

Système de pile à combustible modulaire et évolutif pour véhicules lourds routiers électrifiés

Modular and Scalable fuel cell system for on-road heavy-duty electrified vehicles

Organisme employeur | Host organization: Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP), Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France

Lieux de travail | Locations: L2EP, Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France / Institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies), Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort, France

Durée | Duration: 3 ans | 3 years

Contacts: Dr. HdR Walter LHOMME – walter.lhomme@univ-lille.fr
Dr. HdR Elodie PAHON – elodie.pahon@utbm.fr
Dr. Halima IKAOUASSEN – halima.ikaouassen@univ-fcomte.fr
Pr. Samir JEMEI – samir.jemei@univ-fcomte.fr

Profil recherché | Required profile:

Diplôme de master (ou équivalent) en génie électrique, avec des compétences en piles à combustible et véhicules électrifiés. Une maîtrise du formalisme graphique REM serait également appréciée. Capacités rédactionnelles en anglais.

Master's degree (or equivalent) in electrical engineering, with skills in fuel cells and electrified vehicles. A command of the EMR graphical formalism would also be appreciated. English writing capacities.

Financement | Funding: Agence National de la Recherche (ANR)

Candidature | Application:

CV, lettre de motivation, relevés de notes, lettres de recommandation éventuelles
CV, cover letter, transcripts, possible recommendation letters

Contexte | Context

Contrairement aux nouveaux véhicules légers routiers, pour lesquels des normes obligatoires d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sont en vigueur dans l'Union Européenne (UE) depuis une décennie, les normes d'émissions de CO₂ pour les nouveaux Véhicules Lourds Routiers (VLR) n'ont été adoptées qu'en 2019. Ce retard est principalement dû à des exigences plus strictes pour remplacer les VLR à moteur diesel, notamment en termes de durée de vie, d'autonomie ou de temps de ravitaillement. Aujourd'hui, un déploiement rapide de nouveaux types de VLR est nécessaire afin de réduire l'empreinte écologique du transport. Pour y parvenir, l'UE vise à mettre en circulation des véhicules zéro émission utilisant des batteries ou des piles à hydrogène. Afin de favoriser une croissance rapide de ces véhicules, la tendance est au développement de plateformes modulaires et évolutives. Appliquées aux systèmes d'alimentation, ces plateformes conduisent à l'utilisation de batteries modulaires et de piles à combustible multi-stacks. Dans cette optique, MARSHALL (Modular and Scalable battery and fuel cell systems for on-road Heavy-duty electrified vehicles) est un nouveau projet, financé par l'Agence nationale de la recherche française (ANR), dans le cadre du réseau national français MEGEVH¹ sur les véhicules électrifiés. Ce projet réunit trois laboratoires : Ampère, FEMTO-ST et L2EP, et a pour objectif de développer une méthodologie générique pour la conception de batteries modulaires et de piles à combustible multi-stacks appliquées aux VLR. L'ambition du projet est d'accélérer le processus de conception de l'architecture des systèmes de batteries et de piles à combustible d'au moins 20 %, réduisant ainsi le délai de mise sur le marché des VLR électriques.

¹ MEGEVH est un groupe de recherche français visant à favoriser la collaboration entre les partenaires académiques et industriels axée sur la modélisation et la gestion de l'énergie des véhicules électrifiés.



Unlike for new on-road light-duty vehicles, for which mandatory carbon dioxide (CO₂) emissions standards have been in place in the European Union (EU) for a decade, the CO₂ emissions standards for new on-road Heavy-Duty Vehicles (HDV) were only adopted in 2019. This delay is particularly due to more stringent requirements, to substitute the diesel engine-based HDV, in terms of lifetime, driving range or refueling time. Today, a fast deployment of new types of on-road HDV to reduce the ecological footprint of transportation is then required. To tackle this, the EU aims to deploy zero-emission vehicles using battery or hydrogen fuel cell. In order to expect a rapid growth of these vehicles the trend is to develop scalable and modular platforms. Applied to the power supplies, the modular and scalable platforms result to use multi-module batteries and multi-stack fuel cells. For this purpose, MARSHALL (Modular and Scalable battery and fuel cell systems for on-road Heavy-duty electrified vehicles) is a new project, funded by the French National Research Agency (ANR), within the framework of the French national network MEGEVH² on the electrified vehicles, between three labs; Ampère, FEMTO-ST and L2EP; to develop a generic methodology for the design of multi-module batteries and multi-stack fuel cells applied to on-road HDV. The ambition of the project is to accelerate the system architecture design process of the battery and fuel cell systems by at least 20%, thereby reducing the time-to-market of battery and fuel cell HDV.

