



Fédération de recherche Hydrogène

Programme de la session Systèmes piles et électrolyseurs

Responsables scientifiques : **Christophe Turpin¹ et Nadia Yousfi Steiner²**

¹ LAPLACE, UMR CNRS - Université de Toulouse n°5213, site ENSEEIHT, 2, rue Charles Camichel, BP 7122, 31071 Toulouse Cedex 7, France

² FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Rue Thierry Mieg, 90000 BELFORT, France

Lundi 31 mai 2021

14h15 – 14h30 : **Bienvenue aux participants** (Christophe Turpin et Nadia Yousfi Steiner)

14h30 – 16h00 : **Chairlady Nadia Yousfi Steiner**

14h30 – 15h00 **SYS 1 : Etude de l'impact d'harmoniques de courant hautes fréquences sur le vieillissement de monocellules PEM-HT**

Thomas Jarry¹, Amine Jaafar¹, Fabien Lacressonniere¹, Christophe Turpin¹, Marion Scohy²
¹ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel, 31071, Toulouse ; ² SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse

15h00 – 15h30 **SYS 2 : Un système de gestion pour augmenter la durabilité des PACs**

Milad Bahrami, Serge Pierfederici et Gaël Maranzana
Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

15h30 – 16h00 **SYS 3 : Decarbonized hydrogen from Intermittent Hybrid Renewable Energy Sources: Online Supervision**

Belkacem OULD BOUAMAMA, Sumit Sood, M. Boukerdja, OM Prakash, J.Y. Dieulot, A.L. Gehin, and M. Bressel
Polytech Lille (France), CRISAL Laboratory (UMR CNRS 9189), Lille, France

16h00 – 16h15 : *Pause*

16h15 – 17h45 : **Chairlady Nadia Yousfi Steiner**

16h15 – 16h45 **SYS 4 : Méthode de diagnostic non intrusive appliquée aux électrolyseurs à membrane échangeuse de protons : Analyse entropique multi échelle**

Farid Aubras¹, Cedric Damour¹, Michel Benne¹, Christophe Lin-Kwong-Chon¹, Jonathan Deseure², Amangoua J-J Kadjo¹

¹ ENERGY-Lab, Univ. De la Réunion, LE2P, 97715 Saint-Denis, France ; ² Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, 38000 Grenoble, France

16h45 – 17h15 **SYS 5 : Lifetime Prediction of PEMFC Systems Based on Echo State Network**

Zhiguang Hua^{1,2}, Zhixue Zheng³, Elodie Pahon^{1,2}, Marie-Cécile Péra^{1,2}, Fei Gao^{1,2}

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, F-90010 Belfort, France ;

²FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, F-90010 Belfort, France ; ³LMOPS lab, Université de Lorraine & CentraleSupélec, 57070 Metz, France.

17h15 – 17h45 **SYS 6 : Post-prognostics decision-making strategy to manage operating cost and fuel cell lifetime of a two-stack system**

J. Zuo^{1,2}, C. Cadet¹, Z. Li², C. Bérenguer¹, R. Outbib²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INPⁱ, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France ; ²LIS Laboratory, Aix-Marseille University, 13397 Marseille, France

Mardi 1^{er} juin 2021

8h30 – 10h00 : **Chairman Christophe Turpin**

8h30 – 9h00 **SYS 7 : Étude du vieillissement d'un électrolyseur à membrane échangeuse de proton (PEM) soumis à des ondulations de courant**

François Parache¹, Henri Schneider¹, Christophe Turpin¹, Nicolas Richet², Olivier Debellmanière², Éric Bru¹, Caroline Bertail², Christine Marot²

¹Laboratoire LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS ; ²Air Liquide, Research & Development, Paris Innovation Campus

9h00 – 9h30 **SYS 8 : Caractérisation de l'influence du régime d'écoulement diphasique sur les performances d'une cellule PEMWE**

S. Boulevard^{1,2}, J. J. A. Kadjo¹, A. Thomas², B. Grondin Perez¹, S. Martemianov²

¹Energy-Lab (L2EP), Université de la Réunion, 15, avenue René Cassin CS 92003 | 97744 Saint-Denis cedex 9, France ; ²Institut Pprime, Université de Poitiers-CNRS-ENSMA, UPR 3346, 2 Rue Pierre Brousse, Bâtiment B25, TSA 41105, F-86073, Poitiers Cedex 9, France

9h30 – 10h00 **SYS 9 : Exploration des régimes bulleux au sein d'un système électrolyseur à membrane échangeuse de protons**

Idriss Sinapan, Christophe Lin-Kwong-Chon, Cédric Damour, Michel BenneFarid Aubras, Brigitte Grondin-Pérez, Jean-Jacques Amangoua Kadjo

LE2P – ENERGY-Lab, - University of Reunion Island 15, Avenue René Cassin CS 92003 97744 SAINT-DENIS CEDEX 9

10h00 – 10h15 : *Pause*

10h15 – 12h15 : **Chairman Christophe Turpin**

10h15 – 10h45 **SYS 10 : Cogénération d'électricité et de froid en milieu tropical isolé**

Hugo Lambert¹, Robin Roche², Samir Jemeï¹, Pascal Ortega³ et Daniel Hissel¹

¹FEMTO-ST, FCLAB, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France ; ²FEMTO-ST, FCLAB, CNRS, UTBM, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France ; ³GEPASUD, Univ. Polynésie Française, Faa'a, Polynésie Française

10h45 – 11h15 **SYS 11 : Zones Industrielles Portuaires et Hydrogène — Opportunités pour la Valorisation des Énergies Fatales**

A. Roy¹, J.C. Olivier¹, F. Auger¹, B. Auvity², E. Schaeffer¹, S. Bourguet¹, J. Perret³, J. Schiebel⁴
¹IREENA, 37 bd de l'université, 44600 Saint-Nazaire ; ²LTEN, La Chantrerie, Rue Christian Pauc
44300 Nantes ; ³MAN Energy Solutions France, Avenue de Chatonay – Porte 7, BP427, 44615 Saint-
Nazaire ; ⁴AKAJOULE, La Station 18 Bd Paul Perrin, 44600 Saint-Nazaire

11h15 – 11h45 **SYS 12 : Les systèmes hydrogène au centre PERSEE de MINES ParisTech : passé, présent et futur**

Pedro Affonso Nobrega, Cédric Sernissi, Christian Beauger, Patrick Achard
MINES ParisTech, Université PSL, Centre Procédés Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques
(PERSEE), 06904 Sophia Antipolis, France

11h45 – 12h15 **SYS 13 : Air Liquide and AXANE Hydrogen and Fuel Cell (tbc)**

Mercredi 2 juin 2021

8h30 – 10h00 : Chairman Bruno Auvity

8h30 – 9h00 **SYS 14 : The catalyst coated membrane fabrication: identification of key parameters and its impact on PEMFC performances**

Turtayeva Z.¹, Xu F.¹, Dillet J.¹, Mozet K.¹, Peignier R², Celzard A.², Maranzana G.¹
¹ LEMTA, UMR CNRS 7563, CNRS/Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France ; ² Université de Lorraine, CNRS, IJL, 88000 Épinal, France

9h00 – 9h30 **SYS 15 : Estimation of transfer parameters in PEM fuel cells**

Rémi Bligny¹, Jérôme Dillet¹, Sophie Didierjean¹, Tobias Schmitt^{1,2}, Ulrich Sauter², Gaël Maranzana¹

¹ Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France, 2 Avenue de la Forêt de Haye, BP 90161, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex ; ² Robert Bosch GmbH | Renningen | 71272 Stuttgart | GERMANY

9h30 – 10h00 **SYS 16 : Modeling of the two-phase transport in PEM fuel cell**

E. Tardy^{1,2}, J.-P. Poirot-Crouvezier², P. Schott², C. Morel², G. Serre², M. Chandesris², Y. Bultel¹

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, F-38000 Grenoble, France ; ²Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, F-38000 Grenoble, France

10h00 – 10h15 : Pause

10h15 – 12h15 : Chairman Michel LATROCHE

10h15 – 10h45 **SYS 17 : An innovative non-mechanical hydrogen compressor based on cyclic adsorption-desorption on activated carbons**

G. Sdanghi^{1,2}, V. Nicolas¹, K. Mozet², P. Ramirez-Vidal¹, G. Maranzana², A. Celzard¹, V. Fierro¹

¹ IJL, UMR CNRS 7198, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Seguin, Epinal, France ; ² LEMTA, UMR CNRS 7563, Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, Vandœuvre-lès-Nancy, France

10h45 – 11h15 **SYS 18 : Substitution du Fe par le Mn et le Ti dans l'alliage TiFe pour le stockage solide de l'hydrogène à grande échelle**

Fermin Cuevas¹, Erika Michela Dematteis^{1,2}, Marcello Baricco², Michel Latroche¹

¹Univ. Paris Est Creteil, CNRS, ICMPE, UMR7182, Thiais, France ; ²University of Turin, Department

of Chemistry and NIS – INSTM, Torino, Italy

11h15 – 11h45 **SYS 19 : Numerical simulation and optimization of the performances of a thermally-driven hydrogen compressor**

V. Nicolas¹, G. Sdanghi^{1,2}, K. Mozet², S. Schaefer¹, G. Maranzana², A. Celzard¹, V. Fierro¹
¹IJL, UMR CNRS 7198, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Seguin, Epinal, France ; ²LEMTA, UMR CNRS 7563, Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, Vandœuvre-lès-Nancy, France

11h45 – 12h15 **SYS 20 : Hydrogen generation from waste Mg alloys / Light mobility**

Serge Al Bacha¹, Jocelyn Sabatier², Fabrice Mauvy¹, Isabelle Aubert³, Arnaud Desmedt⁴ and Jean-Louis Bobet¹

¹ICMCB, CNRS, Université de Bordeaux, 87 Av du Dr Schweitzer, 33600 Pessac ; ²I2M, CNRS, Université de Bordeaux, 351 Avenue de la libération, 33400 Talence ; ³ISM, CNRS, Université de Bordeaux, 351 Avenue de la libération, 33400 Talence

Jeudi 3 juin 2021

14h00 – 15h30 : **Chairman Yann Bultel**

14h00 – 14h30 **SYS 21 : Optimisation du processus de rodage accéléré des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)**

F. Van Der Linden^{1,2}, E. Pahon³, S. Morando¹, D. Bouquain²
¹SYMBIO, Vénissieux, France ; ²FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France ; ³FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, Belfort, France

14h30 – 15h00 **SYS 22 : Etude expérimentale des capacités de démarrage à froid d'une pile à combustible de type PEM**

J. Guillaume^{1,2}, E. Pahon^{1,2}, A. Ravey^{1,2}, S. Jemeï¹
¹FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France ; ²ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, Belfort, France

15h00 – 15h30 **SYS 23 : Vieillessement induit par des cycles répétés de démarrage et d'arrêt sur un stack PEM-HT**

M. Durand¹, J. Regnier¹, A. Picot¹, C. Turpin¹, O. Crassous², M. Scohy², R. Stéphan²
¹Laboratoire LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel – BP 7122 – 31071 Toulouse Cedex 7 France ; ²SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse

15h30 – 15h45 : *Pause*

15h45 – 17h15 : **Chairman Yann Bultel**

15h45 – 16h15 **SYS 24 : Caractérisations des piles à combustible PEM-HT : une investigation expérimentale focalisée sur les dégradations.**

Mathieu BAUDY¹, Sylvain RIGAL¹, Amine JAAFAR¹, Christophe TURPIN¹, Sofyane ABBOU²
¹LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel, 31071, Toulouse ; ²SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse, France

16h15 – 16h45 **SYS 25 : Impact de la standardisation des données appliqué au diagnostic des piles à combustibles PEMFC**

Chanal Damien, Nadia Yousfi Steiner, Didier Chamagne, Marie-Cécile Pera
FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France

16h45 – 17h15 **SYS 26 : Modélisation d'un stack PEMFC cellule par cellule : illustration d'un mécanisme de propagation des dégradations**

M. Bahrami, R. Bligny, J. Dillet, S. Didierjean, J.P. Martin, S. Pierfederici, G. Maranzana
Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France



Fédération de recherche Hydrogène

RESUMES DES PRESENTATIONS DE LA SESSION Systèmes piles et électrolyseurs

**Responsables scientifiques : Christophe Turpin
et Nadia Yousfi Steiner**

**Réunion plénière Digitale
Lundi 31 mai– vendredi 4 juin 2021**

Etude de l'impact d'harmoniques de courant hautes fréquences sur le vieillissement de monocellules PEM-HT

T. JARRY¹, A. JAAFAR¹, F. LACRESSONNIERE¹, C. TURPIN¹, M. SCOHY²

¹ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel, 31071, Toulouse

² SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse

La pile à combustible est une solution prometteuse pour décarboner certains systèmes de génération d'électricité, tout en les rendant plus silencieux et non émetteurs de polluants. Utilisée seule ou en hybridation, elle est dans la majorité des systèmes connectée à la charge par l'intermédiaire d'un convertisseur statique. Celui-ci permet d'adapter le niveau de tension fourni par la pile à la tension requise par la charge ou par un autre convertisseur intermédiaire. De plus, au sein des systèmes hybrides, le convertisseur permet de réguler le point de fonctionnement de la pile et ainsi d'adapter le partage de puissance entre la pile et le stockage d'énergie et/ou de puissance.

