

## Sujet de thèse de Doctorat

### **Titre : Modélisation et simulation du comportement instationnaire des systèmes piles à combustible multi-stack pour les applications transports**

**Laboratoire :** LHEEA UMR 6598 (équipe D2SE) Centrale Nantes

**Début :** septembre 2025

**Durée :** 36 mois

**Financement :** projet ANR

**Partenaires :** Laboratoire LIFSE (ENSAM Paris) et Laboratoire LAMIH (UPHF Valenciennes)

**Mots clés :** pile à combustible, modélisation, simulation, optimisation, gestion thermique, gestion fluidique, multi-stacks, contrôle.

#### **Contexte :**

L'hydrogène est un candidat majeur à la transition énergétique, permettant le stockage des énergies renouvelables et la décarbonation de la mobilité. Bien que la production actuelle d'hydrogène repose principalement sur des combustibles fossiles, le développement des énergies renouvelables et nucléaires permettra une production à faible teneur en carbone. Il sera également possible d'utiliser la production d'hydrogène comme un moyen de stocker l'énergie issue de sources fluctuantes ou durant les périodes de faible demande en électricité.

Les piles à combustible sont des systèmes sensibles et coûteux par rapport aux systèmes de production d'énergie en propulsion classiques. Une des façons de réduire le prix des piles est la production massive de produits standardisés qui peuvent ensuite être combinés pour atteindre la puissance requise selon les différentes applications [1]. Une unique pile (par exemple de 70 kW) peut être utilisée pour des voitures de tourisme, tandis que 3 ou 4 piles devront être combinées pour des véhicules lourds. Cela semble être la stratégie industrielle visée par les fabricants de véhicules et de piles. Le coût des Assemblages Électrodes-Membranes pourrait être divisé par un facteur de 3 à 4, comme le souligne l'analyse de Thompson et al. [2]. Dans cette analyse, il est démontré que le coût des équipements auxiliaires (thermiques, fluidiques, électroniques et contrôle) représente environ 50 % du coût total, avec une contribution de 25 % et 11 % respectivement pour le système de boucle d'air et les circuits de refroidissement.

En plus du coût du système, ses performances dépendent également fortement de l'efficacité des systèmes de gestion thermique et de la boucle d'air. L'efficacité et la durabilité des piles à combustible peuvent être améliorées grâce à une gestion thermique et énergétique appropriée, en particulier en ce qui concerne la température, l'humidité et la pression [3][4]. Un contrôle précis de l'alimentation en air et de la pression est nécessaire pour garantir un fonctionnement efficace et éviter des problèmes tels que la pénurie d'air ou l'engorgement des piles [5].

Il est à noter que la puissance absorbée par le compresseur d'air peut atteindre 10 à 25 % de la puissance nette produite par le système de pile à combustible [6], mais avec un équilibre des équipements auxiliaires bien conçu, une augmentation de la pression de l'air peut accroître la puissance produite jusqu'à 22 % [7]. Les circuits de refroidissement doivent maintenir la pile dans une plage de températures donnée pour des performances optimales [7] et sous une limite de température spécifique (généralement 80 °C) pour assurer sa durabilité. Cela doit être garanti en toutes circonstances et dans toutes les conditions d'exploitation, sous peine de détérioration des membranes de la pile.

Cela est particulièrement complexe en raison des températures maximales du fluide de refroidissement, réduites par rapport à celles des moteurs à combustion interne, ce qui nécessite la conception d'échangeurs de chaleur et de ventilateurs compacts mais efficaces [8]. Ces défis deviennent encore plus cruciaux pour les véhicules lourds

fonctionnant à des vitesses réduites. Pour les véhicules routiers et tout-terrain, des variations significatives de la consommation d'énergie résultent de divers scénarios d'utilisation, entraînant des opérations transitoires.

Des batteries de grande capacité et des réservoirs d'eau de refroidissement de grande taille peuvent atténuer les effets transitoires sur la pile à combustible, mais cela augmente le coût et la taille du système. Ainsi, la capacité de réponse transitoire d'un système de pile à combustible représente un compromis entre la taille de l'équipement et son coût.

Cette thèse fait partie d'un projet regroupant plusieurs laboratoires qui travaillent sur l'étude expérimentale et numérique des piles à combustibles dans la propulsion et leurs systèmes auxiliaires.

### **Déroulement de la thèse :**

La définition de la puissance ciblée pour les systèmes multi-stack sera soigneusement étudiée au début du projet afin d'obtenir les résultats les plus représentatifs.

Des simulations du système de piles à combustible multi-stack ciblé seront effectuées. Elles fourniront les exigences et les paramètres d'entrée pour la conception de la boucle d'air et des composants de la boucle de refroidissement (compresseur, pompe, ventilateur, échangeur), y compris leurs interactions. Cette simulation servira de référence pour la comparaison avec les modèles améliorés et la conception optimisée des systèmes de boucle d'air et de refroidissement. Différents cycles d'utilisation pour les applications de transport seront définis et simulés pour calculer l'efficacité, l'autonomie et la consommation. Le potentiel de remplacement de certains modèles ou sous-modèles de composants par des réseaux neuronaux ou des réseaux neuronaux guidés par la physique sera également exploré. Cela devrait permettre de réduire considérablement le temps de calcul tout en conservant une bonne précision. Cette approche a été testée avec succès par Hubel *et al* [9]. Sur la base de l'expérience acquise avec les véhicules hybrides, un contrôle hiérarchique du système de pile à combustible sera développé [10]. Au niveau supérieur, le contrôle optimal sera utilisé pour calculer les points de consigne en boucle fermée de bas niveau (pression, humidité, refroidissement, etc.) afin de maximiser un critère tel que l'efficacité énergétique tout en prenant en compte la dégradation du système de pile à combustible. Un contrôle non linéaire de bas niveau sera ensuite utilisé pour assurer un suivi robuste de ces points de consigne [11][12].

