

## Model Ageing Fuel cell System

### Encadrement

- Directeur de thèse : Samir Jemei (MCF HDR UBFC, FEMTO-ST/ENERGIE, 50%).
- Encadrante : Nadia Steiner (MCF UBFC, FEMTO-ST/ENERGIE, 50%).

### Spécialité

Sciences . Diplôme de Docteur de Génie Electrique.

### Mots clés

Système Pile à Combustible, Défaut, Modèle de Vieillessement, Pronostic, Décision, Système multi-stack.

### Contexte général de la thèse

Le déploiement à grande échelle de la pile à combustible (PAC) ne se fera que si elle est suffisamment compétitive face aux autres solutions conventionnelles. On résume souvent les principaux verrous à lever dans le triptyque coût-performance-durabilité : en effet, il est essentiel que ces nouvelles technologies puissent, à coût non-prohibitif, offrir une continuité de service et garantir des performances acceptables pour les utilisateurs. Cela passe forcément par le développement de systèmes robustes, tolérants aux défauts et résistants au vieillissement.

C'est un point central à étudier en amont, couplé à la mise au point d'indicateurs fiables de leurs défaillances. Ainsi, il est important d'appréhender son fonctionnement et son contrôle afin de ralentir les dégradations avant l'apparition d'une défaillance. Pour cela, la discipline du Prognosis and Health Management (PHM) permet de suivre et d'estimer en continu l'état de santé d'un système, de prédire sa durée de vie résiduelle, et de prendre les décisions visant à la préserver afin de mener à bien sa mission.

L'équipe SHARPAC du département Energie mène de nombreux travaux sur le pronostic de PAC depuis de nombreuses années qui ont notamment permis de conforter son assise internationale sur ces sujets et d'obtenir des résultats probants [1, 2, 3, 4, 5].

Néanmoins, une pile à combustible doit être entourée d'un certain nombre d'auxiliaires pour fonctionner correctement. Nous parlons alors de Système Pile à Combustible (SPAC) qui est multi-physique et multi-échelle et de fortes interactions existent entre les composants du système. Il convient donc d'appréhender le vieillissement de chacun des composants ainsi que les différentes interactions afin d'obtenir un modèle de vieillissement global. Il sera alors possible d'établir le pronostic du système pile à combustible.

Aujourd'hui et à notre connaissance, ce type de modèle n'existe pas dans la littérature tout comme le pronostic d'un système pile à combustible. Ce travail de thèse permettra d'explorer ces différentes voies grâce à l'appui des compétences développées autour de la pile à combustible et de son pronostic depuis de nombreuses années au sein de notre équipe.

### Objectifs scientifiques

Les objectifs principaux de cette thèse concernent, en premier lieu, l'établissement d'un modèle de vieillissement du système PAC puis de fournir la durée de vie restante du système grâce au pronostic et enfin de déterminer des lois de stratégie d'engagement visant à augmenter la durée de vie du système PAC. Plusieurs volets seront traités :

- **Essais expérimentaux longues durées** sur les composants du système. Des campagnes d'essais de longues durées seront menées afin de générer des bases de données conséquentes nécessaires à l'établissement et à la validation des modèles. Les essais concerneront principalement les éléments ayant des parties tournantes tels que le groupe moto-compresseur et la pompe du circuit de refroidissement. Le système d'humidification des gaz devra également être considéré.
- **Modélisation et lois de vieillissement** des composants. Les données expérimentales couplées à la connaissance physique des composants devront permettre d'établir un modèle hybride de vieillissement de chaque élément du système considéré.
- **Modèle de vieillissement du système PAC et interactions du vieillissement des composants.** Les systèmes PAC, de par leur technologie, ont des comportements difficilement appréhendables. La nature non linéaire des phénomènes, le caractère réversible ou non des dégradations, et les interactions entre composants rendent effectivement difficile une étape de modélisation de vieillissement [2]. Il est donc nécessaire de **développer un modèle complet de vieillissement** d'un système PAC en fonction des conditions opératoires.
- **Lois de propagation/évolution des défauts dans le temps (hypothèse : pas de bouclage avec le décision).** La dynamique des dégradations est plutôt lente alors qu'un défaut est plutôt détectable rapidement. Il peut s'avérer difficile de dissocier ce qui est de l'ordre d'une réponse instantanée d'un défaut de ce qui est dû à la dégradation. Il est donc important de développer des lois de propagation des défauts existants qui décrivent le comportement du système PAC en tenant compte de l'influence de la dégradation sur l'état du système. Ces lois devront être intégrées dans le modèle global de vieillissement.

- **Pronostic du système PAC.** Le pronostic du système PAC sera développé en s'appuyant sur des méthodes hybrides (model-based and data-based) développées dans notre équipe [5, 6, 7]. La nouveauté consisterait, ici, de définir un pronostic prenant en compte des lois de propagation des défauts dans le temps. L'autre volet innovant est de faire du pronostic d'un système multi-PAC. En effet, afin d'être au plus proche des développements industriels actuels, nous nous plaçons dans le cadre d'un système PAC modulaire composé de plusieurs PAC.
- **Engagement des PAC.** L'utilisation d'un système multi-PAC permettra, entre autre, d'augmenter la durée de vie du système global en prenant en compte les états de santé de chacune des PAC composants le système. En effet, le but est de définir l'engagement des différentes PAC en fonction de leur vieillissement et du profil mission à respecter.