Le fonctionnement des convertisseurs statiques entraîne des harmoniques de courant côté pile, à des fréquences et des amplitudes différentes suivant leur structure, leur commande et le point de fonctionnement de la pile. Dans le cas des convertisseurs statiques DC/DC, les harmoniques de courant vus par la pile ont des fréquences importantes qui vont jusqu'à quelques centaines de kHz. L'ordre de grandeur de l'amplitude de l'harmonique de courant est de quelques pourcents du courant moyen produit par la pile, 10% à 20% maximum. Ces harmoniques de courant sont suspectés d'accélérer le vieillissement de la pile.

Les essais réalisés sur des stacks PEM-BT dans le cadre des projets CONPAC [1] et CO-CONPAC [2] ont permis d'obtenir des résultats qui semblent contradictoires. Dans le premier projet, un stack de 5 cellules a été opéré pendant 1000h à un courant moyen de 250A avec un harmonique de courant sinus à 1kHz et d'amplitude 10% du courant moyen. La tension du stack au cours de l'endurance a diminué de 61,6 μ V/h. Un deuxième stack de 5 cellules fonctionnant pendant 1000h à courant constant de 250A a perdu lui 56 μ V/h, soit 10% de moins environ. Dans le deuxième projet, un stack de 5 cellules a été opéré pendant 1000h à une densité de courant moyenne de 0,7A/cm² avec un harmonique de courant triangulaire symétrique à 5kHz et d'amplitude 10%. La tension du stack au cours de l'endurance a diminué de 22,5 μ V/h. Un deuxième stack de 5 cellules fonctionnant pendant 1000h sur le même courant constant a perdu lui 27,6 μ V/h, soit 10% de plus cette fois-ci. La comparaison des courbes de polarisation quasi-statiques réalisées entre les deux stacks montre cependant une chute de performance plus importante pour la pile ayant subi les harmoniques de courant : 33,5 μ V/h à 0,7A/cm² contre 29,6 μ V/h pour la pile opérée à courant constant. Ce constat, appuyé par d'autres résultats d'essais [3], pose la question de l'impact des harmoniques de courant au moins sur les pertes réversibles dans la pile PEM-BT.

Aucun essai similaire n'ayant été mené à notre connaissance sur des PEM-HT, nous avons conçu un banc d'essais permettant de tester 4 mono-cellules PEM-HT en même temps. Ce banc comporte 2 circuits de puissance avec, sur chaque circuit, 2 piles en série électriquement avec un contacteur de puissance et une charge active. Les 4 piles sont en parallèle fluidiquement, les débits d'hydrogène et d'air étant régulés, pour chaque pile, en fonction du courant qu'elle produit. Les 2 charges actives sont pilotées par un générateur de signaux 2 voies afin d'émuler les harmoniques de courant. Ce banc permettra ainsi d'étudier le vieillissement comparatif de 4 piles subissant 2 profils de charge en même temps, donc dans les mêmes conditions atmosphériques. Nous proposons dans un premier temps de comparer le vieillissement de 2 mono-cellules PEM-HT opérant à courant constant avec le vieillissement de 2 autres mono-cellules PEM-HT opérant au même courant moyen, avec un harmonique de courant triangulaire symétrique 10-20kHz d'amplitude 10%.

[1] B. Wahdame et al., « Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack », 2008 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* **2008**, p.1495-1500.

[2] O. Rallieres, « Modélisation et caractérisation de piles à combustible et Electrolyseurs PEM », PhD Thesis, **2011**, LAPLACE.

[3] M. Gerard, et al., « Ripple Current Effects on PEMFC Aging Test by Experimental and Modeling », *J. Fuel Cell Sci. Technol*, **2011**, vol. 8, no 2.

Un système de gestion pour augmenter la durabilité des PACs

Milad Bahrami, Serge Pierfederici et Gaël Maranzana

Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

Les piles à combustible (PAC) à membrane d'échange de protons sont les PACs dont la maturité technologique est la plus avancée, notamment pour les applications embarquées. À cause de la faible tension d'une cellule, un certain nombre de cellules doivent être connectées en série pour augmenter la tension de sortie. Il y a deux inconvénients majeurs liés à cette connexion: la dépendance de la durée de vie d'un stack à l'état de chaque cellule et la possibilité de propagation d'un défaut entre une cellule et les cellules voisines en raison notamment du couplage thermique [1]. La durée de vie de la pile peut être améliorée par la gestion individuelle des conditions de fonctionnement des cellules [1]–[3]. Ainsi, la possibilité de propagation du défaut peut également être évitée. Cependant, la gestion de la basse tension et du courant élevé est le principal défi de la structure d'électronique de puissance.

L'instabilité des cellules doit tout d'abord être détectée. Le modèle présenté par [1], décrit le couplage entre les transferts de matière de chaleur et de charge en régime transitoire mais est suffisamment simplifié pour être résolu en temps réel. Enfin, le système de gestion doit prendre des décisions sur la base des données du modèle et des grandeurs observables (Figure 1-a) puis les mettre en œuvre par l'intermédiaire de la structure électronique. La production d'eau à l'intérieur d'une cellule peut être contrôlée par son courant. Comme indiqué sur la Figure 1-b, le contrôle du courant ou de la puissance peut entraîner une perte de contrôlabilité des convertisseurs connectés aux cellules. Par conséquent, un système d'équilibrage doit être utilisé pour assurer la contrôlabilité [3]. L'article présentera le système de gestion de l'énergie développer pour un stack de PAC (PEMFC) avec une description des trois éléments clés à savoir la modélisation multiphysique des cellules, le convertisseur de puissance et l'algorithme de gestion.

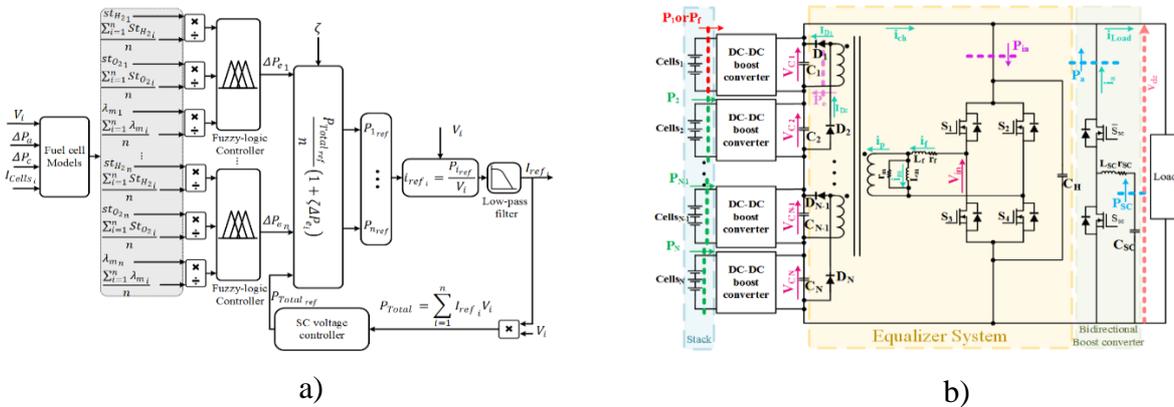


Figure 1- Système de gestion des PACs : a) stratégie de gestion. b) architecture de l'électronique de puissance.

[1] M. Bahrami, "Contribution to the development of a fuel cell management system," Université de Lorraine, 2020.
 [2] M. Bahrami, J. Martin, G. Maranzana, and S. Pierfederici, "Multi-Stack Lifetime Improvement through Adapted Power Electronic Architecture in a Fuel Cell Hybrid System," *Mathematics*, vol. 8, no. 5, p. 739, 2020, doi: 10.3390/math8050739.
 [3] M. Bahrami *et al.*, "Design and modeling of an equalizer for fuel cell energy management systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, p. 1, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2899150.

SYS 3

Decarbonized hydrogen from Intermittent Hybrid Renewable Energy Sources: Online Supervision

B. OULD BOUAMAMA, Sumit Sood, M. Boukerdja, OM Prakash, J.Y. Dieulot, A.L. Gehin, and M. Bressel

Polytech Lille (France), CRISAL Laboratory (UMR CNRS 9189), Lille, France

Green hydrogen is undoubtedly the most promising energy vector of the future because it is captured by renewable and inexhaustible sources, such as wind and/or solar energy, and can be stored over the long term in high-pressure cylinders by an electrolyzer to then produce electricity by fuel cells or other valorizations without emitting any pollutants (see figure 1). However, the technological and scientific obstacles to its production by complex and costly Hybrid multi-source system (HMS) platforms using intermittent sources (overproduction of electricity at certain times but insufficient at others) are not yet resolved. The HMS is a complex because of its nonlinear and multiphysic model with uncertain parameters. The availability of energy requires the implementation of online supervision algorithms in terms of detection and isolation of faults that may affect the operation of equipment.

The plenary presentation exposes a part of the scientific results developed in the framework of the european project E2C (<https://www.interreg2seas.eu/en/E2C>). The presentation shows online, how a multiphysic dynamic model can be used as economic means of testing the performance of the electrolyser under different operating conditions and facilitates the design optimization and development of control and diagnosis algorithms applied to a real pilot process (see figure 2).

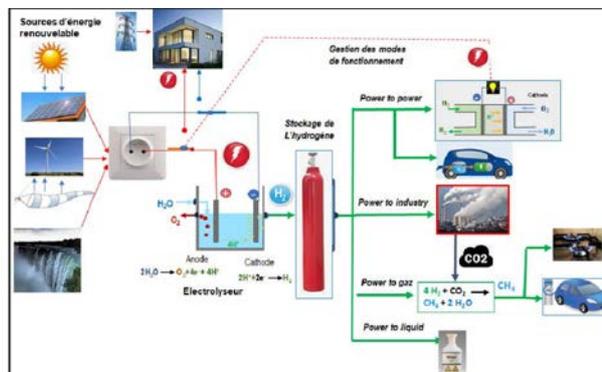


Figure 1: Global view for H₂ chain



Figure 2: Experimental setup

Méthode de diagnostic non intrusive appliquée aux électrolyseurs à membrane échangeuse de protons : Analyse entropique multi échelle

Farid Aubras¹, Cedric Damour¹, Michel Benne¹, Christophe Lin-Kwong-Chon¹, Jonathan Deseure², Amangoua J-J Kadjo¹

¹ ENERGY-Lab, Univ. De la Réunion, LE2P, 97715 Saint-Denis, France

²Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP#, LEPMI, 38000 Grenoble, France

#Institute of Engineering and Management Univ. Grenoble Alpes

Les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (E-PEM) représentent une solution intéressante à la production de-carbonée d'hydrogène [1]. Les E-PEMs sont des systèmes non linéaires disposants d'un panel d'auxiliaires nécessaires à la régulation thermique, la régulation en pression, l'apport en réactif H₂O, l'évacuation de l'H₂ et l'hydratation de l'assemblage membrane électrode (AME). Ces auxiliaires permettent un fonctionnement optimal et assurent la durabilité de l'E-PEM. Plus précisément, la pompe anodique permet lors du processus électrochimique un apport constant en réactifs H₂O vers la couche de diffusion anodique et la couche catalytique, elle participe à l'évacuation de la chaleur produite à l'AME et permet l'évacuation du mélange bi-phasique anodique H₂O/O₂. Afin de garantir une exploitation sécuritaire et optimale des E-PEMs, il apparaît important d'appliquer des logiques de détection de défauts d'auxiliaires appliquées à la pompe anodique. Dans cette étude ont été mesurées les évolutions du courant produit par l'E-PEM pour des plages de débit anodique [0,2 l/min – 0 l/min] dans des conditions opératoires stables (pression et température). La méthode de diagnostic développée repose sur une décomposition modale empirique (EMD) [2] du signal de courant et sur une analyse entropique multi échelle des modes les plus sensibles au défaut considéré [3].

Les premiers résultats montrent une signature très marquée du défaut de pompe pour les hautes densités de courant (2.6 V et 2.5 V).

Cette méthode de diagnostic non intrusive, utilisable en ligne, pouvant être utilisée sans interrompre le fonctionnement du système apparaît comme une solution prometteuse pour le diagnostic E-PEM.

