



天津大学



THESE DE DOCTORAT DE



L'UNIVERSITE
DE BRETAGNE OCCIDENTALE

ECOLE DOCTORALE N° 647
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : *Génie Electrique*

Par

« **Wenming HUO** »

« **Three-Dimensional Multi-Physical Modeling, Structural Design and
Dynamic Characteristics of Large-Scale Proton Exchange Membrane
Fuel Cells** »

Thèse présentée et soutenue à « Tianjin », le « January 7, 2026 »

Unité de recherche : UMR CNRS 6027 IRDL – Institut de Recherche Dupuy de Lôme

En Cotutelle avec la Tianjin University (China) at the State Key Laboratory of Engines

Thèse N° :

Rapporteurs avant soutenance :

Daniel HISSEL Full professor, Université Marie et Louis Pasteur, France
Zhonghao RAO Full professor, Hebei University of Technology, China

Composition du Jury :

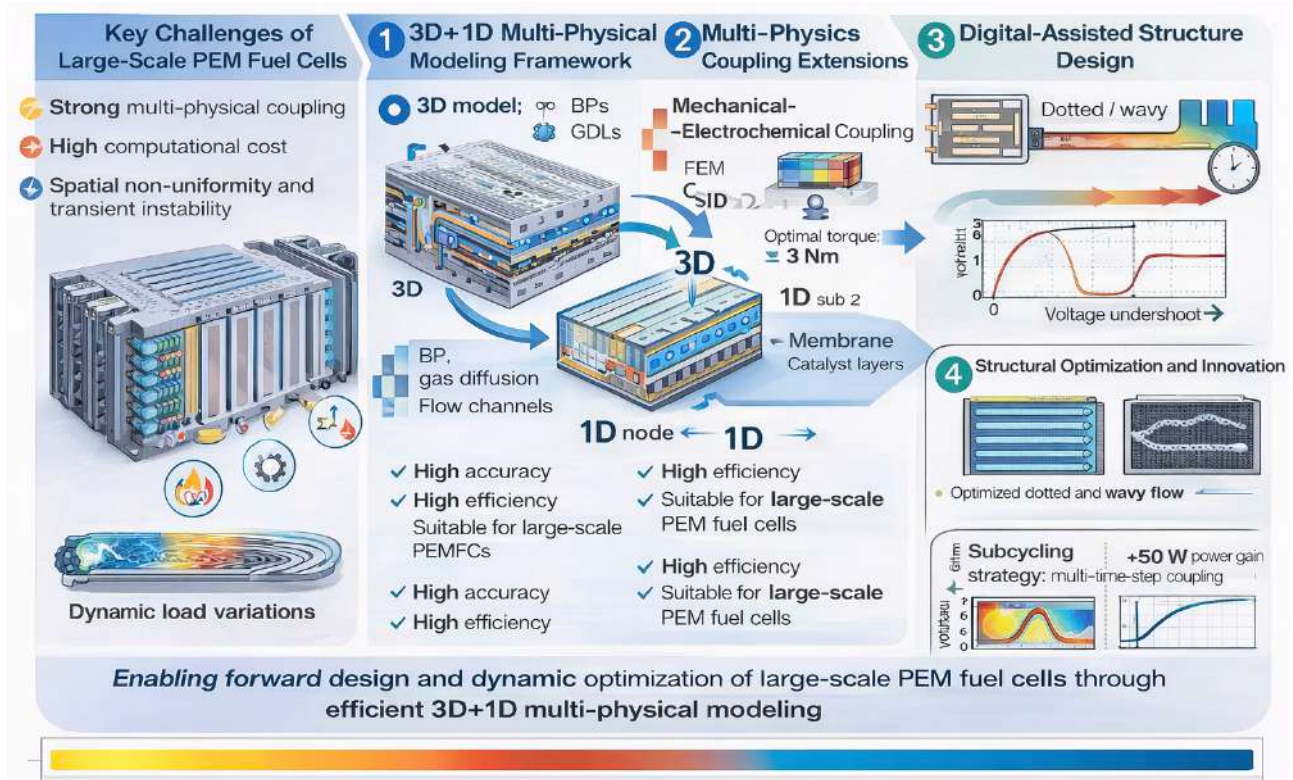
Président :	Demba DIALLO	Full professor, Université Paris-Saclay, France
Examineurs :	Mingjia LI	Full professor, Beijing Institute of Technology, China
	Maochang LIU	Full professor, Xi'an Jiaotong University, China
	Huicui CHEN	Associate professor, Tongji University, China
Dir. de thèse :	Mohamed BENBOUZID	Full professor, Université de Bretagne Occidentale, France
	Kui JIAO	Full professor, Tianjin University, China
Co-dir. de thèse :	Fei GAO	Full professor, University of Technology of Belfort-Montbéliard, France
	Yassine AMIRAT	Full professor, ISEN Brest, France

Invité(s)

Yassine AMIRAT Full professor, ISEN Brest, France
Maochang LIU Full professor, Xi'an Jiaotong University, China

