

Sujet de thèse CIFRE

Diagnostic et modèles prédictifs par IA pour la durabilité des stacks d'électrolyseurs AEM

Contexte et enjeux

La durabilité et la fiabilité restent un verrou majeur pour la diffusion à grande échelle des électrolyseurs à membrane échangeuse d'anions (AEM). Les mécanismes de dégradation impliquent l'ensemble des composants (membrane, électrodes, collecteurs, plaques bipolaires) et sont fortement influencés par les conditions de fonctionnement : profils de charge dynamiques, gradients de température, répartition des phases liquide-gaz, présence d'impuretés dans l'eau d'alimentation.

En parallèle, les besoins industriels en prognostic et gestion de l'état de santé (PHM, « Prognostics and Health Management ») augmentent avec l'essor de parcs de stacks de plus en plus importants. Les approches PHM sont déjà bien développées pour les piles à combustible et les électrolyseurs PEM (indicateurs de santé, diagnostics EIS/DRT, modèles prédictifs, intelligence artificielle / deep learning), mais restent encore peu transposées aux stacks AEM, alors même que les enjeux de coûts et de disponibilité sont comparables.

L'entreprise GEN-HY dispose de bancs d'essai instrumentés et d'un historique de données de fonctionnement sur des stacks AEM industriels. Cela offre un terrain idéal pour développer des approches de diagnostic avancé et de modélisation prédictive basées sur l'intelligence artificielle, en conditions réalistes (capteurs limités, données bruitées, profils de charge variables).

Mots-clés

Électrolyseurs AEM, stacks, durabilité, vieillissement, diagnostics avancés, indicateurs de santé, PHM, EIS/DRT, modèles prédictifs, intelligence artificielle, deep learning.

Objectifs scientifiques

La thèse vise à développer une chaîne complète PHM pour des stacks AEM, depuis la définition d'indicateurs de santé jusqu'à la prédiction de durée de vie par modèles hybrides physiques-IA :

1. **Définir des indicateurs de santé (HIs)** robustes et interprétables à partir de grandeurs mesurées au niveau stack (tension cellule par cellule, pressions, températures, EIS, conductivité), sensibles aux principaux mécanismes de dégradation : perte d'activité électrocatalytique, dégradation de la membrane, corrosion des plaques et collecteurs, contamination par impuretés.
2. **Relier conditions locales et vieillissement** : établir des liens entre l'hétérogénéité des écoulements et des conditions locales (température, pression, fraction de gaz, impuretés, tension de cellule, densité de courant), telle qu'inférée à partir des diagnostics avancés (EIS/DRT) et, le cas échéant, de modèles multiphysiques existants, et les trajectoires de vieillissement observées au niveau stack.
3. **Construire des modèles prédictifs de dégradation** en combinant des modèles physiques simplifiés (lois de vieillissement paramétrées par l'historique de courant, de température, de pression, etc.) et des modèles d'intelligence artificielle pour séries temporelles (apprentissage automatique et deep learning, par exemple réseaux récurrents ou architectures de type Transformers), afin de prédire l'évolution des indicateurs de santé et des performances.

4. **Proposer des stratégies de diagnostic en ligne et de pronostic** (estimation d'état de santé, durée de vie restante) intégrables dans les systèmes de supervision de GEN-HY, en tenant compte des contraintes de capteurs et de calcul.

Environnement de recherche

La thèse est proposée dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'entreprise GEN-HY, spécialisée dans les stacks d'électrolyseurs AEM et les systèmes d'électrolyse, et le laboratoire FEMTO-ST. Le doctorant disposera de bancs d'essai instrumentés, d'un historique de données sur des stacks AEM industriels et de moyens de diagnostic avancés (EIS/DRT), qui serviront de base aux campagnes d'essais et aux développements PHM. Il sera co-encadré par un responsable industriel et des enseignants-chercheurs de FEMTO-ST, en interaction étroite avec les équipes d'essais, d'ingénierie système et d'analyse de données.

Profil recherché

- Diplôme d'ingénieur ou Master 2 en automatique ou génie électrique (un profil data science / mathématiques appliquées avec forte motivation pour l'énergie pourra également être considéré).
- Bonne maîtrise des outils d'analyse de données et de modélisation (Python, Matlab ou équivalent) ; une expérience en intelligence artificielle / deep learning est un plus.
- Intérêt marqué pour les systèmes énergétiques, l'hydrogène et les procédés électrochimiques.
- Goût pour le travail à la frontière entre expérimentation, traitement du signal, analyse de données et modélisation/algorithme.
- Capacité à travailler dans un environnement pluridisciplinaire académique-industriel et à communiquer en français et en anglais (écrit et oral).

Documents à fournir

- CV
- Lettre de motivation
- Relevés de notes avec classements en M1 et M2
- Lettre de recommandation

Contacts :

- Prof. Salah LAGHROUCHE, UTBM, FEMTO-ST, salah.laghrouche@utbm.fr
- Dr. Mondher RTIMI, UTBM/GEN-HY, mondher.rtimi@utbm.fr