Le travail réalisé pendant cette thèse fournira un modèle de systèmes de piles à combustible multi-stack avec ses systèmes auxiliaires, en fonctionnement stabilisé et transitoire pour des applications de transport et mobilité. Le travail commencera par une étude bibliographique pour construire un modèle à partir de l'existant et dimensionner les boucles fluidiques et thermiques. Ces informations seront utilisées dans les autres travaux du projet, qui travailleront de leur côté sur les systèmes d'alimentation d'air et les systèmes de gestion thermique. Ils proposeront des systèmes améliorés qu'il faudra intégrer dans le modèle complet et voir leur impact en fonctionnement stabilisé et en fonctionnement transitoire. L'efficacité énergétique sera un élément à observer, mais aussi l'impact du système et de son fonctionnement sur la durée de vie des composants. Des cycles réels seront testés en conditions normales et extrêmes.

La modélisation sera faite sur un logiciel open source de langage MODELICA.

Cette thèse fait partie d'une collaboration entre les laboratoires LHEEA (Centrale Nantes), LIFSE (ENSAM) et LAMIH (UPHF) dans le cadre d'un Appel à Projets générique ANR. La collaboration entre les trois laboratoires c'est le projet ALTOS : Air Loop and Thermal management Optimization for fuel cell Systems.

La thèse sera co-encadrée par des chercheurs du laboratoire LHEEA et du laboratoire LIFSE. Le lieu de travail sera au laboratoire LHEEA à Nantes dans l'équipe D2SE avec des déplacements prévus au LIFSE à Paris.

Le LHEEA de Centrale Nantes est une unité mixte de recherche associée au CNRS (UMR6598). Ses activités de recherche s'organisent autour de 4 thématiques scientifiques : Génie océanique, Écoulements atmosphériques marins et urbain, Thermodynamique des systèmes énergétiques et Hydrodynamique pour la santé. L'objectif de recherche de l'équipe

D2SE (Décarbonation et Dépollution des systèmes énergétiques) est la modélisation et la caractérisation expérimentale des systèmes énergétiques complexes, avec pour visée sociétale la diminution de la consommation de carburants fossiles et des émissions polluantes. L'équipe a créé des liens forts avec le milieu industriel, en effet, son domaine de recherche a de forts impacts sociétaux et environnementaux.

Laboratoire LHEEA : <https://lheea.ec-nantes.fr/>

Laboratoire LIFSE : <https://lifse.artsetmetiers.fr/>

Laboratoire LAMIH : <https://www.uphf.fr/lamih>

Profil du candidat :

- Diplôme d'Ingénieur ou Master en Energétique, Thermique et/ou Mécanique des Fluides
- Intérêt pour les techniques de mesures expérimentales et la modélisation
- Rigoureux, dynamique, entreprenant
- Apte à travailler en équipe

**Pour candidater :**

Envoyer un CV, une lettre de motivation, vos résultats académiques (les relevés de notes des trois dernières années) et une lettre de recommandation à : [georges.salameh@ec-nantes.fr](mailto:georges.salameh@ec-nantes.fr)

### Références bibliographiques :

- [1] M. Yue, H. Lambert, E. Pahon, R. Roche, S. Jemei, D. Hissel, "Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 146, 2021.
- [2] S. T. Thompson et al. *Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook*. *J. Power Sources*, vol. 399, no. March, pp. 304–313, 2018
- [3] L. Xing, et al. *Modeling and thermal management of proton exchange membrane fuel cell for fuel cell/battery hybrid automotive vehicle*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
- [4] Zhou, S., Xie, Z., Chen, C., Zhang, G., & Guo, J. (2022). Design and energy consumption research of an integrated air supply device for multi-stack fuel cell systems. *Applied Energy*, 324, 119704.
- [5] Y. Qiu, T. Zeng, Caizhi Zhang, G. Wang, Y. Wang, Z. Hu, M. Yan, Z. Wei. Progress and challenges in multi-stack fuel cell system for high power applications: Architecture and energy management, *Green Energy and Intelligent Transportation*, Volume 2, Issue 2, 2023
- [6] Y. Wan et al. *Improved empirical parameters design method for centrifugal compressor in PEM fuel cell vehicle application*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 2017.
- [7] Vidović, Tino, Ivan Tolj, Gojmir Radica, et Natalia Bodrožić Čoko. Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Balance of Plant and Performance Simulation for Vehicle Applications. *Energies* 15, n° 21, 2022.
- [8] H. S. Lee, et al. *Cooling performance characteristics of the stack thermal management system for fuel cell electric vehicles under actual driving conditions*. *Energies*, vol 9-5, 2016.
- [9] M. Hübel, N. Nirmala, M. Deligant, L. Li. Hybrid physical-AI based system modeling and simulation approach demonstrated on an automotive fuel cell. 2022 Modelica Asian Conference, Tokyo, Japan.
- [10] S. Delprat and M. Riad Boukhari. Reducing the Computation Effort of a Hybrid Vehicle Predictive Energy Management Strategy. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 7, pp. 6500-6513, July 2021.
- [11] C. Armenta Moreno, S. Delprat, R. R. Negenborn, A. Haseltalab, J. Lauber, M. Dambrine (2022). Computational reduction of optimal hybrid vehicle energy management. *IEEE Control Systems Letters (L-CSS)*, vol. 6, pp. 25-30
- [12] Nguyen C., Nguyen A.-T., Delprat S. (2023). Neural-Network-Based Fuzzy Observer with Data-Driven Uncertainty Identification for Vehicle Dynamics Estimation under Extreme Driving Conditions: Theory and Experimental Results. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*