Objectif de la thèse | Objective of the PhD thesis

La thèse vise à développer une méthode générique pour mettre à l'échelle les systèmes de piles à combustible mono et multi-stacks. Les lois de mise à l'échelle seront établies pour des propriétés pertinentes, telles que les pertes, ainsi que pour les paramètres des composants, en tenant compte des différentes surfaces actives. Cela sera réalisé en utilisant le formalisme de la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) afin de développer des lois innovantes permettant de redimensionner les composants de référence, sans avoir à recommencer les étapes de conception, souvent longues. L'organisation consistera à conserver le modèle et la représentation d'un composant de référence, tout en les complétant avec deux éléments d'adaptation de puissance. La complexité réside dans l'intégration des facteurs dans ces éléments d'adaptation de puissance et dans le fait de ne mettre à l'échelle que les propriétés d'entrée et de sortie du modèle de référence. Plusieurs étapes seront nécessaires pour atteindre cet objectif.

The PhD thesis aims to develop a generic method to scale single-stack fuel cell and multi-stack fuel cell system. The scaling laws will be developed for relevant properties, such as losses, as well as component parameters, by taking into account different active surface areas. This will be done by using Energetic Macroscopic Representation (EMR) formalism to develop innovative laws that allow to up- or down-size reference components, making it needless to redo time-consuming design steps. The organization will consist of keeping the model and the representation of a reference component, but complemented with two power adaptation elements. The difficulty relies on the embedding of the factors in power adaptation elements and scale only the input and output properties of the reference model. Several steps will be achieved to reach this objective.

Laboratoires impliqués | Laboratory involved

Le L2EP (Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance, ULR 2697, <https://l2ep.univ-lille.fr>) regroupe environ 100 chercheurs, dont 36 enseignants-chercheurs et 42 doctorants, spécialisés dans les systèmes électriques innovants. Son équipe commande est reconnue internationalement pour la gestion énergétique des véhicules électrifiés. Depuis 1990, cette équipe a développé plusieurs méthodologies génériques, notamment le formalisme graphique REM (Représentation Énergétique Macroscopique). La REM est aujourd'hui enseignée à l'international, et une école d'été annuelle lui est consacrée (www.emrwebsite.org). Une plateforme scientifique de 150 m² est dédiée à la validation de nouveaux concepts de véhicules électrifiés, allant des sous-systèmes aux véhicules complets, afin de développer des solutions de transport plus efficaces et moins polluantes (<https://ev-platform.univ-lille.fr/>).

L'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique – Sciences et Technologies, CNRS UMR 6174, <https://www.femto-st.fr>) est un laboratoire de recherche commun regroupant plusieurs disciplines des sciences de l'ingénieur à travers ses 7 départements, dont le département Énergie. Avec 130 membres, ce département est fortement impliqué dans la recherche sur l'énergie hydrogène, en vue de concevoir, évaluer, développer et intégrer des systèmes exploitant ce vecteur énergétique pour des applications stationnaires et embarquées, tout en intégrant les dimensions humaines et sociales. Une plateforme de 600 m² est dédiée aux tests de systèmes à hydrogène. Elle comprend 8 salles de test entièrement sécurisées pour les essais avancés sur l'hydrogène. Des tests longue durée peuvent être réalisés sur des bancs d'essai dédiés aux piles à combustible, couvrant une plage de puissance allant de 500 W à 120 kW ([lien](#)).

² MEGEVH is a French research group to foster collaborations between academic and industrial partners, into a coordinated and coherent whole from different disciplines, on the modelling and power management of electrified vehicles.



Les deux laboratoires, et en particulier les chercheurs impliqués dans ce projet, disposent d'une expertise reconnue dans le domaine, comme en témoignent leurs publications directement liées au sujet.

The L2EP (Laboratory of Electrical Engineering and Power Electronics, ULR 2697, <https://l2ep.univ-lille.fr/en/>) has about 100 researchers, including 36 Professors and 42 PhD students, in the field of innovative electrical systems. Its control team is internationally recognized for the energy management of various electrified vehicles. Since 1990, the control team of L2EP has developed various generic methods, such as the EMR graphical formalism. EMR is nowadays internationally taught and annual EMR summer school is organized every year (www.emrwebsite.org). A scientific platform of 150 m² is dedicated to validate new electrified vehicle concepts, from subsystems to vehicles, for more efficient and less pollutant transportation systems (<https://ev-platform.univ-lille.fr/>).