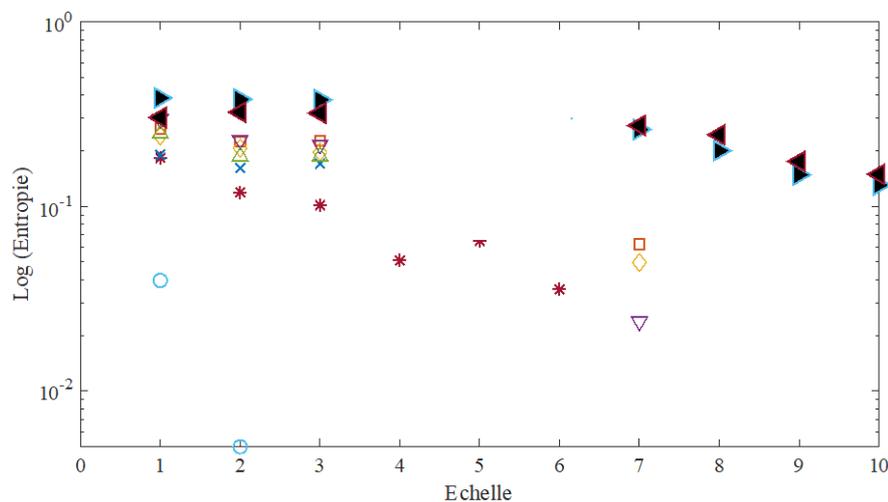


Figure 1 : Niveau d'entropie appliquée au 10 cas d'étude (+ cas 1, ○ cas 2, * cas 3, x cas 4, □ cas 5, cas 6, cas 7, cas 8, cas 9, cas 10)

[1] BARBIR, Frano. PEM fuel cells: theory and practice. Academic press, 2012.

[2] DAMOUR, Cédric, BENNE, Michel, GRONDIN-PEREZ, Brigitte, *et al.* Polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis based on empirical mode decomposition. *Journal of Power Sources*, 2015, vol. 299, p. 596-603.

[3] LI, Yongbo, YANG, Yuantao, LI, Guoyan, *et al.* A fault diagnosis scheme for planetary gearboxes using modified multi-scale symbolic dynamic entropy and mRMR feature selection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 91, p. 295-312.

Lifetime Prediction of PEMFC Systems Based on Echo State Network

Zhiguang Hua^{1,2}, Zhixue Zheng³, Elodie Pahon^{1,2}, Marie-Cécile Péra^{1,2}, Fei Gao^{1,2}

¹FEMTO-ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, F-90010 Belfort, France.

²FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, F-90010 Belfort, France.

³LMOPS lab, Université de Lorraine & CentraleSupélec, 57070 Metz, France.

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) system is considered as a promising power conversion device for the advantages of low temperature, environmentally friendly, etc. Nevertheless, limited lifetime and expensive costs are two large barriers for their extensive commercial applications. The Remaining Useful Life (RUL) prediction is helpful for users to implement some preventive maintenances or replace the fuel cell stack in the early stage to avoid unavailability of the whole system.

The aim of data-driven methods which based on the historical working data is to predict the degradation state in the next hundreds of hours. Echo State Network (ESN), an improved structure of Recurrent Neural Network (RNN) [1], has been used in the diagnostic and prognostic areas of the PEMFC system. The computation complexity of ESN is lower than the traditional RNN. The contributions of this work are: 1) realization of the long-term scale of RUL prediction by ESN, and 2) optimization of ESN parameters by the Particle Swarm Optimization (PSO) method.

The model of ESN can be expressed as

$$\begin{cases} \mathbf{x}(n) = (1 - \alpha)\mathbf{x}(n-1) + \alpha f(\mathbf{W}_{in}[1; \mathbf{u}(n)] + \mathbf{W}\mathbf{x}(n-1)) \\ \mathbf{y}(n) = \mathbf{W}_{out}[1; \mathbf{u}(n); \mathbf{x}(n)] \end{cases} \quad (1)$$

Where \mathbf{W}_{in} , \mathbf{W} , and \mathbf{W}_{out} represent the input, internal, and output weight matrix; \mathbf{x} is neuron activation in the reservoir; f is nonlinear transformation; \mathbf{u} is the external input signal; \mathbf{y} is the output signal.

Taking the stack voltage as the health indicator, the degradation state can be estimated over the long-term scale based on the iterative process. A practical guide to set the ESN parameters is given in [2]. Nevertheless, setting the key parameters (leaking rate α , spectral radius ρ , regularization coefficient β) is a complicated process. The automatic and efficient optimization method of PSO is thus used in this task to improve the optimization efficiency. The velocity v_i and position x_i updating of the particle at time step k is shown as

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(p_{ib} - x_i^k) + c_2r_2(g_{ib} - x_i^k) \\ x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \end{cases} \quad (2)$$

Where p_{ib} and g_{ib} are the best personal and global position; w is the inertial weight; c_1 and c_2 are the learning factors; r_1 and r_2 are the random variables from 0 to 1.

In the ‘‘IEEE PHM 2014 Data Challenge’’, two degradation tests of 1 kW PEMFC system were carried out in FCLAB [3]. Based on these two datasets, the ESN-PSO method is used to realize the long-term scale lifetime prediction. The best function value curves of PSO are shown in Fig.1 and the prediction results are shown in Fig.2.

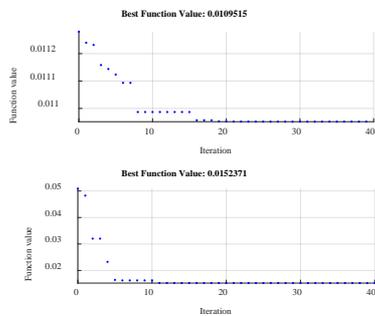


Fig.1 Best function value for both datasets (FC1 and FC2)

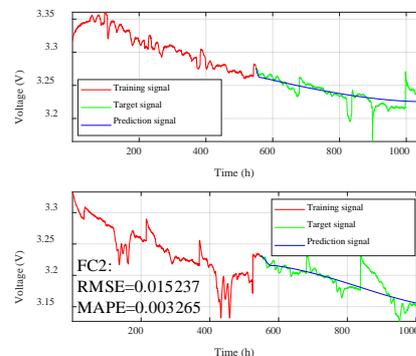


Fig.2 Results under the static condition FC1 and quasi-dynamic condition FC2

- [1] H. Jaeger and H. Haas, ‘‘Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication,’’ *Science*, vol. 304, p. 78, 2004.
- [2] M. Lukoševičius, ‘‘A practical guide to applying echo state networks,’’ *Neural Networks: Tricks of the Trade*, pp. 659-686, 2012.

Post-prognostics decision-making strategy to manage operating cost and fuel cell lifetime of a two-stack system

J.Zuo^{1,2}, C. Cadet¹, Z. Li², C. Bérenguer¹, R. Outbib²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INPⁱⁱ, GIPSA-Lab, 38000 Grenoble, France

²LIS Laboratory, Aix-Marseille University, 13397 Marseille, France

Recently, the research on the Prognostics and health management (PHM) of Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been shifting from single stack to multi-stacks level [1, 2]. Dedicated to meet the increased demand for condition-based maintenance and lifetime extension of the explored engineered system, PHM has received growing attention by researchers [3, 4]. This work proposes a post-prognostics decision-making strategy to manage the economic lifetime of a two-stack PEMFC system. The influence of fuel cell deterioration and fuel consumption on fuel cell economic lifetime is studied. To assess the remaining useful life (RUL) of each fuel cell stack, the proposed approach is built on the assumption that the degradation of the stacks is dependent on both time and load demand (figure 1 b)). Therefore, firstly a load-dependent stochastic deterioration model is proposed for PEMFC. In this model, the ohmic resistance of a single PEMFC stack is chosen as the degradation indicator. The resistance degradation is modeled using a Gamma stochastic process whose shape parameter α is taken as a function of the load level applied to the stack. It first applies the deterioration data to estimate the deterioration model parameters and then propagates the deterioration paths under a given load profile, which allows one to predict the RUL under different assumptions on the future load profiles applied to the stack. A decision of the load repartition on the stacks is taken periodically, as shown in figure 1 c). The developed model is then further used for the post-prognostics decision-making phase to decide for the optimal load split between the stacks to maximize the service time of the multi-stacks fuel cell system. In simulation work, the hydrogen consumption/system-lifetime ratio and system lifetime are proposed as two evaluation criteria to assess the efficiency of the proposed decision-making strategy. As can be seen from fig. 2, the simulated lifetime with decision control is greatly improved. Moreover, a longer lifetime is achieved when applies more weights on mitigating fuel cell deterioration.

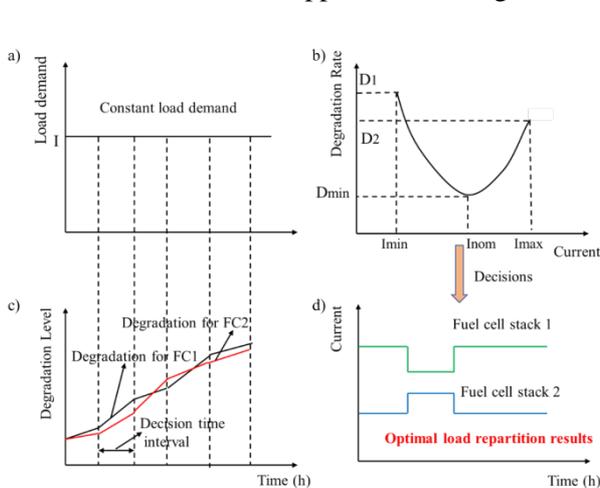


Fig. 1 Schematic of the proposed post-prognostics decision-making strategies.

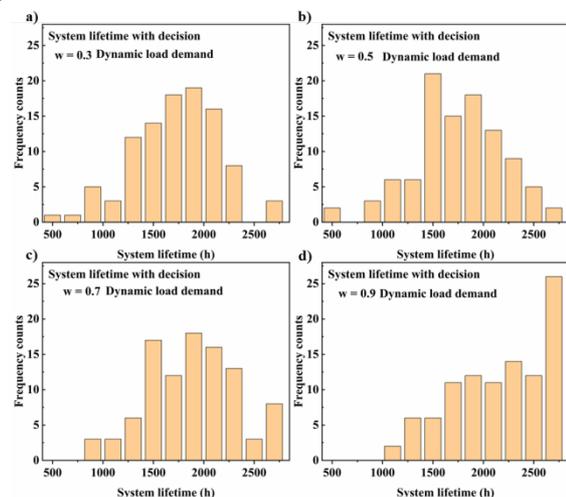


Fig. 2 System lifetime distribution histogram results - a) $\omega = 0.3$, b) $\omega = 0.5$, c) $\omega = 0.7$, d) $\omega = 0.9$.

- [1] J. Liu and E. Zio, "Prognostics of a multistack PEMFC system with multiagent modeling," *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 76-87, 2019.
- [2] N. Herr et al., "Decision process to manage useful life of multi-stacks fuel cell systems under service constraint," *Renewable energy*, vol. 105, pp. 590-600, 2017.
- [3] M. Jouin, R. Gouriveau, D. Hissel, M.-C. Péra, and N. Zerhouni, "Prognostics of PEM fuel cell in a particle filtering framework," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 481-494, 2014/01/02/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.054>.
- [4] C. Hu, B. D. Youn, and P. Wang, *Engineering design under uncertainty and health prognostics*. Springer, 2019.

ⁱ Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

Étude du vieillissement d'un électrolyseur à membrane échangeuse de proton (PEM) soumis à des ondulations de courant

François Parache¹, Henri Schneider¹, Christophe Turpin¹, Nicolas Richet², Olivier Debellmanière², Éric Bru¹, Caroline Bertail², Christine Marot²

¹Laboratoire LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS

²Air Liquide, Research & Development, Paris Innovation Campus

Les électrolyseurs sont des composants réputés robustes. Leur durée de vie annoncée dépasse généralement les dizaines de milliers d'heures dans des conditions optimales de courant, puissance et température constants. Cependant, ces conditions ne peuvent être garanties dans un fonctionnement couplé à des sources renouvelables via un convertisseur à découpage (électronique de puissance). Il apparaît alors des variations de courant de différentes formes et fréquences. Dans ce contexte, un banc de test permettant un fonctionnement de quatre électrolyseurs PEM en continu a été élaboré.

Au cours d'un essai d'endurance de 3000 heures, ces composants sont alimentés par des ondulations d'amplitudes +/- 10% autour de 2A, triangulaires de 10 kHz pour l'électrolyseur nommé E1, de 1 kHz pour E2, et sinusoïdales 300 Hz pour E3. Enfin, E4 est alimenté par un courant constant « idéal » et constitue la référence de cet essai. Les performances de ces composants sont évaluées toutes les 500 heures au cours de phases de caractérisation comprenant une courbe de polarisation et des spectroscopies d'impédance électrochimique (SIE). Des études similaires sur des piles à combustible PEM n'ont montré que peu d'impact d'ondulation sinusoïdale à 1 kHz après 1000 heures de fonctionnement [1]. Pour la suite de ce résumé, nous nous intéresserons exclusivement au vieillissement de E1 (signal triangulaire 10 kHz) comparé à la référence E4.

