

## OFFRE DE THESE

# *Optimisation conjointe des freinages électrique et mécanique des véhicules électriques*

<b>Laboratoire(s) d'accueil</b>	<i>L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance)</i>
<b>Directeur de thèse (HDR), co-encadrant(s)</b>	<i>Walter LHOMME, Maître de Conférences HdR, L2EP Jean-François BRUNEL, Maître de Conférences HdR, LaMcube</i>
<b>Spécialité du doctorat (discipline)</b>	<i>Génie électrique Mécanique</i>
<b>Université d'inscription</b>	<i>Université de Lille</i>
<b>Ecole doctorale</b>	<i>Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (ENGSYS)</i>
<b>Cofinanceur(s)</b>	<i>Région Hauts-de-France / ADEME</i>

### Contexte scientifique

Face aux défis des transitions énergétiques, de la décarbonation et de la réduction des nuisances, les véhicules électriques ont pour avantage de n'émettre aucune émission de dioxyde de carbone durant leur utilisation. Ils sont en revanche, comme leurs équivalents thermiques, émetteurs de nuisances vibratoires et sonores – de type crissement ou grincement – et de particules fines et COV (composés organiques volatils), ayant un impact sur la santé humaine. Les sources de ces nuisances sont multiples : usure des pneumatiques et des routes, usure des composants du système de freinage à friction mécanique, particulièrement le disque et les garnitures de frein [Timmers 18]. On estime que les émissions des freins représentent 21 % et que leur contribution augmente considérablement à certains endroits spécifiques en bordure de route, où le trafic est intense et perturbé [Amato 18]. La récupération d'énergie au freinage des véhicules électriques, au travers de la motorisation électrique, permet toutefois de diminuer les émissions générées par les freins. L'usage du frein mécanique n'est alors qu'utilisé que pour de fortes décélérations et à basse vitesse, zone pour laquelle le freinage électrique est énergétiquement inefficace. Cette faible utilisation pourrait faire croire à une meilleure longévité du système de freinage mécanique. Toutefois, elle modifie les phénomènes tribologiques à l'interface pouvant entraîner l'apparition de bruit et de vibration [Shin 10]. L'usage démontre que les conducteurs y sont plus sensibles pour le véhicule électrique que pour son homologue thermique, et ce, en raison du faible niveau sonore de la motorisation électrique. Concernant les émissions de particules, celles si sont effectivement réduites et sont variables selon le pourcentage d'utilisation du freinage régénératif principalement en lien avec la masse du véhicule, la vitesse et du type de conduite [Hicks 23]. Des études récentes montrent néanmoins que les émissions de particules fines peuvent rester à des niveaux similaires que ceux sur véhicules thermiques, principalement en raison de l'augmentation du poids et des performances de ces véhicules [Bondorf 23].

Dans la littérature, différentes solutions sont étudiées pour pallier à cette problématique. La majorité d'entre elles consiste à améliorer les matériaux ou en utiliser de nouveaux pour les disques et les garnitures de frein. Un traitement de surface sur les disques est par exemple proposé pour éviter les phénomènes de bruit et de vibration [Awe 19]. D'autres auteurs proposent d'agir directement sur la stratégie de commande pour agir sur la modification des phénomènes tribologiques [Jang 19]. L'étude s'attaque aux phénomènes acoustiques sans prendre en compte les émissions de particules fines. La réduction couplée de la consommation d'énergie et des émissions qu'elles soient sonores et particulières, émises par des freins est donc à étudier. Les récents travaux du L2EP et du LaMcube tendent à montrer qu'une optimisation de la stratégie de freinage globale au niveau du véhicule électrique est possible, visant à maximiser la récupération d'énergie au freinage et à réduire les émissions sonores et de particules fines offrant ainsi une nouvelle piste complémentaire aux développements de matériaux de friction ou traitement de surface.