The FEMTO-ST (Franche-Comté Electronics Mechanics Thermal Science and Optics – Sciences and Technologies) institute (CNRS UMR 6174, <https://www.femto-st.fr/en>) is a joint research laboratory whose competences cover several fields of engineering sciences with 7 departments, including the Energy department. With 130 members, the Energy department is very involved in Hydrogen Energy to design, evaluate, develop and integrate systems based on the use of the hydrogen energy vector for stationary and on-board applications, while taking account human and social sciences. An existing platform of 600 m² is dedicated to hydrogen system test. That includes 8 test rooms fully secured for advanced hydrogen testing. Long duration tests could be performed on test benches for fuel cell stack tests, ranging from 500 W to 120 kW ([link](#)).

Both laboratories, and in particular the people involved in this project, have a proven expertise in the field which can be demonstrated by the publications directly related to the subject.

Bibliographie en lien avec la thèse | Bibliography related to the PhD thesis

- [1000kmPlus 19] 1000kmPLUS, “Scalable European powertrain technology platform for cost-efficient electric vehicles to connect Europe”, European H2020 project, 2019-2023, [link](#) (Feb. 2023)
- [Aroua 23] A. Aroua, W. Lhomme, F. Verbelen, M. N. Ibrahim, A. Bouscayrol, P. Sergeant, K. Stockman, “Impact of scaling laws of permanent magnet synchronous machines on the accuracy of energy consumption computation of electric vehicles”, *eTransportation*, vol. 18, no. 100269, 2023, [doi](#)
- [Bankati 22] W. R. Bankati, A. Macias, M. Soleymani, L. Boulon, S. Jemeï, “An online energy management strategy for multi-fuel cell stacks systems using remaining useful life prognostic”, IEEE-VPPC 2022, Merced, USA, 2022, [doi](#)
- [Domingues 19] G. Domingues, F. J. Marquez, P. Fyhr, A. Reinap, M. Andersson, M. Alaküla, “Optimization of electric powertrains based on scalable cost and performance models”, *IEEE trans. on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 751-764, 2018, [doi](#)
- [Grunditz 20] E. A. Grunditz, T. Thiringer, N. Saadat, “Acceleration, drive cycle efficiency and cost trade-offs for scaled electric vehicle drive system”, *IEEE trans. on Industry Applications*, vol. 56, no 3, p. 3020-3033, 2020, [doi](#)
- [HYSysPEM 22] HYSysPEM, “Optimisation de systèmes d'énergie hybride avec des systèmes pile PEM multi-stacks pour application au transport lourd”, ANR Priority Research Programmes & Equipment – Decarbonated H2 (PEPR-H2), 2022-2027, [link](#) (Feb. 2023)
- [Karthikeyan 14] P. Karthikeyan, P. Velmurugan, A. J. George, R. R. Kumar, R. J. Vasanth, “Experimental investigation on scaling and stacking up of proton exchange membrane fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 21, 2014, [doi](#)
- [Lhomme 20] W. Lhomme, F. Verbelen, M. N. Ibrahim, K. Stockman, “Energetic macroscopic representation of scalable permanent magnet synchronous machines”, IEEE-VPPC 2020, virtual, 2020, [doi](#)
- [Marx 16] N. Marx, D. C. Toquica Cárdenas, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel, “Degraded mode operation of multi-stack fuel cell systems”, *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, no. 1, pp. 3-11, 2016, [doi](#)
- [Ndiaye 21] A. Ndiaye, R. German, A. Bouscayrol, P. Venet, E. Castex, “Influence of electric vehicle charging on lithium-ion batteries aging”, IEEE-VPPC 2021, Gijon (Spain), 2021, [doi](#)
- [Pahon 21] E. Pahon, D. Bouquain, D. Hissel, A. Rouet, C. Vacquier, “Performance analysis of proton exchange membrane fuel cell in automotive applications” *Journal of Power Sources*, vol. 510, 2021, pp. 230385, [doi](#), [HAL Id](#)
- [Qiu 23] Y. Qiu, T. Zeng, C. Zhang, G. Wang, Y. Wang, Z. Hu, Y. Meng, Z. Wei, “Progress and challenges in multi-stack fuel cell system for high power applications: architecture and energy management”, *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2023, [doi](#)
- [Zhou 22] S. Zhou, L. Fan, G. Zhang, J. Gao, Y. Lu, P. Zhao, C. Wen, L. Shi, Z. Hu, “A review on proton exchange membrane multi-stack fuel cell systems: architecture, performance, and power management”, *Applied Energy*, vol. 310, no. 118555, March 2022, [doi](#)