Alors que les performances initiales de ces deux électrolyseurs sont relativement proches, on remarque une dégradation jusqu'à six fois plus importante de E1 à la fin de l'essai. Elle apparaît d'autant plus évidente à forte densité de courant. On observe notamment une dégradation relativement linéaire de la résistance haute fréquence (identifiée sur les SIE) de 10.6 $\mu\Omega/h$ et 4.9 $\mu\Omega/h$ pour E1 et E4 respectivement. Ainsi, la résistance électrique de l'électrolyseur soumis à des ondulations triangulaires s'est dégradée deux fois plus rapidement que celle de référence. Ce type de dégradation sur les contacts électriques est en majorité attribué à des phénomènes de passivation et de corrosion des collecteurs en titane [2]. On retrouve d'ailleurs des traces de titane au niveau de la membrane lors des analyses post-mortem (spectroscopie de rayon X à dispersion d'énergie).

Pour l'électrolyseur de référence E4, les SIE évoluent relativement peu. On note tout de même l'apparition d'un deuxième cercle d'impédance au bout de 1500 heures. Ce cercle est généralement attribué à des phénomènes de diffusion. Ces phénomènes sont largement impactés lors du vieillissement de E1. L'observation post-mortem au microscope électronique à balayage de ce composant met en évidence des modifications structurelles de l'agent hydrophobe de la membrane. Une modélisation de ces différents résultats permettant de séparer et quantifier ces pertes est en cours d'approfondissement. Cependant, ceci n'est qu'une première étude sur des composants qui sont à la base destinés à l'enseignement et ne correspondent donc pas à ce que l'on peut trouver sur le marché pour de plus fortes puissances. Les mêmes essais sont en ce moment effectués sur des composants PEM commerciaux de 50 W.

[1] B. Wahdame et al., "Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack", IEE International Symposium on Industrial Electronics **2008**, 1495-1500.

[2] A. S. Gago et al., "Protective coatings on stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane (PEM) electrolysers", *J. Power Sources* **2016**, 815-825, 307.

Caractérisation de l'influence du régime d'écoulement diphasique sur les performances d'une cellule PEMWE

S. Boulevard^{1,2}, J. J. A. Kadjo¹, A. Thomas², B. Grondin Perez¹, S. Martemianov²

1 Energy-Lab (L2EP), Université de la Réunion, 15, avenue René Cassin CS 92003 | 97744 Saint-Denis cedex 9, France

2 Institut Pprime, Université de Poitiers-CNRS-ENSMA, UPR 3346, 2 Rue Pierre Brousse, Bâtiment B25, TSA 41105, F-86073, Poitiers Cedex 9, France

La technologie d'électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEMWE) est un système émergent pour la production d'hydrogène. Les verrous encore existant sont bien sur le coût et la durabilité, mais concerne aussi l'optimisation des cellules et conditions opératoires jouant directement sur les performances du système. Le travail proposé ici est d'étudier l'influence des régimes d'écoulement sur les performances d'une cellule PEMWE en faisant varier le débit anodique pour deux topologies de plaques d'alimentation : une topologie « matricielle » développée spécifiquement pour homogénéiser l'écoulement et une topologie « grille » classiquement utilisée.

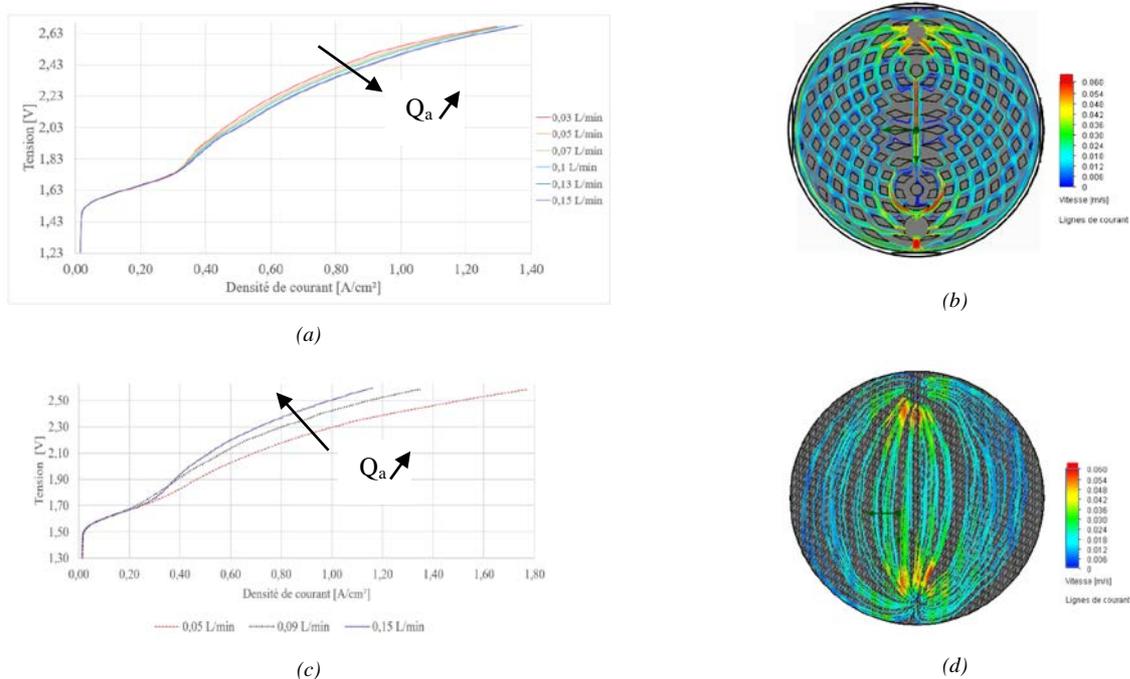


Figure 1 : (a) Courbe de polarisation et (b) ligne de courant de la topologie matricielle, (c) Courbe de polarisation et (d) ligne de courant de la topologie grille

On peut observer Figure 1, l'influence du débit anodique (Q_a) sur les performances de la topologie matricielle (Fig. 1a) et grille (Fig. 1c). L'augmentation du débit améliore les performances pour la topologie matricielle et inversement, diminue les performances de la topologie grille. Ces comportements sont liés à l'évacuation plus ou moins efficace des bulles d'oxygène à l'interface couches poreuses/plaque d'alimentation en eau dépendant donc des régimes d'écoulement [1].

[1] J.O. Majasan, J.I.S. Cho, I. Dedigama, D. Tsaoulidis, P. Shearing, D.J.L. Brett, Two-phase flow behaviour and performance of polymer electrolyte membrane electrolyzers: Electrochemical and optical characterization, *International Journal of Hydrogen Energy*, **2018**, 43, 15659.

Exploration des régimes bulleux au sein d'un système électrolyseur à membrane échangeuse de protons

Idriss Sinapan, Christophe Lin-Kwong-Chon, Cédric Damour, Michel BenneFarid Aubras, Brigitte Grondin-Pérez, Jean-Jacques Amangoua Kadjo

LE2P – ENERGY-Lab, - University of Reunion Island 15, Avenue René Cassin CS 92003 97744 SAINT-DENIS CEDEX 9

Le stockage hybride d'énergie par vecteur hydrogène est une des technologies prometteuses pour la transition vers une autonomie énergétique. Malgré tout, le système électrolyseur à membrane échangeuse de protons est empreint de plusieurs verrous. En effet, l'étude approfondie pour la compréhension des réactions électrochimiques, de transfert de masse et de transfert de chaleur constitue l'un des challenges pour améliorer l'efficacité de la production d'hydrogène [1]. L'évolution des régimes biphasique dans les canaux de distribution et la couche de diffusion anodique impacte les performances électrochimiques [2], le suivi des bulles apporte ainsi des informations essentielles au fonctionnement du système. Dans le but d'y parvenir, la mise en place d'une configuration spécifique est indispensable pour l'acquisition de la visualisation. À ce titre, cette étude présente un système d'acquisition haute fréquence et haute densité pour la discrimination des bulles dans la chambre anodique d'une cellule d'électrolyseur. La configuration de cellule employée est une architecture avec une membrane circulaire disposant de couche de diffusion et de collecteur de courant sous forme de grille en titane, et des canaux de circulation entièrement transparents. Les premiers résultats ont permis d'identifier de nombreuses classes de bulles [3], [4] mais aussi les différents régimes de fonctionnement biphasique.

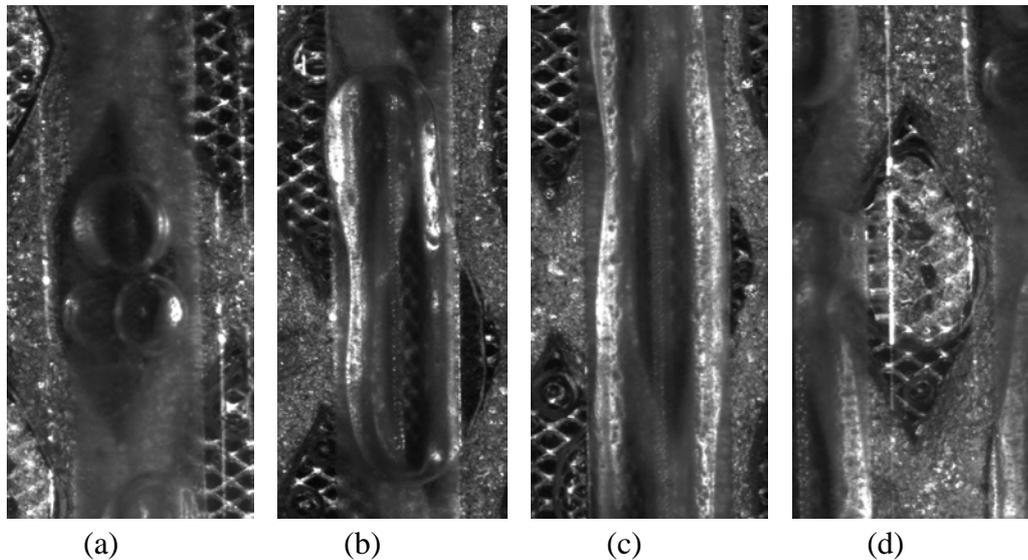


Figure 1 Différentes classes de bulles dans les canaux de distributions et grille collectrice de courant :
(a) cap-bubbly ; (b) slug ; (c) annular ; (d) stagnated.

[1] B. Zhang, S.-X. Zhang, R. Yao, Y.-H. Wu, et J.-S. Qiu, « Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges », *J. Electron. Sci. Technol.*, p. 100080, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jnlest.2021.100080.

[2] J. O. Majasan, J. I. S. Cho, I. Dedigama, D. Tsaoulidis, P. Shearing, et D. J. L. Brett, « Two-phase flow behaviour and performance of polymer electrolyte membrane electrolyzers: Electrochemical and optical characterisation », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, n° 33, p. 15659-15672, août 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.003.

[3] M. Maier *et al.*, « Diagnosing Stagnant Gas Bubbles in a Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyser Using Acoustic Emission », *Front. Energy Res.*, vol. 8, p. 582919, oct. 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.582919.

[4] J. L. Xu, P. Cheng, et T. S. Zhao, « Gas liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps », *Int. J. Multiph. Flow*, p. 22, 1999.

Cogénération d'électricité et de froid en milieu tropical isolé

Hugo Lambert¹, Robin Roche², Samir Jemeï¹, Pascal Ortega³ et Daniel Hissel¹

¹FEMTO-ST, FCLAB, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France

²FEMTO-ST, FCLAB, CNRS, UTBM, Univ. Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France

³GEPASUD, Univ. Polynésie Française, Faa'a, Polynésie Française

Afin de subvenir aux besoins électriques et thermiques en zone tropicale de manière décarbonée, il est essentiel de coupler des moyens de production d'énergie renouvelable à des moyens de stockage d'énergie. Par ailleurs, en milieu tropical, la demande en froid est très importante toute l'année. Dans de nombreuses îles la production d'électricité est assurée par des générateurs diesels. L'importation de carburant représente un coût important et condamne ces îles à une forte dépendance énergétique [1]. En combinant du stockage sous forme d'hydrogène à un stockage sous forme de batterie, un micro-réseau hybride permet d'assurer l'approvisionnement et l'autonomie énergétique du site considéré [2]. Par ailleurs, les piles à combustible et les électrolyseurs basse température, en fonctionnement, produisent de la chaleur qui peut être valorisée. Cette chaleur fatale peut être convertie et stockée sous forme de froid par procédé thermochimique [3]. Les enjeux de cette étude sont le couplage d'une pile à combustible, d'un électrolyseur et d'un réacteur thermochimique et de piloter de manière intelligente l'ensemble des flux d'énergie, électrique et thermique, afin de subvenir aux besoins électriques et au confort thermique de logements en Polynésie Française (figure 1). Pour cela, un dimensionnement et une gestion intelligente des flux énergétiques doivent permettre de répondre à la demande électrique et thermique tout en réduisant les coûts de fonctionnements et en allongeant au maximum la durée de vie des équipements.

