Master Thesis internship proposal 2027

Analyse de cycle de vie des piles à combustible modulaires et évolutives dans les véhicules électrifiés lourds

Life cycle assessment for modular and scalable fuel cells in heavy-duty electrified vehicles

Organisme employeur | *Host organization*: Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France

Laboratoires impliqués | *Laboratories involved*:
Laboratoire Ampère, Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France
L2EP, Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France
Institut FEMTO-ST, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort, France

Dates: à partir de mars 2027 pendant 6 mois | from March 2027 for 6 months

Contacts: Dr. Hugo HELBLING – hugo.helbling@univ-lyon1.fr
Mr. Nadeem BAZA – nadeem.baza@univ-lille.fr
Dr. Halima IKAOUASSEN – halima.ikaouassen@univ-fcomte.fr
Dr. HdR Walter LHOMME – walter.lhomme@univ-lille.fr

Profil recherché | *Required profile*:
Etudiant en 2ème année de Master (ou équivalent) en génie électrique, avec des compétences en batteries, piles à combustible et véhicules électrifiés. Une connaissance de l'approche d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) serait un atout. Une maîtrise du formalisme graphique REM serait également appréciée. Des compétences en communication anglaise (orale et écrite) sont requises.
2nd-year master's student (or equivalent) in electrical engineering, with skills in batteries, fuel cells, and electrified vehicles. Knowledge of the Life Cycle Assessment (LCA) approach would be an asset. Proficiency in the EMR graphical formalism would also be appreciated. English communication skills (oral and written) are required.

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 (CO_2) sont en vigueur dans l'Union Européenne (UE) depuis une décennie, les normes d'émissions de CO_2 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 secteur des transports. 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

This master thesis will be part of the project MARSHALL and received government funding managed by the French National Research Agency (ANR)

national français MEGEVH[1] sur les véhicules électrifiés. Ce projet réunit trois laboratoires : Ampère (Lyon), FEMTO-ST (Belfort) et L2EP (Lille), 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. L'applicabilité de la méthode générique sera également évaluée sous le prisme des impacts environnementaux (méthode d'analyse sur cycle de vie, éco-conception) de batteries multi-modules et de piles à combustible multi-stacks mises à l'échelle. Développer une méthode générique en tenant compte des caractéristiques d'ingénierie et d'éco-conception dans une approche globale constitue un défi interdisciplinaire. Si l'aspect de modularité semble être pertinent vis-à-vis de la réduction des impacts environnementaux (augmentation de la démontabilité et de la réparabilité), il demeure nécessaire de quantifier la contribution de la modularité sur les impacts environnementaux des systèmes considérés afin d'éviter tout transferts d'impacts et développer des solutions plus durables sur l'ensemble du cycle de vie. De plus, appliquer une approche d'éco-conception de la mise à l'échelle des systèmes de batteries et piles à combustible modulaires permettrait de quantifier l'effet d'échelle, potentiellement fortement non linéaire, sur les impacts environnementaux.

Unlike for new on-road light-duty vehicles, for which mandatory carbon dioxide (CO_2) emissions standards have been in place in the European Union (EU) for a decade, the CO_2 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 MEGEVH[1] on the electrified vehicles, between three labs; Ampère (Lyon), FEMTO-ST (Belfort) and L2EP (Lille); 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. The applicability of the generic method will also be assessed from the perspective of environmental impacts (life cycle analysis method for eco-design) of scalable multi-module batteries and multi-stack fuel cells. Developing a generic method that takes into account engineering and eco-design features in a holistic approach is an interdisciplinary challenge. While the aspect of modularity seems relevant to reduce the environmental impacts, (increase of reparability and disassembly aspects), it is still necessary to quantify the contribution of modularity to the environmental impacts of the considered systems. Furthermore, applying an eco-design approach to the scalability of modular battery and fuel cell systems would allow for the quantification of the scaling effect, which could be significantly nonlinear, on environmental impacts.

Objectif du stage de Master | *Objective of the Master thesis*

L'objectif de ce stage de Master 2 est d'identifier des indicateurs d'éco-conception pertinents pour les systèmes de piles à combustible, en prenant en compte à la fois les aspects environnementaux (émissions de gaz à effet de serre, épuisement des ressources naturelles, écotoxicité, etc.) et les aspects liés à la conception (dimensionnement, réparabilité, modularité, fiabilité, démontabilité, etc.), dans le cadre de la mise à l'échelle et de la modularisation. En raison de l'orientation technologique du projet MARSHALL, l'accent sera mis sur la définition d'indicateurs technologiques et environnementaux destinés directement aux concepteurs des systèmes étudiés. Ces indicateurs permettront d'évaluer les performances environnementales et techniques de systèmes de piles à combustible modulaires et évolutifs sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les travaux porteront notamment sur le développement d'un inventaire paramétrique du cycle de vie de systèmes de piles à combustible PEM, en considérant différents niveaux de puissance et différentes configurations modulaires. L'inventaire distinguera la pile à combustible, comprenant ses principaux composants tels que l'assemblage membrane-électrodes (MEA), les plaques bipolaires et les éléments structurels, ainsi que les auxiliaires ou composants du Balance of Plant (BoP). L'étude analysera l'influence des variations de la surface active par cellule, du nombre de cellules et de la puissance du système sur les besoins en matériaux et les impacts