## Développements attendus

En marge du travail bibliographique (Tâche 1 : M1 → M6), plusieurs volets de développements se dégagent à court-moyen terme :

- Tâche 2 (M3 → M18). Essais expérimentaux longues durées composants systèmes PAC.  
Mise en place de protocoles de tests.  
Génération de données de tests.
- Tâche 3 (M9 → M18). Modélisation et lois de vieillissement.  
Développement modèles physiques des composants.  
Génération de map de dégradation en intégrant les modèles physiques et les données de test.
- Tâche 4 (M12 → M24). Modèle de vieillissement du système PAC et interactions du vieillissement des composants.  
Etude de l'interaction du vieillissement des composants.  
Etablissement du modèle de vieillissement du système PAC.
- Tâche 5 (M20 → M32). Lois de propagation d'une dégradation dans le temps.  
Compréhension des mécanismes de dégradation des composants unitaires.  
Définition de l'impact des dégradations dans le temps sur le système.
- Tâche 6 (M24 → M36). Pronostic du système PAC.  
Estimations fiables du SOH - State of Health et du RUL - Remaining Useful Life.  
Pronostic du système PAC en intégrant les lois de propagation de dégradation.
- Tâche 7 (M32 → M36). Engagement des PAC.  
Définir les lois d'engagement en fonction de l'état de santé des PACs individuelles.

## Matériels et projets supports existants

- St@rc (projet LABEX en cours) → essais stack longues durées.
- GIANTLEAP (projet FCH JU en cours) → Modèles de vieillissement des composants du système.
- Banc essai ICARE-CSP (projet ANR terminé) → Essais longues durées compresseur d'air.
- Banc essai 1 kW PEMFC (matériel existant) → Essais longues durées humidification, refroidissement,  $\delta$

## Contacts

- Samir Jemei : [samir.jemei@femto-st.fr](mailto:samir.jemei@femto-st.fr), 03.84.58.36.41
- Nadia Steiner : [nadia.steiner@femto-st.fr](mailto:nadia.steiner@femto-st.fr), 03.84.58.36.67

## Eléments bibliographiques

- [1] Morando S., Jemei S., Hissel D., Gouriveau R., Zerhouni N., Proton exchange membrane fuel cell ageing forecasting algorithm based on Echo State Network, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 2, 12 January 2017, Pages 1472-1480
- [2] Jouin M., R. Gouriveau, D. Hissel, M.-C. Péra, N. Zerhouni, Prognostics and Health Management of PEMFC - State of the art and remaining challenges, Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 38-35, pp. 15307-15317, 2013 ; DOI : 10.1016/j.ijhydene.2013.09.051.
- [3] Jouin M., R. Gouriveau, D. Hissel, M.-C. Péra, N. Zerhouni, Joint particle filters prognostics for PEMFC power prediction at constant current solicitation, IEEE Transactions on Reliability, 2015; DOI: 10.1109/TR.2015.2454499.
- [4] Silva R.-E., R. Gouriveau, S. Jemei, D. Hissel, L. Boulon, K. Agbossou, N. Yousfi Steiner, PEMFC degradation prediction based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inf. Systems, Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 39-21, pp. 11128-11144, 2014; DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.005.
- [5] Morando S., S. Jemei, D. Hissel, R. Gouriveau, N. Zerhouni, ANOVA method applied to PEMFC ageing forecasting using an Echo State Network, *Mathematics and Computers in Simulation*, à paraître, 2015 ; DOI : 10.1016/j.matcom.2015.06.009.
- [6] Lechartier E., E. Laffly, M.-C. Péra, R. Gouriveau, D. Hissel, N. Zerhouni, Proton Exchange Membrane Fuel Cell behavioral model suitable for prognostics, Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 40-26, pp. 8384-8397, 2015 ; DOI : 10.1016/j.ijhydene.2015.04.099.

- [7] Bressel M., Hilairet M., Hissel D., Ould Bouamama B., Extended Kalman Filter for prognostic of Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Applied Energy, Volume 164, 15 February 2016, Pages 220-227
  - [8] Petrone R., Yousfi Steiner N., Jemei S., Harel F., Hissel D., Péra Marie-Cécile, Model-based strategy oriented to PEMFC system prognostic for Bus transportation applications based on EMR formalism, International Conference on Fundamentals and Developpement of Fuel Cells, 31st of January 2017-2nd of February 2017, Stuttgart, Germany.
  - [9] Operating Conditions control for extending PEMFC lifetime, Mezzi R., Yousfi Steiner N., Péra MC., Hissel D., Larger L., International Conference on Fundamentals and Developement of Fuel Cells, 31st of January 2017-2nd of February 2017, Stuttgart, Germany.
-