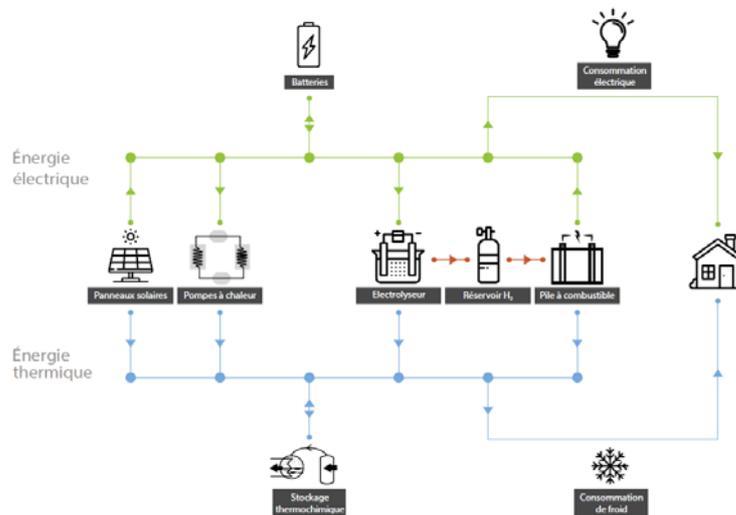


Figure 1. Micro-réseau de cogénération d'électricité et de froid

[1] E. NOWAK, 'L'Observatoire Polynésien de l'Énergie (OPE)', *Service des énergies*. <https://www.service-public.pf/sde/observatoire-polynesien-des-energies-ope/> (accessed May 04, 2021).

[2] H. Lambert, R. Roche, S. Jemeï, P. Ortega, and D. Hissel, 'Combined Cooling and Power Management Strategy for a Standalone House Using Hydrogen and Solar Energy', *Hydrogen*, vol. 2, no. 2, pp. 207–224, Jun. 2021, doi: 10.3390/hydrogen2020011.

[3] F. Ferrucci, D. Stitou, P. Ortega, and F. Lucas, 'Mechanical compressor-driven thermochemical storage for cooling applications in tropical insular regions. Concept and efficiency analysis', *Appl. Energy*, vol. 219, pp. 240–255, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.049.

Zones Industrielles Portuaires et Hydrogène — Opportunités pour la Valorisation des Énergies Fatales

A. Roy¹, J.C. Olivier¹, F. Auger¹, B. Auvity², E. Schaeffer¹, S. Bourguet¹, J. Perret³, J. Schiebel⁴

¹IREENA, 37 bd de l'université, 44600 Saint-Nazaire

²LTEN, La Chantrerie, Rue Christian Pauc 44300 Nantes

14. ³MAN Energy Solutions France, Avenue de Chatonay – Porte 7, BP427, 44615 Saint-Nazaire

⁴AKAJOULE, La Station 18 Bd Paul Perrin, 44600 Saint-Nazaire

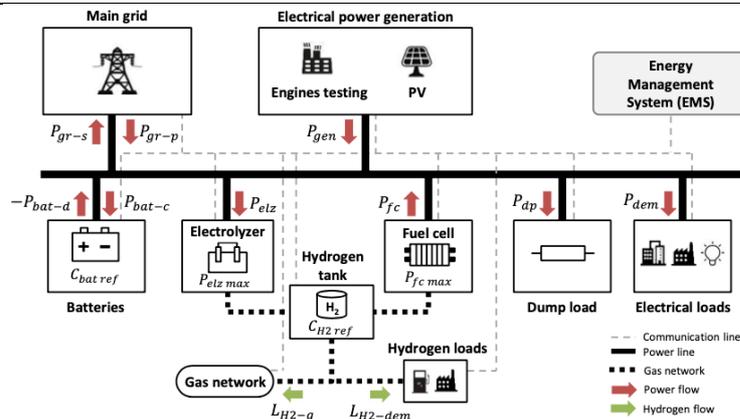


Figure 2 : Architecture du micro-réseau envisagé

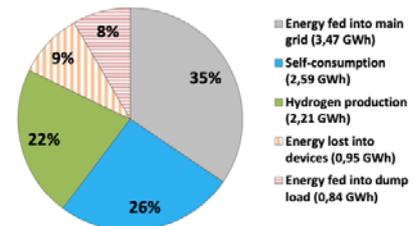


Figure 3 : Valorisation de l'énergie fatale disponible

La transition énergétique en cours oblige à repenser les différents réseaux énergétiques (électricité, chaleur/froid ou gaz), historiquement pensés et dimensionnés de l'amont (production) vers l'aval (consommation). De nouveaux usages apparaissent, nécessitant l'émergence de vecteurs énergétiques tels que l'hydrogène. Il s'avère que les zones industrielles portuaires présentent un très fort potentiel dans le déploiement de ces nouveaux vecteurs, en particulier du fait de la conjonction des besoins croissants d'énergies alternatives dans le transport maritime et de la présence d'industries ayant un fort potentiel de valorisation d'énergies fatales ou renouvelables. La zone de Saint-Nazaire est un territoire particulièrement impacté par ces changements et souhaite donc à terme mettre en place des solutions de type Smart-Grid industrialo-portuaire, multi-énergies et multi-usages. Dans ce cadre, le projet ADOME Estuaire vise à chercher des scénarios de valorisation du potentiel de production des zones portuaires, qui soient économiquement viables et capables de répondre aux besoins potentiels, notamment en s'appuyant sur l'hydrogène comme futur vecteur énergétique pour la mobilité.

Le travail présenté ici s'appuie sur les premiers résultats d'étude obtenus pour un industriel de la zone portuaire de Saint-Nazaire. Cette entreprise, qui fabrique des moteurs thermiques de très forte puissance (jusqu'à 26 MW), a un potentiel important de valorisation de l'énergie issue des essais moteurs. Nous avons ainsi proposé une architecture originale de valorisation de cette énergie fatale (essais moteurs complétée par une installation de panneaux photovoltaïques) sous différentes voies, voir Fig. 1, en intégrant les futurs usages en hydrogène, notamment pour les besoins de mobilité, mais aussi pour les différents industriels de la zone portuaire et l'injection directe dans le réseau de gaz. En recourant à une optimisation couplée dimensionnement-gestion, construite autour de l'association d'un algorithme génétique pour les variables de dimensionnement et d'une formulation MILP pour le problème de gestion, il a pu être montré l'opportunité que représente l'hydrogène comme vecteur de valorisation des énergies fatales sur un tel site industriel, cf Fig. 2.

[1] A. Roy, F. Auger, J.-C. Olivier, E. Schaeffer, B. Auvity. Design, Sizing, and Energy Management of Microgrids in Harbor Areas: A Review, *Energies*, 2020.

[2] Ç. Iris, J.S.L. Lam. A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2019.

[3] J. Kurtz, T. Bradley, E. Winkler, C. Gearhart. Predicting demand for hydrogen station fueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020.

[4] A. Roy, J.-C. Olivier, F. Auger, B. Auvity, E. Schaeffer, S. Bourguet, J. Schiebel, J. Perret. A combined optimization of the sizing and the energy management of an industrial multi-energy microgrid: application to a harbor area, submitted to *Applied Energy*, April 2021.

Les systèmes hydrogène au centre PERSEE de MINES ParisTech : passé, présent et futur

Pedro Affonso Nobrega, Cédric Sernissi, Christian Beauger, Patrick Achard

MINES ParisTech, Université PSL, Centre Procédés Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques (PERSEE), 06904 Sophia Antipolis, France

Le Groupe MATPRO du Centre PERSEE de MINES ParisTech/ARMINES s'intéresse aux systèmes hydrogène depuis plus de 30 ans. A l'origine de l'aventure, en 1990, des travaux sur la production d'hydrogène par reformage d'ammoniac et le couplage avec une pile à combustible alcaline [1,2]. Par la suite, dans le cadre du projet FEVER [3], nous avons contribué au développement du premier véhicule à hydrogène en France, avec la caractérisation de *stacks* PEMFC, l'optimisation et l'intégration du système, des études sur la gestion de l'eau [4] ou les stratégies d'alimentation [5] des piles à combustible. Au-delà de la mobilité terrestre, le domaine applicatif s'est élargi au véhicule autonome sous-marin [6], au stockage saisonnier d'électricité [7,8], à l'aéronautique [9] ou encore à la μ -cogénération [10] avec entre autres le développement de modèles systèmes type OD [6,10] et l'étude de l'hybridation pile-batterie pour des applications stationnaires [8] ou mobiles [9].

Aujourd'hui, l'activité « systèmes H₂ » de notre groupe est en pleine expansion, avec le renouvellement de l'équipe et l'accélération de la collaboration avec la société Symbio, initiée au moment de sa création avec le projet NEIGE, dédié au développement d'un système de recirculation anodique passive [11]. Dans le domaine des systèmes pile à combustible, nous travaillons activement au développement d'une nouvelle méthode d'humidification/refroidissement évaporatif ou encore à l'hybridation électrique et thermique pour des applications embarquées. Nous sommes par ailleurs impatients de participer à l'édition 2021 du Monaco Energy Boat Challenge avec un bateau à propulsion électrique alimenté par une pile à combustible de 5 kW. Nous venons également de relancer une étude sur les procédés de production d'hydrogène à partir de composés azotés.

Pour mener à bien ces projets, nous disposons d'une infrastructure expérimentale « agile » qui nous permet de tester et caractériser des systèmes jusqu'à 10 kW (avec des plans d'expansion à 50/100 kW) et nous visons à renforcer notre expertise en modélisation des systèmes, avec un focus sur les modèles de type OD et sur les aspects tels que la gestion thermique et la gestion de l'eau ou encore les phénomènes de dégradation. Mais surtout, nous comptons sur une équipe à taille humaine et pluridisciplinaire, favorisant les échanges et la collaboration étroite avec les industriels et les laboratoires académiques partenaires, restant fidèles à l'esprit de MINES ParisTech : une recherche appliquée tournée vers l'industrie.

[1] Metkemeyer, R. & Achard, P. *J. Power Sources* **1994**, 49, 271–282.

[2] Metkemeyer, R. & Achard, P. *Int. J. Hydrogen Energy* **1994**, 6, 535–542.

[3] Metkemeyer, R., Achard, P., Rouveyre, L., Picot, D. *In: Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions*. Springer, **1998**.

[4] Picot, D., Metkemeijer, R., Bezian, J. J., Rouveyre, L. *J. Power Sources* **1998**, 75, 251–260.

[5] Rouveyre, L. Thèse de doctorat, ENSMP, **1998**.

[6] Raugel, E. Thèse de doctorat, ENSMP, **2004**.

[7] Busquet, S. Thèse de doctorat, ENSMP, **2005**.

[8] Labbé, J. Thèse de doctorat, ENSMP, **2007**.

[9] Hordé, T., Achard, P., Metkemeijer, R. *Int. J. Hydrogen Energy* **2012**, 37, 10818–10829.

[10] Hubert, C. E., Achard, P., Metkemeijer, R. *J. Power Sources* **2006**, 156, 64–70.

[11] De Grisard, B. Thèse de doctorat, ENSMP, **2014**.

Air Liquide and AXANE Hydrogen and Fuel Cell (tbc)

The catalyst coated membrane fabrication: identification of key parameters and its impact on PEMFC performances

Turtayeva Z.¹, Xu F.¹, Dillet J.¹, Mozet K.¹, Peignier R², Celzard A.², Maranzana G.¹

¹ LEMTA, UMR CNRS 7563, CNRS/Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

² Université de Lorraine, CNRS, IJL, 88000 Épinal, France

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is an energy conversion device that directly converts the chemical energy of a fuel into electricity and heat. The heart of a PEMFC, namely membrane electrode assembly (MEA) is composed of a polymer electrolyte membrane (PEM), 2 catalyst layers (CL) and 2 gas diffusion layers (GDL). There are two methods for making a MEA which is either coating an electrode directly on membrane or on GDL. The approach of making a MEA depends on electrode inks and coating techniques.

Although there is a lot of studies about the composition of electrode ink for improving PEMFC performance, there is only a few papers dealing with coating field, in particular the choice of Pt/C powder, Pt loading and its impact on PEMFC performance.

In this work, we attempt to identify some key parameters for improving coating and its impact on fuel cell performances via polarization curves and electrochemical active surface area. Moreover, we discussed Pt/C difference from different suppliers and its storage. For this purpose, we prepared catalyst ink using 40% Pt/C from Alfa Aesar and Fuel cell Store, and made some catalyst coating membranes (CCMs) using a commercial ultrasonic spray bench. After optimizing the spraying configuration, the coating surface and thickness of CCMs were characterized and measured by profilometer technique. The performance of CCMs were compared via CV curves obtained with a homemade fuel cell bench.

During the manufacture process of CCMs, we faced a lot of clichés that misled our comprehension of results. For this reason, we would like to share them and discuss here in order to support new beginners in coating field, especially not in catalyst domain.

