

Sujet de Thèse : Stratégie de contrôle optimale, prédictive et adaptative pour véhicule équipé d'un système pile à combustible modulaire

Encadrement

Directeur de thèse : Christophe Turpin ¹.

Encadrants industriels : Paul Boucharel ², Jérôme Lachaise², Ludovic Landry².

¹. INP Toulouse - Laboratoire Laplace

². Vitesco Technologies France

Mot clés

Contrôle optimal multicritères, Pile à Combustible, Vieillessement.

Contexte et enjeux industriels

De manière à satisfaire à des exigences de plus en plus strictes en termes d'émissions CO₂, la pile à combustible est considérée comme une technologie prometteuse pour la décarbonisation des véhicules commerciaux utilitaires, bus et poids lourds à court et moyen terme et des véhicules particuliers à plus long terme.

Actuellement les bus des transports publics sont l'une des applications des systèmes piles à combustible les plus largement adoptées. Cela est dû au fait que la plupart d'entre eux sont exploités par le secteur public, ainsi qu'à des modèles d'exploitation planifiés et prévisibles ^[1]. Les bus ont généralement des itinéraires réguliers, ce qui nécessite peu de stations de ravitaillement. En outre, les exploitants d'autobus sont fortement influencés par les mesures prises par les autorités publiques, ce qui pousse à l'utilisation de cette technologie. Des activités entourent le déploiement de camions légers et moyens dans les principaux marchés étudiés (*Chine, Europe & Etats-Unis*), ce qui offre une comparaison intéressante avec les autobus car la plupart de ces déploiements sont exploités par le secteur privé bien qu'avec l'appui des gouvernements ^[2]. Le transport de marchandises, qui représente une grande partie du flux de trafic total dans les zones urbaines (*de 8 à 15 % en Europe*), fait de la technologie piles à combustible un moyen très prometteur pour réduire les émissions polluantes et sonores dans les zones urbaines ^[3]. Dans un avenir proche on peut donc s'attendre à ce que l'application des camions légers et moyens équipés des systèmes piles à combustible continue de croître dans la logistique urbaine et interurbaine. Le déploiement à des poids lourds est relativement en retard par rapport aux autres applications de la logistique. La plupart des grands équipementiers en sont au stade de la R&D, et seuls quelques produits ont été lancés ou sont en cours d'essai ^[4]. Ce déploiement relativement lent des applications poids lourds peut être attribué à la combinaison du coût élevé du véhicule, du coût élevé de l'hydrogène (*pour transporter des charges lourdes sur de longues distances*) et de l'infrastructure de ravitaillement limitée ^[5,6].

La technologie des systèmes pile à combustible devenant de plus en plus mature et optimisée pour les applications lourdes en offrant une autonomie et un temps de ravitaillement proches de ceux des

véhicules classiques et en bénéficiant d'émissions nulles ^[7], elle devrait également s'imposer à moyen terme pour les poids lourds diesel et électriques à batterie.

Malgré des temps de ravitaillement en hydrogène plus rapides que les véhicules électriques à batterie, une autonomie importante, l'absence d'émissions polluantes localement et le recyclage à près de 100 % des technologies hydrogène, l'adoption généralisée des véhicules équipés d'un système pile à combustible se heurte à des difficultés. Premièrement, le **coût de ces véhicules** et le **prix de l'hydrogène** restent élevés par rapport aux véhicules conventionnels et aux combustibles fossiles ^[11]. Des études montrent qu'en 2019 les véhicules équipés d'un système pile à combustible sont environ 40 % plus chers que les véhicules électriques à batterie et environ 90 % plus chers que les véhicules conventionnels sur une base de 100 km ^[3]. La façon de produire l'hydrogène est l'élément déterminant pour obtenir un carburant décarboné et compétitif : l'hydrogène gris (*issu des énergies fossiles*) revient à environ 1.5 euro par kilogramme en Europe quand l'hydrogène vert (*issu d'électricité bas carbone, renouvelable*) revient à environ 5 à 6 euros par kilogramme. Deuxièmement, même si la technologie gagne en maturité pour les différentes applications, la **durabilité des systèmes pile à combustible** est le principal verrou technologique par rapport à la durée de vie de moteurs à combustion interne. Aujourd'hui la durée de vie d'un système pile à combustible est estimée entre 10.000 et 20.000 heures selon la technologie de la pile à combustible (*plaques bipolaires en métallique ou en graphite composite*) mais elle devrait s'améliorer de manière significative dans un avenir proche. La durée de vie pour les véhicules de tourisme à moteur à combustion est d'environ 8.000 heures et d'environ 40.000 heures pour les applications poids lourds. En comparaison, la technologie à batterie présente aujourd'hui trois inconvénients importants dans les applications longue distance que sont : leur autonomie qui reste limitée et dépend grandement des conditions de circulation et des éléments extérieurs (*température, type de route*), la réduction de la charge utile du fait de l'augmentation du poids des véhicules et l'augmentation des temps d'arrêt du fait des temps de charge batterie. Ainsi, compte tenu des avantages potentiels relatifs à la technologie des systèmes piles à combustible (*densité d'énergie stockée, utilisation et ravitaillement*), les premières applications grandes échelles devraient être les véhicules utilitaires, les autobus et les poids lourds ^[12].

