

<b>Titre Thèse</b>	<b>Modélisation HF des chaînes de conversion pour la conception CEM de réseaux embarqués</b>	
<b>Title</b>	<b>HF modeling of conversion chains for EMC design of embedded networks</b>	
<b>Directeur</b>	<b>Nadir IDIR</b>	E-mail : <a href="mailto:nadir.idir@univ-lille.fr">nadir.idir@univ-lille.fr</a>
<b>(Co)-Directeur</b>		E-mail :
<b>Encadrant</b>	<b>Arnaud VIDET</b>	E-mail : <a href="mailto:arnaud.videt@univ-lille.fr">arnaud.videt@univ-lille.fr</a>
<b>Laboratoire</b>	<b>L2EP</b>	Web : <a href="http://l2ep.univ-lille.fr">l2ep.univ-lille.fr</a>
<b>Groupe</b>	<b>Électronique de Puissance</b>	Web :
<b>Financement demandé</b>	Contrat Doctoral Etablissement	ULille <input checked="" type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> Yncrea <input type="checkbox"/>
	Région – Autre <input type="checkbox"/> Préciser :	Co-financement acquis Oui / non <input type="checkbox"/> Préciser :
<b>Financement acquis ?</b> <input type="checkbox"/>	Contrats de Recherche <input type="checkbox"/>	Autre <input type="checkbox"/>
<b>Financement partiellement acquis ?</b> <input type="checkbox"/>	Préciser :	Préciser :

### Contexte

L'énergie électrique transite par des convertisseurs électroniques qui assurent la gestion et les transferts de puissance dans de nombreuses applications telles que la production d'énergie d'origine renouvelable (solaire, éolien), la recharge de batteries (véhicules électriques, appareils mobiles), les alimentations secourues (data centers), le contrôle d'actionneurs et l'alimentation des moteurs électriques (transport, industrie, domestique). Ces convertisseurs de puissance occupent une place de plus en plus importante dans les systèmes électriques et répondent à des besoins toujours croissants de compacité, en particulier dans les applications embarquées (automobile, avionique) dans lesquelles la puissance électrique installée tend à augmenter tandis que la masse et l'encombrement doivent être réduits.

La densité de puissance des convertisseurs est alors un objectif clé lors de leur conception. Les avancées technologiques récentes dans les composants de puissance actifs ont permis d'augmenter, à la fois, le rendement énergétique des convertisseurs (autorisant notamment des systèmes de refroidissement plus compacts), et leur fréquence interne de fonctionnement (permettant l'emploi de composants passifs plus petits). Dans les applications embarquées comme dans l'exemple automobile, ces bénéfices se traduisent directement par un gain à la fois d'espace et d'autonomie. Néanmoins, le fonctionnement à haute fréquence (HF) et les faibles temps de commutation associés sont inévitablement liés à la génération de perturbations électromagnétiques (PEM), notamment sous la forme de courants HF indésirables se propageant dans l'ensemble du système de conversion et susceptibles d'altérer sa sûreté de fonctionnement. Des dispositifs additionnels d'atténuation des perturbations sont alors nécessaires, occasionnant un surcoût conséquent et un encombrement accru qui est limitant quant aux objectifs de densité de puissance.

Dans ce contexte, la maîtrise du comportement HF des convertisseurs et de leur impact sur l'ensemble de l'installation électrique constitue un enjeu majeur pour l'électrification croissante des systèmes embarqués. Il est alors primordial de veiller, dès la phase de conception, à l'évaluation prédictive des perturbations HF en s'appuyant sur des outils logiciels et méthodes de modélisation dédiées, à la réduction à la source de ces perturbations par des architectures de conversion et techniques de commande adaptées, et à leur confinement par des dispositifs de filtrage qui doivent être conçus de manière optimale en fonction des caractéristiques électriques des équipements connectés au réseau de bord.

### Objectifs

Les travaux de recherche de l'équipe électronique de puissance du L2EP suivent un objectif de conception de convertisseurs statiques compacts et fonctionnant à haute fréquence, afin d'augmenter la densité de puissance des systèmes de conversion d'énergie tout en maîtrisant les perturbations HF générées par les commutations rapides des composants de puissance à base de matériaux semi-conducteurs SiC et GaN. Une contrainte notable sur les perturbations émises est alors le respect des normes de compatibilité électromagnétique (CEM). À cet effet, des techniques de caractérisation et de modélisation ont été développées pour les technologies récentes de composants GaN de puissance, qui constituent une source majeure d'émissions HF, en incluant des études d'impact des connexions sur circuit imprimé [1-4]. La conception par optimisation de composants passifs a été développée pour des bobines de lissage intégrées sur PCB [5] et pour les filtres HF dédiés à la