### Objectifs

L'objectif de la thèse sera ainsi de s'attaquer à la réduction couplée de la consommation d'énergie et des émissions des véhicules en posant les bases d'une modélisation multidisciplinaire et en considérant dans un premier temps la combinaison des fonctions traction et freinage. Dans ce cadre, le formalisme REM (Représentation Energétique Macroscopique) pourra apporter une contribution significative dans ce travail

collaboratif tel que la facilitation des dialogues entre les différentes disciplines [Lhomme 14]. Un travail important devra être mené pour introduire la partie du freinage mécanique au sein des simulateurs énergétiques des véhicules électriques étudiés en utilisant le formalisme REM. L'impact des cycles routiers autour de la région Lilloise sur l'efficacité de la stratégie de commande proposée pourra ainsi être étudié pour être confronté aux cycles normalisés. La stratégie de commande devra également être modulaire pour s'adapter aux divers segments automobiles permettant de prendre en compte notamment la masse du véhicule. L'impact de l'allègement des véhicules routiers (lightweighting) pourra ainsi être étudié

## Méthodologie

La stratégie reposera sur une modélisation multidisciplinaire couplée des sous-systèmes électriques et mécaniques par une analyse systémique dans le cadre d'une étude globale au travers du formalisme REM. Les effets d'échelles de ces sous-systèmes et leurs outils d'études étant très différents, un travail spécifique devra être mené pour un couplage efficace et représentatif. La mise en modèle présente des difficultés importantes concernant notamment les émissions, qu'il faudra enrichir à l'aide d'expérimentations dédiées. Des tests avec mesures de particules et bruits sur banc de freinage seront ainsi menés sur la plateforme 4Maat du LaMcube, et ce, afin d'identifier des situations tribologiques fortement émettrices ou faiblement émettrices. Les données seront recueillies sur les véhicules électriques de la plateforme eV du L2EP. Une stratégie multi-objective sera ensuite développée pour proposer un pré-conditionnement de la situation tribologique pour la rendre la plus faiblement émettrice lors de la prochaine sollicitation de freinage tout en optimisant la récupération d'énergie. Un positionnement de ce pilotage intelligent se fera au travers de la simulation du comportement de plusieurs véhicules électriques avec et sans la stratégie multi-objective. Une comparaison pour différents segments de véhicules (léger, lourd) et le type d'utilisation du véhicule (urbain, semi-urbain, ultra-urbain) sera également analysée. Des pistes d'amélioration sur le système de freinage mécanique seront également étudiées tant sur l'aspect émissivité que sur l'aspect sécurité.

## Bibliographie

- [Amato\_18] F. Amato (Ed.), Non Exhaust Emissions: an Urban Air Quality Problem for Public Health, San Diego Academic Press, Elsevier (2018).
- [Awe 19] S. A. Awe, "Developing material requirements for automotive brake disc", Modern Concepts in Material Science, Nov. 2019, vol. 2, pp. 1-4, [doi](#)
- [Bondorf 23] L. Bondorf, L. Köhler, T. Grein, F. Epple, F. Philipps, M. Aigner, T. Schripp, "Airborne brake wear emissions from a battery electric vehicle", Atmosphere, 2023, vol. 14, no. 488, [doi](#)
- [Hicks 23] W. Hicks, D. C. Green, S. Beevers, "Quantifying the change of brake wear particulate matter emissions through powertrain electrification in passenger vehicles", Environmental Pollution, 2023, vol. 336, no. 122400, [doi](#)
- [Lhomme 14] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, P. Barrade, "La REM, formalisme multi-physique de commande de systèmes énergétiques", Techniques de l'Ingénieur, 2014, no. D3066, pp. 1-28, [doi](#)
- [Jang 19] S. Jang, G. Kim, "Development of regenerative brake control strategy to remove brake rust", SAE Technical Paper, 2019-01-2125, 2019, [doi](#)
- [Shin 10] M. W. Shin, K. H. Cho, S. J. Kim, H. Jang, "Friction instability induced by corrosion of gray iron brake discs", Tribology Letters, 2010, vol. 37, pp. 149-157, [doi](#)
- [Timmers 18] V. R. J. H. Timmers, P. A. J. Achten, "Chapter 12 - Non-Exhaust PM Emissions From Battery Electric Vehicles", editor: Fulvio Amato, Non-Exhaust Emissions, Academic Press, 2018, pp. 261-287, [doi](#)

**Contact et dépôt des candidatures** (avec CV, lettre de motivation, relevés de notes, lettres de recommandation, etc.)

[walter.lhomme@univ-lille.fr](mailto:walter.lhomme@univ-lille.fr), [jean-francois.brunel@univ-lille.fr](mailto:jean-francois.brunel@univ-lille.fr)

