability.

### **Objective**

In this context, the objective of the PhD thesis is to develop methodologies to optimize jointly the Energy Management Strategy and maintenance, so as to optimize the durability performance of MFC systems while ensuring a reliable supply of the required energy during long-term operation.

### **Methodology**

Thanks to their flexible modular architecture, the use of MFC systems affords to manage each stack at an individual level, thus increasing the possibilities of actions to maximise the life of each stack. Moreover, throughout long-term operation, the fuel cell stacks in an MFC will have different degradation levels. Thus, develop methodologies that manage the MFC system with stacks in different aging states will be an important issue to address.

The research will start with a literature review and a critical synthesis of the state of the art of post-prognosis decision making methods and their implementation in the field of energy production/storage systems and fuel cells.

The first part of the research work will then consist in proposing a maintenance decision-making structure for a MFC system aiming at deciding which individual fuel cell should be replaced. Based on the available information on the stacks degradation and on the future load profile, the maintenance decision-rule will allow to decide dynamically for the replacement of the individual stacks within the MFC system, with the objective to minimize a global operation cost.

Then, the second part of the work will consider jointly the Energy Management Strategy (EMS) and the replacement policy in order to build a comprehensive prescriptive management policy [4].

The developments will mainly focus on heavy-duty vehicles, and more specifically simulations will be provided with driving cycles of urban buses.

### **References**

- [1] Clean Hydrogen Partnership, [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/who-we-are_en)
- [2] S. Zhou, L. Fan, G. Zhang, J. Gao, Y. Lu, P. Zhao, C. Wen, L. Shi, Z. Hu, A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management, *Applied Energy*, Volume 310, 2022, 118555, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118555>.
- [3] J. Zuo, C. Cadet, Z. Li, R. Outbib, C. Bérenguer. Post-prognostics decision-making strategy for load allocation on a stochastically deteriorating multi-stack fuel cell system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, SAGE Publications, 2023, 237(1), [10.1177/1748006X221086381](https://doi.org/10.1177/1748006X221086381), <https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03626797v1>
- [4] S. Dirkes, J. Leidig, P. Fisch, S. Pischinger, Prescriptive Lifetime Management for PEM fuel cell systems in transportation applications, Part I: State of the art and conceptual design, *Energy Conversion and Management*, Volume 277, 2023, 116598, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116598>