CEM [6], incluant des modèles à large bande représentatifs des couplages parasites à haute fréquence [7]. En y associant les câbles d'énergie [8] et la prise en compte des équipements de mesure CEM [9], la combinaison de ces modèles permet de prédire les niveaux des émissions HF dans une démarche de prototypage virtuel et d'estimer l'impact de différentes structures de conversion avec leur loi de commande [10]. Enfin, des méthodes de simulation ont été proposées pour réduire les temps de calcul [11, 12] et permettre des optimisations à l'échelle d'une chaîne de conversion source/convertisseur/charge.

Dans la continuité de ces travaux, l'objectif de ce sujet de thèse est d'étendre la démarche de modélisation HF et de conception pour la CEM à l'échelle d'un réseau embarqué de type automobile (Fig. 1), dans le but de prédire les niveaux de perturbations HF à différents lieux d'intérêt et d'optimiser les dispositifs d'atténuation en tenant compte du comportement HF des équipements situés en amont et en aval. Ce travail de recherche vise ainsi à faire progresser la démarche de prototypage virtuel en CEM, et permettra notamment d'évaluer l'impact des paramètres de conception ou de commande des convertisseurs sur le comportement HF du système complet, avec une large plage de validité en fréquence. Des méthodes d'optimisation adaptées pourront alors être développées pour satisfaire aux exigences normatives en réduisant le coût et le volume des composants de filtrage. Les résultats issus de cette thèse seront validés par comparaison avec des mesures expérimentales réalisées sur un banc de test dédié. Les travaux s'appuieront naturellement sur l'expertise précédemment acquise au laboratoire L2EP, et permettront le développement de méthodes et d'outils spécifiques pour la porter à un niveau système plus complet et répondant aux challenges actuels rencontrés dans la conception des systèmes électriques embarqués.

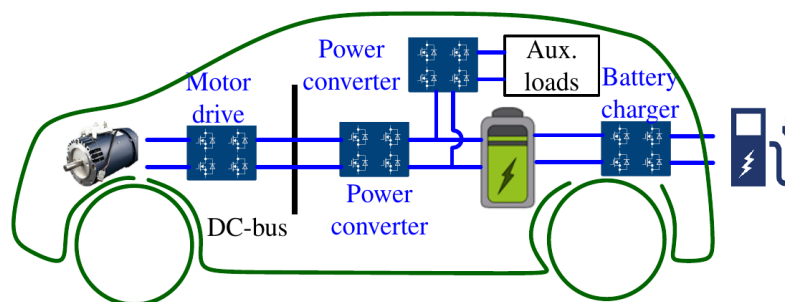


FIG. 1: Convertisseurs de puissance dans un réseau de bord d'un véhicule électrique [13]

## Context

Electrical energy is managed by power electronics converters that ensure power transfer in many applications such as renewable energy production (photovoltaics, wind turbines), battery charging (electric vehicles, mobile devices), uninterruptible power supplies (data centers), actuator control and electric motor drives (transportation, industry, home appliances). These power converters are more and more widespread in electrical systems and must comply with ever-increasing needs for compactness, in particular in embedded applications (automotive, avionics) in which the installed electrical power tends to increase while the mass and volume should be kept minimal.

High power density is therefore a key design objective of power converters. Recent technological advances in active power components have made it possible to increase both the energy efficiency of converters (notably allowing more compact cooling systems) and their internal operating frequency (allowing the use of smaller passive components). In embedded applications such as in the automotive example, these advantages directly translate into increased available space and autonomy. However, high frequency (HF) operation and associated fast switching transients are source of electromagnetic interferences (EMI), and notably undesired HF currents propagating throughout the conversion system, which possibly impairs its reliability. Thus, additional EMI attenuation devices are necessary, involving substantial extra cost and increased volume that limits the expected power density objectives.

In this context, controlling the HF behavior of converters and their impact on the whole electrical installation is a major challenge for the ever-growing electrification of embedded systems. Predictive evaluation of EMI is therefore an essential goal at the design stage, using dedicated software tools and modeling methods. Other key points are EMI mitigation from source through proper conversion topology and adapted control techniques, and optimal design of EMI-filtering devices according to the HF electrical characteristics of the equipments connected to the on-board network.