Il est également intéressant de souligner que même si les avantages qualitatifs des systèmes pile à combustible ne sont pas pris en compte, des analyses du coût total de possession (TCO) montrent des résultats cohérents et très encourageants ^[3]. Les véhicules équipés d'un système pile à combustible devraient devenir moins cher d'un point de vue du coût TCO au cours des dix prochaines années sur l'ensemble des applications. Cette situation peut s'expliquer par la baisse des coûts de construction des véhicules à mesure que la technologie évolue, les économies d'échelle qui s'améliorent, ainsi que par d'autres facteurs tels que le coût de l'hydrogène, les infrastructures, etc. Les composants auxiliaires (*hors système de stockage*) et l'électronique de contrôle associée représentant près de 45 % du coût total d'un système pile à combustible, Vitesco Technologies travaille actuellement sur une approche modulaire permettant de couvrir les puissances demandées par les véhicules commerciaux et les véhicules de tourisme en assemblant un ou plusieurs modules élémentaires de piles à combustible.

En conclusion, les obstacles liés à la durabilité du système pile à combustible restent une préoccupation majeure pour une adoption à grande échelle de cette technologie. La dégradation des performances dépendant principalement des défaillances rencontrées lors de l'utilisation du système pile à combustible, des mécanismes d'identification des facteurs de vieillissement, de diagnostic des défaillances et/ou de prédiction du vieillissement doivent être intégrés aux stratégies de contrôle.

Contexte scientifique, technique et industriel

Vitesco Technologies est intéressée d'abord par une démarche de recherche appliquée permettant d'améliorer les lois de commande optimale existants dans son portefeuille de produits. À ce jour, ces lois de commande sont essentiellement constituées d'approches à base de règle sur les véhicules de série, et à base de commande optimale avancée (*Dynamic Programming, Principe du Maximum de Pontryagin*) sur des véhicules de démonstration mais aucune de ces lois ne prend en compte une architecture modulaire et le vieillissement du système.

L'objectif de ce travail de recherche est de proposer une loi de gestion d'énergie au niveau véhicule permettant d'optimiser la répartition de puissance entre la batterie et le ou les module(s) du système pile à combustible pour minimiser la consommation d'hydrogène et le vieillissement du ou des modules pile à combustible et de la batterie. La dynamique de la réalisation de la demande en puissance ainsi que le positionnement des points de fonctionnements en pression et/ou en stœchiométrie pouvant impacter fortement le vieillissement, ils devront être pris en compte et maîtrisés.

Environnement et ressources

Ce travail de thèse est encadré par le laboratoire **LAPLACE** dans le cadre du projet CORAM ECH2 avec des partenaires académiques et industriels clés dans le domaine des piles à combustible.

- Le **laboratoire LAPLACE** : acteur académique avec plus de 20 ans d'expérience dans la recherche dans la modélisation et la caractérisation des performances et du vieillissement des piles à combustible de type PEM basse température via la plateforme Hydrogène.

Références

- [01] - IEA-RETD, Non-individual transport – Paving the way for renewable power-to-gas (RE-P2G). Available from: <http://iea-retd.org/wp-content/uploads/2016/07/201607-IEA-RETD-RE-P2G-final-report.pdf>
- [02] - The Business Case for Fuel Cells: Delivering Sustainable Value (130)
- [03] - Fueling the Future of Mobility: Hydrogen and fuel cell solution for transportation, Vol1.
- [04] - H2-share, Project archive. Available from: <https://fuelcelltrucks.eu/project/>
- [05] - Jon Leonard, Hydrogen Fuel Cell Future Is Promising for Heavy-Duty Trucks. Available from: <https://www.act-news.com/news/hydrogen-fuel-cell-vehicles/>
- [06] - Transitioning to Zero-emission heavy-duty freight vehicles
- [07] - Vishnu Rajamanickam, IAA 2018: Hyundai signs MoU for producing heavy-duty fuel cell electric trucks. Available from: <https://www.freightwaves.com/news/technology/hyundai-hydrogen-fuel-cell-iaa-2018>
- [08] - fuelcellsworks, clevershuttle-and-toyota-achieve-1000000-kilometers-hydrogen-fuel-cell-milestone. Available from: <https://fuelcellsworks.com/news/clevershuttle-and-toyota-achieve-1000000-kilometers-hydrogen-fuel-cell-milestone/>
- [09] - HYUNDAI website, Fuel cell model. Available from: <https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx>
- [10] - Yoko Kubota, Toyota's Fuel-Cell Car Mirai Goes on Sale. Available from: <https://blogs.wsj.com/japanrealtime/2014/12/15/toyotas-fuel-cell-powered-mirai-hitsshowrooms/>
- [11] - Leslie Eudy and Matthew Post, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2018
- [12] - FEV Webinars: FEV Future Truck Series June – July 2020. Available from <https://fev-live.com/webinars>