



Sujet de Thèse (2024-2027)

Etude des interactions entre le véhicule à pile à combustible et son environnement

Mots clés : *Véhicule hydrogène, vieillissement, contrainte d'usage, contrainte environnementale, gestion de l'énergie, instrumentation, micro-réseau/réseaux, durabilité.*

Résumé :

Ce sujet doctoral vise à développer un outil de simulation pour étudier les interactions dynamiques entre chaque sous-système du véhicule à combustible et son environnement, de la production d'hydrogène sur un micro-réseau jusqu'à son utilisation sur route. Les modèles seront alimentés par des expériences sur une flotte de véhicules instrumentés, et ce, pour différents segments automobiles. Les modèles développés prendront en compte le vieillissement et l'amortissement des composants selon différents scénarii et usages. Une étude sur les impacts environnementaux et socio-économiques sera également menée. Les plateformes développées dans le projet REMED¹ ainsi que la plateforme scientifique eV² du L2EP permettront d'alimenter les véhicules et de tester les outils et l'application des stratégies de gestion identifiées dans cette thèse.

Contexte :

Face au dérèglement climatique, le véhicule à pile à hydrogène est une alternative pour remplacer le véhicule thermique. Son utilisation permettrait de réduire in-situ les émissions polluantes mais également la dépendance des ressources fossiles si la production de l'hydrogène est réalisée de manière durable et respectueuse de l'environnement. La diffusion du véhicule à hydrogène reste cependant faible, majoritairement due à son convertisseur d'énergie : la pile à combustible. Même si certains véhicules commencent à arriver sur le marché automobile, le marché n'est pas encore totalement mature. De nombreuses recherches, tant académiques qu'industrielles, sont menées pour améliorer non seulement la fiabilité de la pile à combustible mais également les auxiliaires nécessaires à son bon fonctionnement. De nombreux facteurs peuvent affecter la durée de vie du système pile à combustible tels que le vieillissement, l'usage ou encore la température.

Afin d'être une alternative intéressante, l'hydrogène utilisé au sein du véhicule doit être produit de manière durable. L'hydrogène vert, utilisant des sources d'énergie renouvelable, est aujourd'hui la solution privilégiée. Toutefois, ces « énergies vertes » sont souvent de nature intermittente et sans inertie. Ce caractère aléatoire réduit leur capacité à fournir une source d'énergie stable et le rend plus difficile à intégrer au réseau. Pour garantir la stabilité et la fiabilité des réseaux intelligents intégrant des sources d'énergie renouvelable, des systèmes de stockage de l'énergie, telles que les batteries ou des systèmes « hydrogène », doivent être intégrés pour assurer l'équilibre entre la production et la consommation mais aussi pour permettre plus de flexibilité au système. Suite aux problématiques environnementales et aux réglementations sur les émissions de dioxyde de carbone deux tendances se dessinent dans les secteurs de l'énergie et des transports. D'une part, on observe une forte pénétration des sources d'énergie renouvelable – solaire et éolien principalement – au sein du réseau et notamment via l'installation de micro-réseaux à l'échelle d'un bâtiment ou d'un quartier. D'autre part, l'électrification des véhicules est en plein essor et les batteries des véhicules électriques deviennent plus attrayantes en termes de taille et de densité énergétique. Les systèmes « hydrogène » deviennent aussi plus attrayant en terme de coût et de durabilité. Le concept de « Vehicle-to-Grid » devient de plus en plus présent dans la littérature académique et dans l'industrie et laisse envisager la possibilité que les batteries des véhicules électriques soient utilisées comme des systèmes de stockage de l'énergie pour rendre différents services au réseau.

Dans ce contexte, l'étude de l'impact de l'usage des véhicules électrifiés en grande nombre sur les réseaux et les usagés ainsi que, en contrepartie, l'influence sur la durée de vie de ces véhicules de cet usage doit être étudié. Il semble donc nécessaire de développer des outils de simulation afin d'évaluer/comparer sur des objectifs multi-critères leur pertinence face aux enjeux environnementaux et sociétaux.