[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 / *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.*

This master thesis will be part of the project MARSHALL and received government funding managed by the French National Research Agency (ANR)

environnementaux. Une attention particulière sera accordée à la mise à l'échelle et à la modularisation de la pile à combustible afin d'identifier les relations entre les paramètres de conception technologique et les performances environnementales. La réparabilité, la fiabilité, la modularité et la démontabilité seront également étudiées comme indicateurs complémentaires d'éco-conception. Différentes architectures et configurations de piles à combustible seront comparées afin d'évaluer les bénéfices potentiels et les compromis associés aux approches de conception modulaires et évolutives, tant du point de vue technique qu'environnemental. Plusieurs cas d'usage de véhicules lourds seront considérés afin d'évaluer l'applicabilité de la méthodologie proposée à différentes catégories de véhicules et à différents besoins en puissance.

The master's thesis aims to identify relevant eco-design indicators for fuel-cell systems, taking into account both environmental aspects (greenhouse gas emissions, depletion of natural resources, ecotoxicity, etc.) and design aspects (repairability, modularity, reliability, disassemblability, etc.) within the framework of scaling and modularization. Due to the technological orientation of the MARSHALL project, the focus will be on defining technological indicators directly applicable to the design and development of the studied systems. These indicators will be used to assess the environmental and technical performance of modular and scalable fuel-cell systems over their life cycle. The work will notably involve developing a parametric life cycle inventory for PEM fuel-cell systems, considering different power levels and modular configurations. The inventory will distinguish between the fuel-cell stack, including its main components such as the membrane electrode assembly, bipolar plates and structural components, and the associated auxiliaries or balance-of-plant components. The study will investigate how changes in fuel-cell active area per cell, number of cells and system power affect material requirements and environmental impacts. Particular attention will be paid to the scaling and modularization of the fuel-cell stack in order to identify the relationships between technical design parameters and environmental performance. Repairability, reliability, modularity and disassemblability will also be considered as complementary eco-design indicators. Different fuel-cell architectures and configurations will be compared to assess the potential benefits and trade-offs of modular and scalable design approaches from both technical and environmental perspectives. Several heavy-duty vehicle use cases will be considered to evaluate the applicability of the proposed methodology to different vehicle categories and power requirements.

Laboratoires impliqués | *Laboratories involved*

Le Laboratoire Ampère (CNRS UMR 5005, http://www.ampere-lab.fr) travaille depuis 30 ans dans le domaine des systèmes de stockage d'énergie : batteries, supercondensateurs et condensateurs. Les principales compétences développées concernent la caractérisation et la modélisation électriques, électrochimiques et électrothermiques, ainsi que les aspects de développement durable, d'optimisation de la gestion et d'éco-conception. Une plateforme de caractérisation expérimentale et de fiabilité est dédiée aux systèmes de stockage d'énergie, comprenant une pluralité de bancs de caractérisation et de vieillissement.

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).

Les trois 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 Ampère Laboratory (CNRS UMR 5005, http://www.ampere-lab.fr/?lang=en) has been working for 30 years in the field of energy storage systems, including batteries, supercapacitors, and capacitors. The main skills developed include

This master thesis will be part of the project MARSHALL and received government funding managed by the French National Research Agency (ANR)

electrical, electrochemical, and electro-thermal characterization and modelling, as well as aspects of sustainable development, management optimization, and eco-design. An experimental characterization and reliability platform is dedicated to energy storage systems, comprising multiple characterization and aging benches.

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 method, 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).

The three 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 le mémoire de master| Bibliography related to the Master's 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

[Basma 22] H. Basma, F. Rodríguez, "Fuel cell electric tractor-trailers: technology overview and fuel economy", International Council on Clean Transportation working paper, 2022, link (March 2024)

[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

[Detti 22] A. Detti, N. Yousfi Steiner, L. Bouillaut, A. Badara Samé, S. Jemeï, "Hybrid ageing model of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)", International Journal of Energy and Power Engineering, vol. 11, no. 1, pp. 17-29, 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

[Freiberger 05] S. Freiberger, "Design for recycling and remanufacturing of fuel cells", 4th IEEE International Symposium on Envi-ronmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 2005, 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

[Macias 21] A Macias, N El Ghossein, J Trovão, A Sari, P Venet, L Boulon, "Passive fuel cell/lithium-ion capacitor hybridization for vehicular applications", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, no. 56, 2021, 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

[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

This master thesis will be part of the project MARSHALL and received government funding managed by the French National Research Agency (ANR)

[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

This master thesis will be part of the project MARSHALL and received government funding managed by the French National Research Agency (ANR)