



Avis de Soutenance

Monsieur Rui MA

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **jeudi 20 septembre 2018** à 14h00

Lieu : Rue Thierry Mieg 90000 Belfort
salle Amphithéâtre I102

Titre des travaux : Modélisation de pile à combustible à oxyde solide et prédiction de durée de vie pour des simulations en temps réel

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 63

Unité de recherche : FEMTO-ST Franche Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies

Directeur de thèse : Pascal BRIOIS

Codirecteur de thèse : Fei GAO HDR NON HDR

Soutenance : Publique A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
M. Pascal BRIOIS	Maître de Conférences	Université Bourgogne Franche-Comté	Directeur de these
M. Hubert RAZIK	Professeur des Universités	Université Claude Bernard Lyon 1	Rapporteur
M. Serge PIERFEDERICI	Professeur des Universités	Universités de Lorraine	Rapporteur
M. Fei GAO	Professeur des Universités	Université Bourgogne Franche-Comté	CoDirecteur de these
Mme Elena BREAZ	Maître de Conférences	Université Bourgogne Franche-Comté	Examineur
Mme Maya KALLAS	Maître de Conférences	Universités de Lorraine	Examineur
M. Radu TIRNOVAN	Professeur des Universités	Technical University of Cluj-Napoca	Examineur
M. David BOUQUAIN	Maître de Conférences	Université Bourgogne Franche-Comté	Examineur

Résumé de la thèse (en français) :

Cette thèse présente d'abord une modélisation multi-physique d'une cellule de pile à combustible à oxydes solides de géométrie tubulaire réversible 2D. Le modèle développé peut représenter à la fois une cellule d'électrolyse à oxydes solides (SOEC) et une cellule de pile à combustible à oxydes solides (SOFC). En tenant compte des phénomènes physiques, électrochimiques, fluidiques et thermiques, le modèle présenté peut décrire avec précision les effets multi-physiques à l'intérieur d'une cellule pour le fonctionnement en mode électrolyseur ou en mode pile sur toute la plage de fonctionnement en courant et en température. En outre, un solveur itératif a été mis en place afin de résoudre la distribution 2D des quantités physiques le long de la cellule tubulaire. Le modèle de cellule réversible est ensuite validé expérimentalement dans les deux configurations sous différentes conditions. Par ailleurs, un modèle de pile à combustible alimentée par du syngas a été développé. Ce dernier est orienté contrôle et prend en compte à la fois des phénomènes de co-oxydation de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Le modèle de gaz de synthèse développé est validé expérimentalement dans différentes conditions de fonctionnement. Le modèle développé peut être utilisé dans des applications embarquées comme la simulation en temps réel, ce qui peut aider à concevoir et tester la stratégie de contrôle et de diagnostic en ligne pour le système de génération d'énergie des piles à combustible dans les applications industrielles. La simulation en temps réel est importante pour le diagnostic en ligne des piles à combustible et les tests HIL (hardware-in-the-loop) avant les applications industrielles. Cependant, il est difficile de mettre en œuvre des modèles de piles à combustible multi-dimensionnels et multi-physiques en temps réel en raison des problèmes de rigidité numérique du modèle. Ainsi, la rigidité numérique du modèle en temps réel de la pile de type SOFC est d'abord analysée. Certains des solveurs d'équations différentielles ordinaires (ODE) couramment utilisés sont ensuite testés par la mise en place d'une simulation en temps réel comme objectif principal. Enfin, un nouveau solveur ODE rigide est employé pour améliorer la stabilité et réduire le temps d'exécution du modèle de pile à combustible en temps réel multidimensionnel. Pour vérifier le modèle proposé et le solveur ODE, des expériences de simulation en temps réel sont réalisées au sein d'une plate-forme temps réel embarquée commune. Les résultats expérimentaux montrent que la vitesse d'exécution satisfait à l'exigence de la simulation en temps réel. La stabilité du solveur sous forte rigidité et la grande précision du modèle sont également validées. Les piles à combustible sont vulnérables aux impuretés de l'hydrogène et aux conditions de fonctionnement qui entraînent une dégradation des performances de la pile au cours du temps. Ainsi, au cours de ces dernières années, la prédiction de la dégradation des performances attire l'attention qui conduit à des remarques critiques sur la fiabilité du système. Ainsi, une méthode innovante de prédiction de dégradation PEMFC utilisant un réseau neutre récurrent (RNN) à longue distance (G-LSTM) est étudiée. Le système LSTM peut efficacement éviter les problèmes d'explosion et de disparition de gradient en comparaison avec l'architecture RNN conventionnelle, ce qui le rend pertinent pour le problème de prédiction pour une longue période. En mettant en parallèle et en combinant les cellules LSTM, l'architecture G-LSTM peut optimiser de façon avantageuse la précision de prédiction de la dégradation des performances de PEMFC. Le modèle de prédiction proposé est validé expérimentalement par trois types différents de PEMFC. Les résultats indiquent que le réseau G-LSTM utilisé peut prédire la dégradation de la pile à combustible d'une manière précise.