## Objectives

The research work of the L2EP Power Electronics team aims at designing compact static converters that operate at high frequency, in order to increase the power density of energy conversion systems while mitigating the EMI generated by fast switching of power components based on SiC and GaN semiconductor materials. Notably, compliance with electromagnetic compatibility (EMC) standards is an important design constraint. To this end, characterization and modeling techniques have been developed for recent GaN-based power devices, that constitute a major source of HF emissions, along with the assessment of the impact of printed-circuit-board connections [1-4]. The design by optimization of passive components has been developed for PCB-integrated smoothing inductors [5] and for EMI filters [6], including wideband models taking into account HF parasitic couplings [7]. By associating power cables [8] and taking into account EMI measurement equipment [9], the combination of these models makes it possible to predict the levels of HF emissions in a virtual prototyping approach and to estimate the impact of different conversion structures and their control law [10]. Finally, simulation methods have been proposed to reduce computation times [11, 12] and allow optimizations at the scale of a source/converter/load conversion chain.

As a follow-up of the preceding research, the objective of this thesis proposal is to extend the HF modeling and EMC design approach to the scale of an automotive-type on-board network (Fig. 1), in order to predict the levels of HF emissions at different places of interest and to optimize the attenuation devices taking into account the HF behavior of the equipment located upstream and downstream. Thus, this research work aims at advancing the EMC virtual prototyping approach, and will notably make it possible to evaluate the impact of converter design or control parameters on the HF behavior of the complete system, with a wide frequency range of validity. Appropriate optimization methods can then be developed to meet applicable EMC standards by reducing the cost and volume of filtering components. The results from this thesis will be validated by comparison with experimental measurements carried out on a dedicated test bench. The work will naturally rely on the expertise previously acquired at the L2EP laboratory, and will allow the development of specific methods and tools to bring it to a more complete system level and respond to the current challenges encountered in the design of embedded electrical systems.

---

## References:

- [1] L. Pace, N. Defrance, A. Videt, N. Idir, J. . De Jaeger, and V. Avramovic, "Extraction of packaged GaN power transistors parasitics using S-parameters," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 66, no. 6, pp. 2583–2588, June 2019.
- [2] F. Salomez, S. Vienot, B. Zaidi, A. Videt, T. Duquesne, H. Pichon, E. Semail, and N. Idir, "Design of an integrated GaN inverter into a multiphase PMSM," in *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2020, pp. 1–6.
- [3] A. Videt, K. Li, N. Idir, P. Evans, and M. Johnson, "Analysis of GaN converter circuit stability influenced by current collapse effect," in *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, March 2020, pp. 2570–2576.
- [4] K. Li, P. L. Evans, C. M. Johnson, A. Videt, and N. Idir, "A GaN-HEMT compact model including dynamic R<sub>dson</sub> effect for power electronics converters," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021.
- [5] A. Chafi, N. Idir, A. Videt, and H. Maher, "Design method of PCB inductors for high-frequency GaN converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 805–814, Jan 2021.
- [6] B. Zaidi, A. Videt, and N. Idir, "Optimization method of CM inductor volume taking into account the magnetic core saturation issues," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 5, pp. 4279–4291, May 2019.
- [7] F. Salomez, A. Videt, and N. Idir, "Modelling and minimization of the parasitic capacitance of ring core inductors," in *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, 2021, pp. 1–10.
- [8] C. Marlier, A. Videt, and N. Idir, "NIF-based frequency-domain modeling method of three-wire shielded energy cables for EMC simulation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 1, pp. 145–155, Feb 2015.
- [9] S. Vienot, A. Videt, N. Idir, L. Koné, S. Weiss, and F. Lafon, "Modélisation du récepteur de mesure en détection crête, quasi-crête et moyenne pour la simulation des émissions conduites en large bande," in *Colloque International et Exposition sur la compatibilité Electromagnétique (CEM 2020)*, 4 2020.
- [10] A. Videt, M. Messaoudi, N. Idir, H. Boulharts, and H. Vang, "PWM strategy for the cancellation of common-mode voltage generated by three-phase back-to-back inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2675–2686, April 2017.
- [11] C. Marlier, A. Videt, N. Idir, H. Moussa, and R. Meuret, "Modeling of switching transients for frequency-domain EMC analysis of power converters," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, Sept 2012.
- [12] S. Vienot, A. Videt, N. Idir, L. Kone, S. Weiss, and F. Lafon, "Frequency-domain simulation of power electronic systems based on multi-topology equivalent sources modelling method," in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, Sep. 2020, pp. P.1–P.10.
- [13] K. Li, A. Videt, N. Idir, P. Evans, and M. Johnson, "Experimental investigation of GaN transistor current collapse on power converter efficiency for electrical vehicles," in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Oct 2019, pp. 1–6.