[1] M. B. Sassin, et al., *ACS Publications*, **2017**, p. 511-518, 89.

[2] S. Shahgaldi et al., *Appl. Energy*, **2018**, p.1022–1032, 225.

Estimation of transfer parameters in PEM fuel cells

Rémi Bligny¹, Jérôme Dillet¹, Sophie Didierjean¹, Tobias Schmitt^{1,2}, Ulrich Sauter², Gaël Maranzana¹

¹ *Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France, 2 Avenue de la Forêt de Haye, BP 90161, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy cedex*

² *Robert Bosch GmbH | Renningen | 71272 Stuttgart | GERMANY*

In order to produce higher current densities in PEM fuel cells, concentration and ohmic losses have to be reduced as much as possible. At high current densities, a large amount of water is produced in the cathode catalyst layer where it can accumulate. Even though water is needed to sufficiently humidify the ionomer and so to reduce the ohmic losses due to protons conduction, liquid water filling the porous layers hinders the oxygen transfer to the reaction sites. Water management is highly related to heat transfer: the temperature field imposes a saturation pressure profile through the several layers, the maximum water vapor flux through GDL as well as phase change within it. In this work, crucial parameters to heat and water transfer are studied and estimated. An experimental bench is developed in order to study 1D transfers in a differential cell, where all transfers can be considered in the through-plane direction. Inlet relative humidities are accurately controlled by two membrane humidifiers and the two cell plates temperatures, all independently controlled. In order to capture the cell dynamic, dry gas is injected into the manifold at the outlet of each plate to evaporate small stagnant droplets of liquid water. The measurement of the inlet and outlet relative humidities and pressures allow to perform a real-time water balance and so to monitor the water storage or release from the membrane, electrodes, GDL and channels.

The thermal resistance between the MEA and the plates, and the diffusion coefficient of water in the membrane are two essential modelling parameters and are estimated. The first one is determined by considering the link between heat and water transfer and applying a temperature difference between the two plates. The diffusion coefficient is estimated by applying a relative humidity gradient between the inlet gases for several temperatures, with and without thermal gradient between plates. A sorption isotherm is also performed to correlate channels relative humidities and interfaces water content. The influence of the experimental conditions is discussed. The estimation of these parameters will feed a one-dimensional model of coupled water and heat transfers.



Figure 1: Photograph of the experimental bench

Modeling of the two-phase transport in PEM fuel cell

E. Tardy^{1,2}, J.-P. Poirot-Crouvezier², P. Schott², C. Morel², G. Serre², M. Chandesris², Y. Bultel¹

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, LEPMI, F-38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, F-38000 Grenoble, France

The Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is a promising candidate for many applications, either stationary or transportation. Of the many barriers, cost and durability represent two of the most significant challenges to achieving clean, reliable and cost-effective fuel cell systems. Effective management of the liquid water and heat produced in PEM fuel cells remains crucial to increase both its performance and durability. Indeed, significant liquid water and temperature variations over the cell surface area and among the cells may accelerate long-term structural problems such as micro-cracks in the membrane.

A two-phase multi-component model of a PEM fuel cell is developed. The model considers the cell as a multilayered system and each layer is accurately in-plane discretized to allow the simulation of local temperature and species heterogeneities, including liquid water. The objective of the model is the prediction of the distributions of current density, species concentrations, water content and temperature in all the components of the cell, while taking into account the real flow-field designs. The model can be compared to experimental temperature and current density data and liquid water measurement obtained from neutron imaging tests in several operating conditions.

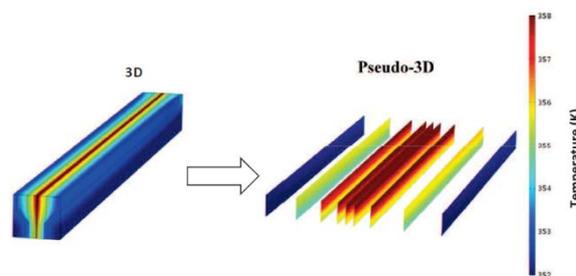


Figure 1 : 3D Model vs Pseudo-3D Model

Currently, the model is starting to deliver some results, which will be analyzed shortly but the calculation time is relatively long. Indeed, the 2-fluid model is complex since the transfer of mass, momentum and energy from one phase to another are implemented in the model. Therefore, it is necessary to find the appropriate closure laws, which are still widely discussed in the literature. In addition, the closure laws have a significant impact on the convergence of the model and the accuracy of the results.

- [1] E. Tardy, F. Courtois, M. Chandesris, J.-P. Poirot-Crouvezier, A. Morin, Y. Bultel, Investigation of liquid water heterogeneities in large area PEM fuel cells using a pseudo-3D multiphysics model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 145, **2019**, 118720, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118720>
- [2] F. Nandjou, J.-P. Poirot-Crouvezier, M. Chandesris, Y. Bultel, *International Journal of Hydrogen Energy*, **41** (2016) 15545-15561

An innovative non-mechanical hydrogen compressor based on cyclic adsorption-desorption on activated carbons

G. Sdanghi^{1,2}, V. Nicolas¹, K. Mozet², P. Ramirez-Vidal¹, G. Maranzana², A. Celzard¹, V. Fierro¹

¹ IJL, UMR CNRS 7198, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Seguin, Epinal, France

² LEMTA, UMR CNRS 7563, Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, Vandœuvre-lès-Nancy, France

Although hydrogen is advocated as a promising candidate to replace fossil fuels, its low volumetric energy density still remains a major drawback (0.01079 MJ/L at standard temperature and pressure). At present, compression is the most widely used technical solution for storing hydrogen. Indeed, composite pressure tanks have been successfully developed, which allow reaching a gravimetric storage density of 6 wt. % at 700 bar.

Hydrogen can be compressed by using either mechanical or non-mechanical compressor technologies [1]. Mechanical hydrogen compressors are used worldwide, since they are based on a mature and reliable technology. Nevertheless, the major shortcoming of mechanical hydrogen compressors has to be addressed: their cost, which is around half the cost of a hydrogen refuelling station. In addition, mechanical compressors have several disadvantages, such as the presence of many moving parts, hydrogen embrittlement, high consumption of energy, high structural complexity and difficult heat management [2]. Conversely, non-mechanical hydrogen compressors have shown several advantages over the mechanical ones, such as the absence of moving parts and high compactness. In this context, we have designed and built a prototype non-mechanical compressor based on cyclic adsorption-desorption on activated carbons [3]. The prototype has a volume of 0.5 L, and was filled with 0.135 kg of a high surface area-activated carbon (MSC-30, Kansai, Japan). 30 NL/h of high-pressure hydrogen at 700 bar were obtained by introducing hydrogen at 80 bar into the compressor, previously cooled to 77 K, and heating it to 315 K. The use of the proposed hydrogen compressor might promote a new scenario for the future hydrogen supply chain. Indeed, it could be a valid alternative to traditional mechanical compressors, and it could be used in small and decentralized facilities using hydrogen as a fuel, e.g. a hydrogen refuelling station.

[1] G. Sdanghi, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, 102, 150-170

[2] G. Sdanghi, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, *Energies* **2020**, 13, 3145

[3] G. Sdanghi, V. Nicolas, K. Mozet, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, *Carbon* **2020**, 161, 466-478

Substitution du Fe par le Mn et le Ti dans l'alliage TiFe pour le stockage solide de l'hydrogène à grande échelle

Fermin Cuevas¹, Erika Michela Dematteis^{1,2}, Marcello Baricco², Michel Latroche¹

¹Univ. Paris Est Creteil, CNRS, ICMPE, UMR7182, Thiais, France

²University of Turin, Department of Chemistry and NIS – INSTM, Torino, Italy

TiFe est un composé intermétallique clé pour le stockage solide de l'hydrogène à grande échelle en raison de son faible coût, de sa haute densité volumétrique en hydrogène et de la possibilité d'adapter ses propriétés thermodynamiques d'hydrogénation par le jeu de substitutions élémentaires [1]. Pourtant, les conditions d'activation et les propriétés cinétiques restent à améliorer et le rôle des substitutions à mieux appréhender. Ce travail étudie en profondeur les changements thermodynamiques induits par la variation de la teneur en Ti dans le domaine d'homogénéité en titane de la phase TiFe (rapport stœchiométrique Ti:Fe entre 1:1 et 1:0.9) et de la substitution de Mn pour Fe entre 0 et 5 at.% [2]. La but de ce travail est de définir une composition de l'alliage adaptée et optimisée au stockage de 50 kg d'hydrogène dans le cadre du projet européen HyCARE [3].

Les données thermodynamiques obtenues fournissent une vision complète des propriétés d'hydrogénation des alliages Ti-Fe-Mn sur une plage de composition étendue autour de la stœchiométrie 1:1 (Figure 1). Nous démontrons que les alliages riches en Ti affichent des capacités de stockage améliorées tant qu'une quantité limitée de phase β -Ti est formée. Les substitutions du Mn et du Ti sur le site du Fe augmentent le volume de la maille intermétallique, abaissant ainsi les pressions de plateau et diminuant l'hystérésis des isothermes. Les difficultés d'activation sont résolues par une précipitation mineure des phases de type TiFe_2 et de type $\text{Ti}_4\text{Fe}_2\text{O}$ ou β -Ti du côté pauvre et riche en Ti du domaine d'homogénéité de TiFe, respectivement. La composition optimale s'avère être $\text{TiFe}_{0.85}\text{Mn}_{0.05}$, pour laquelle une activation facile ainsi qu'une forte absorption réversible d'hydrogène (1,63 mas.%) sont atteintes à température ambiante en utilisant des pressions d'hydrogène modérées dans la plage de 0.03 à 2.5 MPa.

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (under grant agreement No 826352). The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, and Italy, France, Germany, Norway.

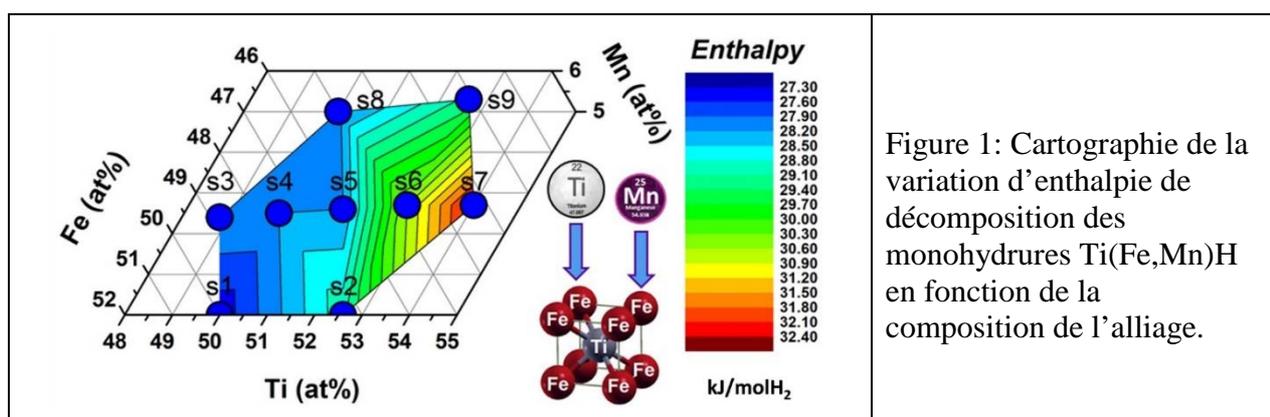


Figure 1: Cartographie de la variation d'enthalpie de décomposition des monohydrures Ti(Fe,Mn)H en fonction de la composition de l'alliage.

[1] E.-M. Dematteis, N. Berti, F. Cuevas, M. Latroche, M. Baricco, *Mater. Adv.*, **2021**, 2, 2524 – 2560

[2] E.-M. Dematteis, D. M. Dreistadt, G. Capurso, J. Jepsen, F. Cuevas, M. Latroche, *J. Alloys Comp.* **2021**, 874, 159925

[3] <https://www.hycare-project.eu>

Numerical simulation and optimization of the performances of a thermally-driven hydrogen compressor

V. Nicolas¹, G. Sdanghi^{1,2}, K. Mozet², S. Schaefer¹, G. Maranzana², A. Celzard¹, V. Fierro¹

¹ *IJL, UMR CNRS 7198, Université de Lorraine, 27 rue Philippe Seguin, Epinal, France*

² *LEMETA, UMR CNRS 7563, Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, Vandœuvre-lès-Nancy, France*

The modelling of a non-mechanical hydrogen compressor based on cyclic adsorption-desorption of hydrogen on activated carbon (AC) [1] was successfully completed. The model was able to accurately predict pressure, temperature and discharge flow [2] for three heating powers (100W, 200W and 300W) used to promote hydrogen desorption. A temperature variation was observed experimentally during the compressor discharge and explained by the simulation. It is due to heat transfer from the colder center to the warmer periphery of the compressor, linked to the mass transfer induced by the discharge.

