

## Modélisation HF de convertisseurs de puissance pour l'analyse CEM en phase de conception

### *High-frequency modeling of power converters for design-stage EMC analysis*

---

Début   <i>Start</i> :	09/2025
Laboratoire   <i>Laboratory</i> :	L2EP – <a href="https://l2ep.univ-lille.fr/en/">https://l2ep.univ-lille.fr/en/</a>
Équipe   <i>Team</i> :	Électronique de Puissance   <i>Power Electronics</i>
Lieu de travail   <i>Location</i> :	Campus Cité Scientifique, Université de Lille <a href="https://www.openstreetmap.org/#map=18/50.606850/3.137870">https://www.openstreetmap.org/#map=18/50.606850/3.137870</a>
Financement   <i>Funding</i> :	Contrat doctoral – Université de Lille
Candidature   <i>Application</i> :	CV, relevés de notes, lettre de motivation, lettres de recommandation éventuelles <i>CV, transcripts, motivation letter, recommendation letters if any</i>
Contacts   <i>Contacts</i> :	Arnaud VIDET (Directeur   <i>Supervisor</i> ) – <a href="mailto:arnaud.videt@univ-lille.fr">arnaud.videt@univ-lille.fr</a> Nadir IDIR (Co-directeur   <i>Co-supervisor</i> ) – <a href="mailto:nadir.idir@univ-lille.fr">nadir.idir@univ-lille.fr</a>

---

### Contexte | *Context*

L'énergie électrique transite par des convertisseurs statiques 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 de commutation (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 constitue un enjeu majeur dans les chaînes de conversion de puissance. 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. Les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) peuvent alors être respectées, d'une part, par la réduction à la source des PEM via l'élaboration de règles de conception, d'architectures de conversion ou de techniques de commande adaptées, et d'autre part, par le confinement des perturbations à l'aide de dispositifs de filtrage optimisés.

*Electrical energy is managed by power electronics converters that ensure power transfer in a broad range of applications such as renewable energy production (photovoltaic, wind power), battery chargers (electric vehicles, mobile devices), uninterruptible power supplies (data centers), actuator control and electric machines power supply (transportation, industry, home appliances). These power converters play an increasingly important role in electrical systems and must meet ever-increasing needs for compactness, particularly in on-board applications (automotive, avionics) where installed electrical power tends to increase while mass and size must be reduced.*

*High power density is then a key objective during the design stage 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 automotive, these advantages directly translate into increased available space and autonomy. However, high frequency (HF) operation and the associated short switching times are inevitably linked to the generation of electromagnetic interference (EMI), particularly in the form of unwanted HF currents propagating throughout the conversion system and likely to impair its operational safety. Additional interference mitigation devices are then necessary, causing significant additional cost and increased space requirements that are limiting with regard to power density objectives.*

*In this context, analyzing and improving the HF behavior of converters is a major challenge in power conversion chains. It is therefore essential to ensure, from the design phase, the predictive assessment of HF disturbances using dedicated software tools and modeling methods. Electromagnetic compatibility (EMC) standards can then be respected, on the one hand, by reducing EMI generation at source through the development of design rules, conversion architectures or suitable control techniques, and on the other hand, by confining disturbances using optimized filtering devices.*

## **Objectifs | Objectives**

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 SiC ou de GaN. Une contrainte notable sur les perturbations émises est alors le respect des normes 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 [1–5]. La conception par optimisation de composants passifs a été développée pour des bobines de lissage intégrées sur PCB [6] et pour les filtres HF dédiés à la CEM [7], incluant des modèles à large bande représentatifs des couplages parasites à haute fréquence [8]. En y associant les câbles d'énergie [9] et la prise en compte des équipements de mesure CEM [10], il devient envisageable de prédire finement les niveaux d'émission HF dans une démarche de prototypage virtuel de convertisseurs SiC ou GaN. La connaissance des PEM dès la phase de conception permettra notamment d'estimer l'impact de différentes structures de conversion avec leur loi de commande [11] et d'améliorer les méthodes de modélisation fréquentielle à faible temps de calcul [12–14] pour faciliter la mise en œuvre d'optimisations à l'échelle de chaînes de conversion alimentation/convertisseur/charge.

Le sujet de thèse proposé s'insère au cœur de ces activités sur le comportement HF des composants et systèmes de conversion. Il vise à la modélisation HF prédictive de convertisseurs de puissance en phase de conception en incluant la prise en compte d'effets parasites tels que les couplages inductifs et capacitifs via les circuits de commande des transistors ou les boîtiers métalliques, dont la contribution sur les PEM ne peut plus être négligée compte tenu des hautes vitesses de commutation des technologies récentes de composants rapides. Ce travail s'appuiera sur les savoir-faire du laboratoire précédemment évoqués, et développera de nouvelles méthodes de modélisation incluant des approches fréquentielles visant à augmenter la précision et la plage de validité tout en maîtrisant les temps de calcul, et intégrant des outils issus de l'intelligence artificielle pour aborder certaines difficultés liées notamment aux non-linéarités des commutations. Ce travail vise ainsi à faire progresser la démarche de prototypage virtuel pour l'électronique de puissance. Les méthodes développées seront validées expérimentalement sur des prototypes conçus au sein du laboratoire.

*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 [1–5]. The design by optimization of passive components has been developed for PCB-integrated smoothing inductors [6] and for EMI filters [7], including wideband models taking into account HF parasitic couplings [8]. By associating power cables [9] and taking into account EMI measurement equipment [10], 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 [11]. Finally, simulation methods have been proposed to reduce computation times [12–14] and allow optimizations at the scale of a power supply/converter/load conversion chain.

The proposed thesis topic is at the heart of these activities on the HF behavior of components and conversion systems. It aims at predictive HF modeling of power converters in the design stage by taking into account parasitic effects such as inductive and capacitive couplings via transistor control circuits or metal housings, whose contribution on EMI can no longer be neglected given the high switching speeds of recent component technologies. This work will build upon the aforementioned laboratory expertise, and will develop new modeling methods including frequency-domain approaches aimed at increasing accuracy and validity range with affordable calculation times, and integrating tools from artificial intelligence to address certain difficulties related notably to switching nonlinearities. This work thereby aims to advance the virtual prototyping approach in power electronics. The developed methods will be experimentally validated on prototypes designed within the laboratory.

## Références du laboratoire | L2EP 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  $R_{dson}$  effect for power electronics converters," *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021.
- [5] X. Lu, A. Videt, S. Faramehr, K. Li, V. Marsic, P. Igic, and N. Idir, "Impact of  $v_{th}$  instability of schottky-type p-gan gate hemts on switching behaviors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, no. 9, pp. 11 625–11 636, 2024.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] F. Salomez, A. Videt, and N. Idir, "Modeling and minimization of the parasitic capacitances of single-layer toroidal inductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 12 426–12 436, 2022.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] M. Singer, A. Videt, and N. Idir, "Robustness of frequency-domain terminal modeling of electromagnetic interferences in static converters," in *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2024, pp. 2304–2310.