



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

**École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes**  
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

## **AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT**

**Monsieur Abdelaziz EL AOUMARI**

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat Sciences de l'ingénieur

**Spécialité : Génie Électrique**

**Le Mercredi 09 Avril 2025 à 15h30 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat**

**Intitulé de la thèse**

**Optimisation, Commande et Observation Non Linéaires d'un  
Système Pile à Combustible : Application au Véhicule Électrique  
à Hydrogène**

**Président :**

Pr. Hassane Mahmoudi, PES, EMI, Université Mohammed V de Rabat

**Directeur de thèse :**

Pr. Hamid Ouadi, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Rapporteurs :**

Pr. Adil Brouri, PES, ENSAM, Université Moulay Ismaïl, Meknès

Pr. Abdelmounime El Magri, PES, ENSET-Mohammedia, Université Hassan II, Casablanca

Pr. Khalid El Majdoub, PES, ENSEM, Université Hassan II, Casablanca

**Examineurs :**

Pr. Fouad Giri, Professeur des Universités, ESIX Normandie, Université de Caen  
Normandie, France

Pr. Adil Atifi, MCH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Résumé:** Confrontés aux défis environnementaux et à la nécessité de solutions de transport durable, les véhicules électriques à hydrogène (FCEVs) apparaissent comme une alternative prometteuse. Cette thèse se concentre sur l'optimisation du ratio d'excès d'oxygène (OER), un paramètre essentiel des systèmes à pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), pour améliorer l'efficacité énergétique et prolonger leur durée de vie. Bien qu'il s'agisse d'une variable non accessible directement, un observateur à grand gain filtré (FHGO) et un observateur adaptatif basé sur les réseaux de neurones ont été développés pour fournir des estimations précises en temps réel de l'OER. Ces estimations ont permis la mise en œuvre d'une commande neuro-adaptative par modèle de référence (NMRAC), intégrant une stratégie de génération de référence basée sur la technique d'extremum seeking (ES) afin de suivre en temps réel le point de puissance maximale (MPPT). En parallèle, une stratégie de gestion énergétique a été proposée, combinant la séparation fréquentielle et des algorithmes d'optimisation tels que la programmation dynamique (DP) et l'apprentissage par renforcement (RL), y compris ses variantes profondes (DQN).

Les simulations réalisées sous MATLAB®/Simulink® sur des cycles de conduite standards ont validé les approches proposées en termes d'efficacité énergétique, de consommation d'hydrogène et de préservation de l'état de santé des sources embarquées. Ce travail apporte des solutions innovantes pour améliorer la durabilité et les performances des FCEVs, contribuant ainsi à une mobilité plus respectueuse de l'environnement.

**Mots-clés :** Apprentissage par renforcement, contrôle neuro-adaptatif, Extremum seeking Control, observateur à réseau de neurones, observateur à grand gain filtré, pile à combustible, programmation dynamique, ratio d'excès d'oxygène, stratégie de gestion de l'énergie, Véhicules électriques à hydrogène.

**Abstract:** Addressing pressing environmental challenges and the need for sustainable transportation, fuel cell electric vehicles (FCEVs) have emerged as a promising alternative. This thesis focuses on optimizing the oxygen excess ratio (OER), a key parameter in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems, to improve energy efficiency and extend the system lifespan. Because the OER can't be measured directly, a filtered high-gain observer (FHGO) and an adaptive neural network-based observer were created to give correct real-time estimates. With these estimates, a neuro-adaptive model reference adaptive control (NMRAC) scheme could be put into action. This scheme uses a reference generation strategy based on the extremum-seeking (ES) method to keep an eye on the maximum power point (MPPT) in real-time.

In parallel, an energy management strategy was proposed that combines frequency separation with optimization algorithms, including dynamic programming (DP) and reinforcement learning (RL), along with its deep variant (DQN).



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

Simulations conducted using MATLAB®/Simulink® on standard driving cycles validated the proposed approaches regarding energy efficiency, hydrogen consumption, and preserving the state of health (SOH) of onboard energy sources. This work provides innovative solutions to enhance the durability and performance of FCEVs, contributing to more environmentally sustainable mobility.

**Keywords:** Dynamic programming, Energy management strategy, extremum-seeking control, Fuel cell, Filtered High-gain observer, Fuel Cell Electric Vehicles, Neural network observer, Neuro-adaptive control, oxygen excess ratio, reinforcement learning.