The parametric study on power and temperature showed that the more the power, and therefore the temperature, is increased the more hydrogen is discharged. Moreover, the variation in the amount of hydrogen discharged is linear to the final set temperature. Finally, increasing the heat transfer by convection with the outside air would significantly reduce the compression time, by approximately 75%, which shows the need to optimize heat transfers in the case of an industrial compressor. After studying the heat transfer outside the compressor, further studies are needed to optimize of heat transfer inside the AC bed. Possible strategies to achieve this are the addition of conductive materials or the use of internal exchangers, among others.

[1] G. Sdanghi, V. Nicolas, K. Mozet, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, Modelling of a hydrogen thermally driven compressor based on cyclic adsorption-desorption on activated carbon, *Int. J. Hydrog. Energy*. 44, **2019**, 16811–16823. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.233>.

[2] G. Sdanghi, V. Nicolas, K. Mozet, S. Schaefer, G. Maranzana, A. Celzard, V. Fierro, A 70 MPa hydrogen thermally driven compressor based on cyclic adsorption-desorption on activated carbon, *Carbon*. 161, **2020**, 466–478. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.099>.

Hydrogen generation from waste Mg alloys / Light mobility

Serge Al Bacha¹, Jocelyn Sabatier², Fabrice Mauvy¹, Isabelle Aubert³, Arnaud Desmedt⁴ and Jean-Louis Bobet¹

¹ ICMCB, CNRS, Université de Bordeaux, 87 Av du Dr Schweitzer, 33600 Pessac

² I2M, CNRS, Université de Bordeaux, 351 Avenue de la libération, 33400 Talence

² I2M, CNRS, Université de Bordeaux, 351 Avenue de la libération, 33400 Talence

³ ISM, CNRS, Université de Bordeaux, 351 Avenue de la libération, 33400 Talence

The hydrolysis of magnesium alloys wastes in seawater (*i.e.* 3.5 wt.% of NaCl aqueous solution) is a new approach which allows both *in-situ* hydrogen production and the valorization of *a priori* non-recyclable wastes.

Mg – Al alloys (more precisely AZ91) are the most widely used. In these alloys, Al forms with Mg the intermetallic Mg₁₇Al₁₂. To better understand the mechanism of hydrogen production from these binary Mg – Al alloys (Mg + Mg₁₇Al₁₂), evaluating the behavior of each of their constituents and their interactions is essential. In this regard, the chemical (*i.e.* hydrolysis) and electrochemical (*i.e.* corrosion) aspects of the reaction of Mg₁₇Al₁₂ with the model seawater solution and the effect of milling in the presence of additives (*e.g.* graphite, NaCl, MgCl₂ and AlCl₃) were studied. The evolution of the surface chemistry during polarization tests has proven experimentally (by Raman spectroscopy), for the first time, the formation of reaction intermediate and has allowed us to propose a mechanism of H₂ formation. The interaction between Mg and Mg₁₇Al₁₂ was explored by comparing the properties of model materials of « AZ91 » (Mg + Mg₁₇Al₁₂). Using scanning electrochemical microscopy, the effect of galvanic coupling was studied at the interface of the two components of the material. In view of these studies, the contribution of Mg₁₇Al₁₂ in the corrosion of AZ91 alloys was clarified where the intermetallic is corrosion resistant and accelerates the corrosion of Mg due to galvanic coupling.

The purity of H₂ (the composition of the gas mixture and its humidity) produced was semi-quantitatively evaluated. The impact of few experimental conditions (*e.g.* composition of the solution, temperature, ratio of the mass of powder to the volume of solution) has shown a major effect on the purity of the produced H₂. Thus, it has been shown that Mg-based materials can be valorized by the hydrolysis reaction and can be as a « green » hydrogen on demand production technic for light or short distance mobility.

Other alloys were also studied and the effect of various additives were explained. Therefore, such powder mixtures were tested in a prototype to power a fuel cell on an electrically assisted bike (and also to charge a cell phone). The results will be presented in term of power generated, biking range, thermal exchange and cycle life analysis.

Keywords: Hydrogen, Mg alloys, Mg₁₇Al₁₂, Hydrolysis, Corrosion, Ball milling.

Optimisation du processus de rodage accéléré des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

F. Van Der Linden^{1,2}, E. Pahon³, S. Morando¹, D. Bouquain²

¹*SYMBIO, Vénissieux, France*

²*FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France*

³*FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, Belfort, France*

Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) nécessitent une procédure d'activation/de rodage lors de leur première utilisation après assemblage. Ce processus peut durer plusieurs heures, consomme une quantité non négligeable d'hydrogène et nécessite un banc d'activation en fin de ligne de production. Le rodage a ainsi un coût élevé, en plus d'être chronophage, ce qui le rend incompatible avec une industrialisation à grande échelle. C'est sur ce verrou que cette étude en collaboration entre FEMTO-ST/FCLAB et SYMBIO se positionne. Son objectif principal est de déterminer et de valider expérimentalement des procédures de rodage optimisées afin de réduire la durée associée à la mise en état de fonctionnement nominal du dispositif électrochimique.

Dans le cadre de ces travaux, une étude poussée des principes physiques du rodage a été effectuée, afin de dissocier les différents mécanismes affectant l'activation de pile. Ils consistent principalement en des changements morphologiques au sein de l'assemblage membrane électrode et sont : l'hydratation du Nafion™, la modification de la porosité de la couche catalytique, et la désorption/évacuation des impuretés présentes en surface de catalyseur [1].

D'autre part, les méthodes, techniques et approches innovantes permettant d'accélérer la dynamique de rodage de la PEMFC ont été étudiées. Dans la littérature, elles sont définies comme étant des méthodes de rodage « accéléré » [2]. Le « décapage » au monoxyde de carbone (CO) permet, par exemple, de nettoyer le platine, alors que la réaction d'évolution de l'hydrogène (HER) augmente la porosité des couches catalytiques. D'autres pistes, telle que l'optimisation du processus de fabrication de PEMFC à des fins de réduction de durée de rodage ont été aussi analysées [3].

Des premières applications expérimentales de protocoles de rodage accéléré ont permis de confirmer certaines hypothèses concernant les principes physiques du rodage et des méthodes associées. En parallèle, un modèle physique permettant de simuler le rodage de pile est en développement dans le cadre de ces travaux.

Les principales perspectives de ces travaux consistent à poursuivre la campagne expérimentale de rodage accéléré basé sur les connaissances issues de la littérature. Ceci permettra d'une part d'optimiser le processus de rodage de PEMFC, et d'autre part d'alimenter le modèle physique.

[1] J.-M. Jang, G.-G. Park, Y.-J. Sohn, S.-D. Yim, C.-S. Kim, et T.-H. Yang, « The Analysis on the Activation Procedure of Polymer Electrolyte Fuel Cells », *J. Electrochem. Sci. Technol.*, vol. 2, n° 3, p. 131-135, sept. 2011, doi: 10.33961/JECST.2011.2.3.131.

[2] X.-Z. Yuan, S. Zhang, J. C. Sun, et H. Wang, « A review of accelerated conditioning for a polymer electrolyte membrane fuel cell », *J. Power Sources*, vol. 196, n° 22, p. 9097-9106, juin 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.06.098>.

[3] F. Van der Linden, E. Pahon, S. Morando, et D. Bouquain, « Optimizing Proton Exchange Membrane Fuel Cell manufacturing process to reduce break-in time », in *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Gijon, Spain, nov. 2020, p. 1-5, doi: 10.1109/VPPC49601.2020.9330846.

Etude expérimentale des capacités de démarrage à froid d'une pile à combustible de type PEM

J. Villaume^{1,2}, E. Pahon^{1,2}, A. Ravey^{1,2}, S. Jemeï¹

¹ FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France

² ST Institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, CNRS, Belfort, France

Une pile à combustible produit de l'eau lors de son fonctionnement et dans des conditions de températures négatives, cette eau peut geler. Ainsi, lors d'un démarrage à température négative l'objectif est d'élever rapidement la température de la pile à combustible au-dessus de 0°C avant que l'eau produite par la réaction ne gèle. Le démarrage à température négative des piles à combustible peut être divisé en deux catégories ; les méthodes utilisant un apport d'énergie externe et les méthodes sans apport d'énergie externe [1, 2]. Dans ce papier, une étude expérimentale utilisant une méthode sans apport d'énergie externe pour évaluer les performances de démarrage à froid d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est présentée. Dans un premier temps, l'impact de la circulation du fluide caloporteur est évalué durant un démarrage à froid. En effet, l'absence de circulation du liquide de refroidissement entraîne une surchauffe des cellules et leur assèchement [3, 4]. Ensuite, la capacité à démarrer à température négative d'une PEMFC avec une méthode de réchauffement interne est évaluée. La méthode utilisée est un contrôle potentiostatique de la charge. Cette méthode permet de maximiser le courant en imposant un niveau de tension faible aux cellules et donc maximiser le dégagement de chaleur pour élever la température de la PEMFC. Préalablement au démarrage, une procédure d'arrêt spécifique doit être réalisée afin d'évacuer l'excès d'eau résiduel dans la pile à combustible afin d'éviter qu'elle ne gèle lors de l'exposition à une température négative. Les performances de cette méthode sont évaluées selon plusieurs critères ; la durée de démarrage, l'énergie consommée et les dégradations irréversibles engendrées par cette méthode. L'impact des facteurs que sont, le niveau de tension et la température initiale au démarrage, est également évalué.

[1] Luo Y, Jiao K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell. *Prog Energy Combust Sci* 2018;64:29–61. <https://doi.org/10.1016/j.peecs.2017.10.003>.

[2] Amamou AA, Kelouwani S, Boulon L, Agbossou K. A Comprehensive Review of Solutions and Strategies for Cold Start of Automotive Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *IEEE Access* 2016;4:4989–5002. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2597058>.

[3] Park YH, Caton JA. Development of a PEM stack and performance analysis including the effects of water content in the membrane and cooling method. *J Power Sources* 2008;179:584–91. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.050>.

[4] Eckl R, Zehner W, Leu C, Wagner U. Experimental analysis of water management in a self-humidifying polymer electrolyte fuel cell stack. *J Power Sources* 2004;138:137–44. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.06.042>.

Vieillessement induit par des cycles répétés de démarrage et d'arrêt sur un stack PEM-HT

M. Durand¹, J. Regnier¹, A. Picot¹, C. Turpin¹, O. Crassous², M. Scohy², R. Stéphan²

¹Laboratoire LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel – BP 7122 – 31071 Toulouse Cedex 7 France

²SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse

Parmi les technologies actuellement disponibles, cette étude s'intéresse aux piles à membrane échangeuse de protons fonctionnant à haute température (160-180°C) également connues sous le nom de PEM-HT. Ces travaux se concentrent sur l'évaluation et la compréhension des mécanismes impactant la durée de vie de ces piles lorsqu'elles sont soumises à des cycles répétés de démarrage et d'arrêt (D/A). Les phénomènes dégradants mis en avant lors de ces phases transitoires sont usuellement : l'exploration de différences de potentiels élevées entre les deux électrodes [1] pouvant conduire à une diminution de la surface électro-chimiquement active par l'altération du catalyseur [2] et la corrosion du support carboné [2, 3]. Les pertes et la migration d'électrolyte de la membrane vers les couches actives voire les couches de diffusion, jouent également un rôle dans l'évolution des performances des PEM-HT [4].

Afin d'étudier le comportement en vieillissement de prototypes industriels de PEM-HT en vue d'applications aéronautiques, deux protocoles distincts ont été définis pour chaque phase de démarrage et d'arrêt, puis ont été répétés entre 50 et 150 fois pour chaque combinaison possible de D/A. Le développement de l'automatisation d'un banc de test a permis de maîtriser les aspects thermiques, fluidiques et électriques inhérents à chaque séquence de démarrage et d'arrêt afin de renforcer la reproductibilité des résultats. Le suivi des performances a été assuré de manière continue par spectroscopie d'impédance électrochimique au cours des phases de cyclage, et avant et après chaque phase par le tracé de courbes de polarisation (CdP) dans un domaine restreint de densités de courant (0,1 à 0,6 A/cm²). Des données de voltammétrie cyclique ont également été acquises pour compléter l'étude.

De premiers résultats ont montré une chute marquée des performances en un temps très court (250 H) résultant semble-t-il d'une augmentation rapide des phénomènes résistifs internes à la pile [5]. Des données plus récentes, issues de cycles de D/A sur un nouveau prototype plus robuste, révèlent une dégradation moins prononcée et tendent à incriminer la corrosion des plaques bipolaires comme principal phénomène dégradant pour les premières versions de stack, sans lien direct avec la répétition de démarrage et d'arrêts. Une analyse plus fine des derniers résultats est en cours dans le but de préciser l'influence de chaque protocole de D/A sur l'état de santé de la pile.

[1] C. A. Reiser *et al.*, « A Reverse-Current Decay Mechanism for Fuel Cells », *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 8, n° 6, p. A273, 2005, doi: [10.1149/1.1896466](https://doi.org/10.1149/1.1896466).