Modélisation Multiphysique Tridimensionnelle, Conception Structurale et Analyse des Caractéristiques Dynamiques des Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons de Grande Dimension

Résumé—Cette recherche développe un modèle multiphysique 3D+1D pour des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) de grande dimension, en régime permanent et transitoire, afin d'élucider les mécanismes de transport internes, d'améliorer la densité de puissance et de soutenir leur commercialisation. Les effets d'assemblage à l'interface entre les plaques bipolaires et les couches de diffusion de gaz sont analysés en couplant un modèle structural par éléments finis avec le modèle électrochimique 3D+1D, permettant ainsi une interaction entièrement couplée entre le gaz, le liquide, la chaleur, les charges et les contraintes mécaniques. Le modèle est validé de manière exhaustive à l'aide de deux PEMFC de taille commerciale, dont les surfaces actives sont de 309.12 cm² et 332 cm². Un cadre numérique d'optimisation structurelle est ensuite proposé pour concevoir et évaluer les canaux de gaz et de refroidissement des PEMFC à rainure-nervure. Une structure intégrée est également développée, réduisant l'épaisseur totale et augmentant la puissance de 50 W à 4.1 A/cm². Enfin, un modèle transitoire multiphysique est établi. Les variations de charge moyenne entraînent un faible creux de tension dominé par les pertes ohmiques, tandis que les variations élevées provoquent un creux plus marqué, avec une récupération gouvernée par les pertes ohmiques et de concentration.



Three-Dimensional Multi-Physical Modeling, Structural Design and Dynamic Characteristics of Large-Scale Proton Exchange Membrane Fuel Cells

Abstract—This research develops a 3D+1D multi-physical model for large-scale proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under both steady and transient operating conditions to elucidate internal transport mechanisms, enhance power density, and support commercialization. Assembly effects at the interface between bipolar plates and gas diffusion layers are analyzed by coupling a finite-element structural model with the 3D+1D electrochemical model, enabling fully coupled gas, liquid, heat, charge, and mechanical interactions. The model is comprehensively validated using two commercial-scale PEMFCs with active areas of 309.12 cm²

and 332 cm². A digitally assisted design framework is further proposed to guide structural optimization. Within this framework, gas channel and coolant channel configurations for large-scale conventional channel-rib PEMFCs are designed and evaluated. To improve power density, a novel integrated PEMFC structure is proposed, reducing overall thickness and increasing output power by 50 W at 4.1 A/cm². Finally, a multi-physical transient model is established within the same 3D+1D framework. Under medium-load variations dominated by ohmic losses, voltage undershoot remains small, whereas high-load variations induce more significant undershoot, with recovery jointly governed by ohmic and concentration losses.

The following are the main publications related to the Ph.D. thesis work.

- [1] **Wenming Huo**, Linhao Fan, Yunfei Xu, Mohamed Benbouzid, Wenzhen Xu, Fei Gao, Weizhuo Li, Nian Shan, Biao Xie, Haipeng Huang, Bohao Liu, Yassine Amirat, Chuan Fang, Xiaohui Li, Quanquan Gan, Feiqiang Li, Kui Jiao. Digitally-assisted structure design of a large-size proton exchange membrane fuel cell. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(2): 631-644. (IF:31.0) (Front cover)
- [2] **Wenming Huo**, Siyuan Wu, Zhiming Bao, Chasen Tongsh, Biao Xie, Mohamed Benbouzid, Fei Gao, Yassine Amirat, Kui Jiao. Transport mechanisms analysis of large-size proton exchange membrane fuel cells with novel integrated structure under ultra-high current densities. *eTransportation*, 2025: 100398. (IF:17.0)
- [3] **Wenming Huo**, Peng Wu, Biao Xie, Qing Du, Jinqiao Liang, Zhengguo Qin, Guobin Zhang, Iman Sarani, Wenzhen Xu, Bohao Liu, Bowen Wang, Yan Yin, Jiewei Lin, Kui Jiao. Elucidating non-uniform assembling effect in large-scale PEM fuel cell by coupling mechanics and performance models. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116668. (IF:10.9)
- [4] **Wenming Huo**, Bohao Liu, Wenzhen Xu, Biao Xie, Linhao Fan, Mohamed Benbouzid, Yunfei Xu, Tiexin Ding, Chuan Fang, Fei Gao, Yassine Amirat, Feiqiang Li, Kui Jiao. High precision and efficient simulation of large-size proton exchange membrane fuel cells incorporated with a novel alternative cooling method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 230: 125780. (IF:5.8)
- [5] **Wenming Huo**, Biao Xie, Siyuan Wu, Lizhen Wu, Guobin Zhang, Hanyang Zhang, Zhengguo Qin, Ying Zhu, Renfang Wang, Kui Jiao. Full-scale multiphase simulation of automobile PEM fuel cells with different flow field configurations. *International Journal of Green Energy*, 2024, 21(1): 154-169. (IF:3.1)