Abstract (in English)

This thesis first presents a multi-physical modeling of a 2D reversible tubular solid oxide cell. The developed model can represent both a solid oxide electrolysis cell (SOEC) and solid oxide fuel cell (SOFC) operations. By taking into account of the electrochemical, fluidic and thermal physical phenomena, the presented model can accurately describe the multi-physical effects inside a cell for both fuel cell and electrolysis cell operation under entire working range of cell current and temperature. In addition, an iterative solver is proposed which is used to solve the 2D distribution of physical quantities along the tubular cell. The reversible solid oxide cell model is then validated experimentally in both SOEC and SOFC configurations under different species partial pressures, operating temperatures and current densities conditions. Meanwhile, a control-oriented syngas fuel cell model includes both hydrogen and carbon monoxide co-oxidation phenomena are also proposed. The developed syngas model is validated experimentally under different operating conditions regarding different reaction temperatures, species partial pressures and entire working range of current densities. The

developed model can be used in embedded applications like real-time simulation, which can help to design and test the control and online diagnostic strategy for fuel cell power generation system in the industrial applications. Real-time simulation is important for the fuel cell online diagnostics and hardware-in-the-loop (HIL) tests before industrial applications. However, it is hard to implement real-time multi-dimensional, multi-physical fuel cell models due to the model numerical stiffness issues. Thus, the numerical stiffness of the tubular solid oxide fuel cell (SOFC) real-time model is analyzed to identify the perturbation ranges related to the fuel cell electrochemical, fluidic and thermal domains. Some of the commonly used ordinary differential equation (ODE) solvers are then tested for the real-time simulation purpose. At last, the novel stiff ODE solver is proposed to improve the stability and reduce the multi-dimensional real-time fuel cell model execution time. To verify the proposed model and the ODE solver, real-time simulation experiments are carried out in a common embedded real-time platform. The experimental results show that the execution speed satisfies the requirement of real-time simulation. The solver stability under strong stiffness and the high model accuracy are also validated. Fuel cell are vulnerable to the impurities of hydrogen and operating conditions, which could cause the degradation of output performance over time during operation. Thus, the prediction of the performance degradation draws attention lately and is critical for the reliability of the fuel cell system. Thus, an innovative degradation prediction method using Grid Long Short-Term Memory (G-LSTM) recurrent neural network (RNN) is proposed. LSTM can effectively avoid the gradient exploding and vanishing problem compared with conventional RNN architecture, which makes it suitable for the prediction of long time period. By paralleling and combining the LSTM cells, G-LSTM architecture can further optimize the prediction accuracy of the PEMFC performance degradation. The proposed prediction model is experimentally validated by three different types of PEMFC: 1.2 kW NEXA Ballard fuel cells, 1 kW Proton Motor PM200 fuel cells and 25 kW Proton Motor PM200 fuel cells. The results indicate that the proposed G-LSTM network can predict the fuel cell degradation in a precise way. The proposed G-LSTM deep learning approach can be efficiently applied to predict and optimize the lifetime of fuel cell in transportation applications.