[2] J. C. Meier *et al.*, « Degradation Mechanisms of Pt/C Fuel Cell Catalysts under Simulated Start-Stop Conditions », *ACS Catal.*, vol. 2, n° 5, p. 832-843, mai 2012, doi: [10.1021/cs300024h](https://doi.org/10.1021/cs300024h).

[3] H.-S. Oh, J.-H. Lee, et H. Kim, « Electrochemical carbon corrosion in high temperature proton exchange membrane fuel cells », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, n° 14, p. 10844-10849, juill. 2012, doi: [10.1016/j.ijhydene.2012.04.095](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.095).

[4] J.-R. Kim, J. S. Yi, et T.-W. Song, « Investigation of degradation mechanisms of a high-temperature polymer-electrolyte-membrane fuel cell stack by electrochemical impedance spectroscopy », *Journal of Power Sources*, vol. 220, p. 54-64, déc. 2012, doi: [10.1016/j.jpowsour.2012.07.129](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.129).

[5] M. Durand, *Congrès de l'école doctorale GEETS [en ligne]*, 15 avril 2021, Toulouse, 3 p. Disponible sur : <https://www.adum.fr/download.pl?tk=x4ltpadn4lfvc3vw4ga9cooji8kbfrq> (consulté le 11/05/2021).

Caractérisations des piles à combustible PEM-HT : une investigation expérimentale focalisée sur les dégradations.

Mathieu BAUDY¹, Sylvain RIGAL¹, Amine JAAFAR¹, Christophe TURPIN¹, Sofyane ABBOU²

¹ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 2 rue Charles Camichel, 31071, Toulouse

² SAFRAN POWER UNITS, 8 chemin du pont de Rupé, 31019, Toulouse, France

Depuis 2015, plusieurs travaux au laboratoire LAPLACE portent sur l'étude de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons haute-température (PEM-HT). Dans ce contexte, des essais de vieillissement à courant constant [1] mettent en évidence que les caractérisations électrochimiques réalisées afin de suivre l'état de santé des mono-cellules peuvent être dégradantes.

Dans le cadre du projet PIPAA (Pile à combustible Pour Applications Aéronautiques) [2] piloté par Safran Power Units, une campagne d'essais particulièrement focalisée sur la courbe de polarisation ($v(i)$) est réalisée. Quatre méthodologies différentes de réalisation de $v(i)$ sont proposées pour un essai de cyclage où le profil de courant de ces $v(i)$ est répété trente fois de suite pour différents AME (Assemblage Membrane-Electrodes) de type Advent PBI. Entre chaque $v(i)$ réalisée, un courant constant est maintenu durant un temps de stabilisation déterminé pour que l'essai sur chaque AME dure au total 100 h, avec des phases de caractérisation initiale et finale identiques pour chaque AME. Les essais sont réalisés en même temps sur deux bancs d'essais similaires afin d'assurer la reproductibilité des données.

La comparaison des caractérisations initiale et finale ne dévoilent pas de différences très marquées permettant de conclure sur le fait qu'une méthodologie de $v(i)$ soit plus dégradante qu'une autre. Par contre, différentes observations peuvent être réalisées. Un des AME a vu ses performances augmenter au cours du cycle, augmentation en partie attribuée à la diminution des pertes ohmiques. Cela constitue une piste afin d'améliorer le rodage de l'AME. Aussi, une même tension initiale d'émission de CO₂ est identifiée pour chaque cycle en ayant émis. Elle est attribuée à la réaction de corrosion du carbone.

De plus, afin de compenser les variations de la tension engendrées par les conditions opératoires comme la température (impactée par la régulation thermique de la mono-cellule et son inertie) et de la pression (non régulée, laissée à la pression atmosphérique), une méthodologie de recalage est expérimentée. Celle-ci se base sur l'utilisation d'un modèle empirique issu d'une étude de sensibilité sur les conditions opératoires. Son objectif est de permettre, après traitement, de comparer des données à des conditions opératoires similaires.

Enfin, une modélisation des données est actuellement en cours de réalisation. Son objectif est de proposer une évolution temporelle des paramètres d'un modèle quasi-statique de la PEM-HT. Des essais complémentaires sont aussi prévus afin de conclure sur les différentes observations réalisées.

[1] S. Rigal, Etude du vieillissement et modélisation des PEM-HT, Thèse, Toulouse INP 2020.

[2] BPI France, Le projet collaboratif PIPAA, Communiqué de presse, presse.bpi.france.fr, 20 novembre 2017.

Impact de la standardisation des données appliqué au diagnostic des piles à combustible PEMFC

Damien Chanal, Nadia Yousfi Steiner, Didier Chamagne, Marie-Cécile Pera

FEMTO-ST Institute, FCLAB, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS, Belfort, France

Les piles à combustible sont de bons candidats pour la génération d'électricité propre. Elles convertissent directement l'hydrogène et l'oxygène en électricité, en chaleur et en eau avec un rendement électrique d'environ 50%. Elles sont très intéressantes dans plusieurs domaines tels que les transports et la stationnaire. L'une des technologies de piles à combustible les plus avancées est la membrane échangeuse de protons à basse température (LT-PEMFC), qui est capable de démarrer à des températures voisines de 0 degré et de fonctionner entre 60 et 80 degrés. Actuellement, l'un des obstacles au développement des piles à combustible est leur durée de vie limitée. Selon le Département de l'énergie, l'un des objectifs est d'augmenter la durée de vie des piles à combustible pour les applications stationnaires et de transport jusqu'à 40.000 et 5.000 heures respectivement dans des conditions de fonctionnement réalistes [1].

Afin d'atteindre ces objectifs de durée de vie, des outils de surveillance et de diagnostic adaptés aux systèmes de piles à combustible doivent être utilisés pour détecter et permettre la correction de toutes conditions anormales qui pourraient survenir. En effet, un bon diagnostic permet une détection rapide des défauts, ce qui permet d'assurer une récupération correcte des performances et donc une amélioration de la durée de vie. Il existe différentes méthodes de diagnostic qui peuvent être classées en approches basées ou non sur des modèles. Dans les deux cas, l'intelligence artificielle qui établit une relation entre une ou plusieurs entrées et une sortie sans connaissance de la physique a été utilisée avec succès [2]–[6]. Une base de données est nécessaire afin d'entraîner l'algorithme avec des données connues (partie hors ligne) avant de pouvoir analyser des données inconnues (partie en ligne) et de renvoyer l'état de santé. Afin d'optimiser les algorithmes de diagnostic utilisant des bases de données, il est généralement recommandé de standardiser les données. Cela permet de réduire le temps de calcul mais également de réduire les distorsions de l'espace de travail. La standardisation est une étape cruciale, elle permet d'assurer la robustesse de l'approche diagnostique par rapport aux données brutes acquises et diminue le besoin d'expertise de l'utilisateur.

Dans ce travail, une comparaison des principales méthodes de standardisation appliquées au diagnostic des PEMFC est proposée. L'approche diagnostic retenue ainsi que les bases de données utilisées proviennent du projet Health Code [7]. Les méthodes analysées sont : (i) Normalisateur, (ii) Mise à l'échelle Min-Max, (iii) Mise à l'échelle standard, (iv) Mise à l'échelle Robuste ; (v) Transformateur Yeo-Johnson, (vi) Transformateur quantile uniforme et (vii) Transformateur quantile normal. L'étude montrera que le transformateur quantile uniforme fournit des très bonnes performances pour les deux bases de données, rendant la méthode intéressante pour une potentielle utilisation générique.

[1] "Fuel Cells," *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> (accessed Jan. 17, 2021).

[2] Z. Zheng, M.-C. Péra, D. Hissel, M. Becherif, K.-S. Agbli, and Y. Li, "A double-fuzzy diagnostic methodology dedicated to online fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell stacks," *J. Power Sources*, vol. 271, pp. 570–581, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.157.

[3] L. A. M. Riascos, M. G. Simoes, and P. E. Miyagi, "A Bayesian network fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 165, no. 1, pp. 267–278, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.003.

[4] Z. Li *et al.*, "Online implementation of SVM based fault diagnosis strategy for PEMFC systems," *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 284–293, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.060.

[5] A. Escobet, À. Nebot, and F. Mugica, "PEM fuel cell fault diagnosis via a hybrid methodology based on fuzzy and pattern recognition techniques," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 36, pp. 40–53, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.engappai.2014.07.008.

[6] D. Chanal, N. Yousfi-Steiner, R. Petrone, D. Chamagne, and M.-C. Péra, "Online Diagnosis of PEM Fuel Cell by Fuzzy C-means clustering," *Encycl. Energy Storage*, p. 41. (to be published)

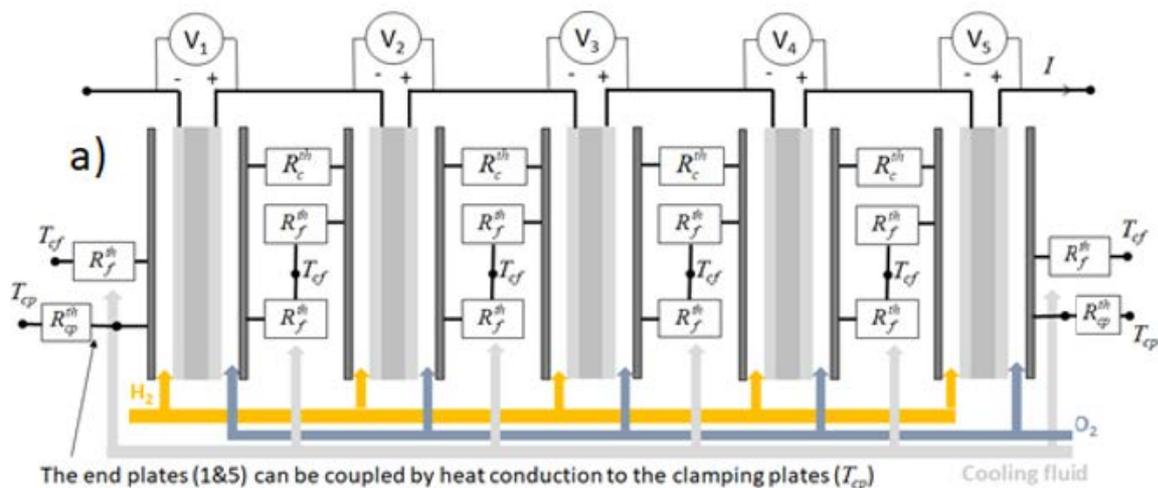
[7] "Real operation pem fuel cells HEALTH-state monitoring and diagnosis based on dc-dc COnverter embeddeD Eis;H2020, European project, Horizon 2020; Health-Code." <http://health-code.eu/> (accessed May 04, 2021).

Modélisation d'un stack PEMFC cellule par cellule : illustration d'un mécanisme de propagation des dégradations

M. Bahrami, R. Bligny, J. Dillet, S. Didierjean, J.P. Martin, S. Pierfederici, G. Maranzana

Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

Ce travail est consacré à la modélisation d'un stack PEMFC. Dans un premier temps, pour justifier les hypothèses du modèle, des résultats expérimentaux originaux sont présentés et montrent que les débits de gaz alimentant une cellule dans son environnement dépendent fortement de la gestion thermique mise en oeuvre. Dans un second temps, le modèle générique d'une cellule dans son environnement de stack est présenté. Un modèle d'écoulement diphasique est mis en oeuvre pour calculer les débits de gaz en fonction des pertes de charge et en considérant la quantité d'eau liquide présente dans les deux compartiments. De cette manière, la répartition du débit total de gaz actifs entre les différentes cellules peut être décrite. Enfin, un empilement de cinq cellules est assemblé numériquement en décrivant le couplage thermique entre les cellules. Deux exemples d'application sont réalisés. Un premier considère un défaut de refroidissement et un second simule le cas où une cellule est plus dégradée que les autres. Il est montré comment ces dysfonctionnements peuvent provoquer un phénomène de fuel starvation au niveau des cellules voisines. En guise de conclusion un mécanisme de propagation des dégradations de cellule en cellule est proposé.



Modèle thermique d'un stack de 5 cellules

[1] S.Park, S. Choe, dynamic modeling and analysis of a 20-cell PEM fuel cell stack considering temperature and two-phase effects, *Journal of Power Sources*, 179 (2008), 660-672

[2] Y. Shan, S. Choe, Modeling and simulation of a PEM fuel cell stack considering temperature effects, *Journal of Power Sources* 158 (2006), 274-286

[3] R. Mustata, L. Valino, F. Barreras, M. I. Gil, and A. Lozano, "Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack," *J. Power Sources*, vol. 192, no. 1, pp. 185-189, 2009

[4] M. Bahrami, J.-P. Martin, G. Maranzana, S. Pierfederici, M. Weber, F. Meibody-Tabar, M. Zandi., "Design and modeling of an equalizer for fuel cell energy management systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, p. 1, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2899150.