¹ Réussir l'Efficiencia des Mobilités d'Excellence Décarbonées (REMED), Compétences et Métiers d'avenir, France 2030 – <https://www.remed-france2030.fr/>

² Plateforme scientifique « électricité & Véhicules » du L2EP – <https://ev-platform.univ-lille.fr/>

Sujet doctoral :

Les travaux de recherche doctorales porteront sur le développement d'un outil de simulation pour étudier les interactions dynamiques entre chaque sous-système du véhicule à combustible et son environnement, de la production d'hydrogène sur un micro-réseau jusqu'à son utilisation sur route. Des modèles couplés entre les différents sous-systèmes du véhicule (chaîne de traction, batteries, auxiliaires et pile à combustible) seront spécifiquement développés à cet effet et validés pour différents scénarii et usages. Différentes granularités de modèles seront également étudiés pour prendre en compte le vieillissement des composants suite aux contraintes d'usage et environnementale. L'interaction de la recharge en hydrogène sur un micro-réseau doté d'un système « hydrogène » sera également traitée, et ce afin de contribuer à optimiser des lois de gestion d'un point de vue énergétique, économique et environnemental de l'ensemble véhicule & réseau. Les modèles des composants clés seront des modèles principalement énergétiques permettant la mise en place des outils de gestion/dimensionnement ainsi que les études de cas associées.

Les différents véhicules à pile à hydrogène instrumentés ou à instrumenter devront être considérés, analysés et voire complétés en terme d'instrumentation pour obtenir l'ensemble des informations utiles. Un plan d'expérience pour ordonner les données permettra de se projeter sur l'exploitation des données et les usages à affecter aux véhicules. Le sujet s'appuiera sur les différents équipements scientifiques mis à disposition par chaque laboratoire impliqué dans cette thèse. Ainsi, le laboratoire L2EP mettra à disposition sa plateforme scientifique « électricité & Véhicules » (eV) avec notamment sa Toyota Mirai, voiture à pile à hydrogène de segment D – berline familiale. Dans la cadre du projet REMED, représenté ici par le laboratoire Ampère impliqué dans cette thèse, une plateforme de démonstration avec des véhicules électrifiés – tout électrique et à pile à hydrogène – ainsi qu'un micro-réseau seront déployées. Cette plateforme servira de cas d'étude pour appliquer les interactions entre le véhicule et le réseau

Laboratoires impliqués :

Le laboratoire Ampère (CNRS UMR 5005) travaille depuis plus de 30 ans dans le domaine des systèmes de stockage d'énergie. Les principales compétences développées concernent la caractérisation électrique, électrochimique électrothermique et la modélisation, ainsi que les aspects développements durables, optimisation de la gestion et éco-conception. La personne recrutée aura accès à la plateforme expérimentale de caractérisation et de fiabilité des dispositifs de stockage comprenant une pluralité de bancs de caractérisation et de vieillissement ainsi qu'à la plateforme du projet REMED. Actuellement, une dizaine de thèses de doctorat courent sur ses sujets.

Le Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) de Lille est constitué de 4 équipes dont les travaux couvrent tous les aspects inhérents au domaine de l'énergie électrique. L'équipe Commande se focalise sur le développement de formalismes de modélisation et de commande dédiés aux systèmes de conversion d'énergie dont l'un des thèmes applicatifs concerne les véhicules électrifiés. Depuis 2008, l'équipe a notamment développé une plateforme scientifique « ouverte » pour les véhicules électrifiés : la plateforme « électricité & Véhicules » (eV) qui a pour objectif de développer de nouveaux systèmes pour véhicules électrifiés innovants. Sa spécificité est de pouvoir étudier chaque sous-système d'un véhicule électrifié en le mettant en interaction avec les autres sous-systèmes. Parmi les récentes innovations on peut notamment citer le développement d'un simulateur de conduite couplé à un émulateur temps réel d'un entraînement électrique ou encore trois véhicules électrifiés instrumentés : deux à batterie et un à hydrogène.

Les deux laboratoires, et en particulier les personnes impliquées dans ce projet, disposent d'une expertise avérée dans le domaine qui peut être démontrée par les publications en relation directe avec le sujet.

