

**AVIS DE SOUTENANCE**

**Monsieur Daming ZHOU**

Candidat au DOCTORAT Génie électrique  
de l'Université Bourgogne Franche-Comté

Soutiendra sa thèse

**Le 28 septembre 2017 à 14h00**  
**à Belfort -Amphithéâtre I102**

SUR LE SUJET SUIVANT :

« **Modélisation et analyse multidimensionnel d'une pile à combustible à Membrane échangeuse de proton** »

Le jury est composé de :

**Monsieur Damien PAIRE, maître de conférences**  
**Université de technologie de Belfort-Montbéliard**

**Monsieur Fei GAO, professeur des universités**  
**Université de technologie de Belfort-Montbéliard**

**Monsieur Mahesh KRISHNAMURTHY, maître de conférences**  
**Illinois Institute of Technology (Etats-Unis)**

**Monsieur Abdellatif MIRAOU, professeur des universités**  
**Université de technologie de Belfort-Montbéliard**

**Monsieur Demba DIALLO, professeur des universités**  
**Université Paris-Sud**

**Monsieur Alexandre RAVEY, maître de conférences**  
**Université de technologie de Belfort-Montbéliard**

**Monsieur Babak NAHID-MOBARAKEH, professeur des universités**  
**Université de Lorraine, Rapporteur**

**Monsieur Hubert RAZIK, professeur des universités**  
**Ecole centrale de Lyon, Rapporteur**

Un des freins à la commercialisation de masse de la pile à combustible et notamment de la technologie à membrane échangeuse de proton vient de sa faible durée de vie due à la difficulté de contrôler le système sous certaines conditions. Pour pallier à ce problème, l'élaboration d'un modèle mathématique précis de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons permettant d'observer les variables internes et l'état de la pile à combustible au cours de son fonctionnement permettrait le développement de la stratégie de contrôle du système. Cette thèse propose d'élaborer un modèle dynamique multi-physique complet pour la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Le modèle proposé couvre les domaines multi-physiques pour les caractéristiques électriques, fluidiques et thermiques. Dans ces deux derniers domaines, les phénomènes transitoires sont notamment pris en compte dans le modèle proposé, tels que les comportements dynamiques de la teneur en eau de la membrane de la pile et la température. Par conséquent, ce modèle peut être utilisé pour analyser les effets de couplage des variables dynamiques entre différents domaines physiques.

Grace à ce modèle ainsi défini, un second modèle multi-physique bidimensionnel plus détaillé est également présenté. Le modèle proposé couvre les domaines électriques et fluidiques avec une approche de modélisation 2-D innovante. Les distributions spatiales de quantité physique dans le domaine électrique peuvent ainsi être obtenues. Par conséquent, ce modèle 2-D PEMFC peut être utilisé pour étudier les influences des paramètres de modélisation sur la prédiction de performance multidimensionnelle locale. Une étude expérimentale est effectuée pour valider le modèle 2-D proposé avec une pile commerciale PEMFC Ballard NEXA de 1,2 kW.

Dans un second chapitre, une analyse des phénomènes dynamiques est réalisée en fonction du modèle dynamique multidisciplinaire développé en s'appuyant sur la méthode RGA (gain relatif) pour diverses variables d'entrée de contrôle, afin d'analyser quantitativement les effets de couplage dans différents domaines physiques. L'étude s'intéresse entre autre aux interactions de la teneur en eau et de la température de la membrane. L'analyse de couplage présentée dans cette thèse peut aider les ingénieurs à concevoir et à optimiser les stratégies de contrôle des piles à combustible, en particulier pour la gestion de l'eau et de la chaleur dans les systèmes de piles à combustible.

Une deuxième analyse portant sur la sensibilité aux paramètres de l'étude est effectuée sur la base du modèle multidisciplinaire bidimensionnel développé. Ces résultats d'analyse de sensibilité globale fournissent des informations utiles pour la compréhension de la dégradation, le réglage des paramètres et la simplification du modèle des piles à combustible.

Dans un troisième temps, le modèle proposé se décline dans un algorithme de résolution mathématique en temps réel basé sur un algorithme de matrice tri diagonal efficace (TDMA). Les résultats expérimentaux démontrent les possibilités pratiques du modèle 2-D proposé pour le contrôle en temps réel avancé des systèmes de pile à combustible avec un temps de calcul de la boucle de contrôle de l'ordre de la milliseconde. Le temps d'exécution du modèle peut être quadruplé par rapport aux algorithmes séquentiels présent dans la littérature; garantissant ainsi des décisions et des actions de contrôle rapide.

La mise en pratique du modèle proposé nous permet ensuite d'approfondir l'étude de cette thèse avec deux approches pronostiques différentes pour la prédiction de la dégradation des performances des cellules. Dans une première partie, une nouvelle approche pour la prédiction de la tension de sortie de la pile à combustible basée sur un modèle de vieillissement multi-physique avec filtre de particules et approche d'extrapolation de données est proposée. Trois validations expérimentales avec différents profils de test de vieillissement ont été réalisées. Les résultats de la prédiction démontrent que cette méthode basée sur la physique pourrait fournir des résultats de prédiction acceptables sous la condition d'échantillons de formation initiale limités.

Cependant, la méthode physique proposée est une méthode de pronostic à une étape, qui ne peut pas être directement utilisée dans les applications de pronostics en ligne. Afin de palier à ce problème, l'étude du développement d'une stratégie de prédiction basée sur l'itération est investiguée. Celle-ci permet de mettre à jour dynamiquement le résultat de la prédiction avec les données nouvellement mesurées de manière itérative afin de déterminer la prochaine étape de prédiction. À cette fin, une méthode de prédiction basée sur une fenêtre temporelle mobile est développée, afin de d'alimenter dynamiquement les entrées modèles lors du processus de prévision avec de nouvelles entrées de données. Trois validations expérimentales avec trois piles de piles différentes et différents profils de test de vieillissement ont été effectuées pour vérifier la précision et l'efficacité de la méthode hybride proposée.