## ENGLISH VERSION

### Scientific context

Faced with the challenges of energy transition, decarbonisation and reducing pollution, electric vehicles have the advantage of emitting no carbon dioxide during use. On the other hand, like the thermal vehicles, they do emit vibration and noise - such as squeaking or creaking - as well as fine particles and VOCs (volatile organic compounds), which have an impact on human health. There are many sources of these emissions: wear and tear on tyres and roads, and wear and tear on the components of the mechanical friction braking system, particularly the brake disc and linings [Timmers 18]. Brake emissions are estimated to account for 21% and their contribution increases considerably at specific roadside locations where traffic is intense and disrupted [Amato 18]. However, the recovery of braking energy in electric vehicles, through the use of electric machines, makes it possible to reduce the emissions generated by brakes. Mechanical braking is only used for heavy deceleration and at low speeds, where electric braking is energetically inefficient. This low level of use could lead us to believe that the mechanical braking system has a longer service life. However, it modifies the tribological phenomena at the interface, which can lead to noise and vibration [Shin 10]. Experience shows that drivers are more sensitive to this for electric vehicles than for their internal combustion counterparts, due to the low noise level of the electric motor. Particulate emissions are effectively reduced and vary according to the percentage of regenerative braking used, mainly in relation to vehicle mass, speed and driving style [Hicks 23]. However, recent studies show that fine particle emissions can remain at levels similar to those of thermal vehicles, mainly due to the increased weight and performance of these vehicles [Bondorf 23].

Various solutions have been studied in the literature to overcome this problem. Most of them consist of improving materials or using new ones - for brake discs and linings. For example, surface treatment of discs has been proposed to prevent noise and vibration [Awe 19]. Other authors propose to act directly on the control strategy to modify tribological phenomena [Jang 19]. The study tackles acoustic phenomena without taking fine particle emissions into account. The coupled reduction of energy consumption and emissions, both acoustic and particulate, emitted by brakes should therefore be studied. Recent works at L2EP and LaMcube tend to show that it is possible to optimise the overall braking strategy for electric vehicles, with the aim of maximising the recovery of braking energy and reducing noise and fine particle emissions, thus offering a new avenue that complements the development of friction materials or surface treatments.

### Objectives

The aim of the thesis will be to tackle the coupled reduction of vehicle energy consumption and emissions by laying the foundations for multidisciplinary modelling and by initially considering the combination of the traction and braking functions. In this context, the EMR (Energetic Macroscopic Representation) formalism could make a significant contribution to this collaborative work, such as facilitating dialogue between the different disciplines [Lhomme 14]. Significant work will have to be carried out to introduce mechanical braking into the energy simulators of the electric vehicles studied, using the EMR formalism. The impact of road cycles around the Lille region on the efficiency of the proposed control strategy could thus be studied and compared with standard cycles. The control strategy will also need to be modular in order to adapt to the various vehicle segments, so that vehicle mass in particular can be taken into account. The impact of lightweighting on road vehicles can also be studied.

### Methodology

The strategy will be based on coupled multidisciplinary modelling of electrical and mechanical sub-systems using a systemic analysis as part of an overall study using the EMR formalism. As the scale effects of these subsystems and their study tools are very different, specific work will have to be carried out to ensure effective and representative coupling. The implementation of the model presents major difficulties, particularly with regard to emissions, which will have to be improved with the help of dedicated experiments. Tests with particle and noise measurements on a braking bench will therefore be carried out on LaMcube's 4Maat platform, in order to identify tribological situations with high or low emissions. The data will be collected on electric vehicles on the eV platform at L2EP. A multi-objective strategy will then be developed to propose pre-conditioning of the tribological situation to make it as low-emission as possible during the next braking stress, while optimising energy recovery. This intelligent control will be positioned by simulating the behaviour of several electric vehicles with and without the multi-objective strategy. A comparison for different vehicle segments (light, heavy) and the type of vehicle use (urban, semi-urban, ultra-urban) will also be analysed. Possible improvements to the mechanical braking system will also be studied in terms of both emissions and safety.