Profil du candidat ou de la candidate recherchée :

Le ou la candidat(e) sera issu d'un Master ou d'une école d'ingénieurs et devra avoir des bases solides en génie électrique. Des connaissances dans les systèmes « hydrogène », la programmation, l'instrumentation ou les méthodes d'optimisation seront les bienvenus. Une maîtrise du formalisme graphique REM (Représentation Énergétique Macroscopique) serait également appréciée.

Rémunération :

En fonction du profil du candidat(e)

Informations pratiques :

Ces thèses se dérouleront conjointement entre le Laboratoire Ampère situé à Villeurbanne (69100) et le Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) situé à Villeneuve d'Ascq (59650).

Date de début : dès que possible, en fonction de la disponibilité des candidats

Ecole Doctorale : EEA (Electronique, Electrotechnique et Automatique) de l'Université de Lyon

Encadrement & Contact :

Merci d'envoyer vos candidatures aux adresses mentionnées ci-après :

Ali Sari, codirecteur Ampère : ali.sari@univ-lyon1.fr

Walter Lhomme, codirecteur L2EP : walter.lhomme@univ-lille.fr

Bibliographie en lien avec le sujet doctoral :

- M. Ben-Marzouk, G. Clerc, S. Pelissier, A. Sari, P. Venet, "Generation of a real-life battery usage pattern for electrical vehicle application and aging comparison with the WLTC profile", IEEE transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 6, pp. 5618-5627, 2021, [doi](#)
- A. Chauvin, A. Hijazi, E. Bideaux, A. Sari, "Combinatorial approach for sizing and optimal energy management of HEV including durability constraints", IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Búzios (Brazil), pp. 1236-1241, 2015, [doi](#)
- C. Dépature, W. Lhomme, A. Bouscayrol, L. Boulon, P. Sicard, T. Jokela, "Characterisation of the electric drive of EV: on-road versus off-road method", IET Electrical Systems in Transportation, vol. 7, no. 3, pp. 215-222, 2017, [doi](#)
- R. German, S. Shili, A. Desrevaux, A. Sari, P. Venet, A. Bouscayrol, "Dynamical coupling of a battery electro-thermal model and the traction model of an EV for driving range simulation", IEEE transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 1, January 2020, pp. 328-337, [doi](#) (common paper of L2EP and Ampère)
- B. Le Hen Ortega, R. German, A. Bouscayrol, L. Boulon, "Merging control for the hybrid energy storage subsystem of a Fuel-Cell Vehicle", EPE'21 ECCE Europe, 2021, [doi](#)
- W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, P. Barrade, « La REM : formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques », Techniques de l'Ingénieur, D3066 V1, 2014, [doi](#)
- H. Lohse-Busch, K. Stutenberg, M. Duoba, S. Iliev, "Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 Toyota Mirai", no. ANL/ESD-18/12, Argonne National Lab, 2018
- 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](#) (common paper of L2EP and Ampère)
- D. Ramsey, A. Bouscayrol, L. Boulon, "Flexible simulation of an electric vehicle to estimate the impact of thermal comfort on the energy consumption", IEEE transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no.2, pp. 2288-2298, 2022, [doi](#)
- E. Rivière, A. Sari, P. Venet, F. Meniere, Y. Buttel, "Innovative incremental capacity analysis implementation for C/LiFePO4 cell state-of-health estimation in electrical vehicles", Batteries, vol. 5(2), no. 37, April 2019, [doi](#)
- A. Sari, D. Hissel, C. Espanet, "Particles swarms optimization applied to the co-design of the fuel cell air circuit", Journal of Power Sources, vol. 179, no. 1, 2008, pp. 121-131, [doi](#)
- A. Sari, D. Hissel, C. Espanet, "Simultaneous optimal design of control and geometry of a fuel cell system motor compressor group", Second Conference on Simulation and Multidisciplinary Design Optimization (JOPTI 2006), ASMDO, Belfort (France), May 2006
- W. Wheeler, P. Venet, Y. Bultel, A. Sari, E. Rivière, "Aging in first and second life of a G/LFP 18650 cell: diagnosis and evolution of the state of health of the cell and the negative electrode under cycling", Journal Batteries, vol. 10(4), no. 137, 2024, [doi](#)