

<b>Titre Thèse</b>  <b>Title</b>	<b>Modélisation à haute fréquence des convertisseurs d'électronique de puissance embarqués pour l'analyse CEM dans les applications automobiles</b>  <b>High-frequency modeling of embedded power electronics converters for EMC analysis in automotive applications</b>	
<b>Directeur</b>	IDIR Nadir	E-mail : <a href="mailto:nadir.idir@univ-lille.fr">nadir.idir@univ-lille.fr</a>
<b>(Co)-Directeur</b>	VIDET Arnaud	E-mail : <a href="mailto:arnaud.videt@univ-lille.fr">arnaud.videt@univ-lille.fr</a>
<b>Laboratoire</b>	L2EP	Web : <a href="http://l2ep.univ-lille.fr/">l2ep.univ-lille.fr/</a>
<b>Groupe(s)</b>	Equipe Electronique de Puissance	Web 1 : <a href="https://l2ep.univ-lille.fr/groupes-de-recherche/equipe-electronique-de-puissance/">https://l2ep.univ-lille.fr/groupes-de-recherche/equipe-electronique-de-puissance/</a>
<b>Financement demandé</b>	Contrat Doctoral Etablissement	ULille <input 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 checked="" type="checkbox"/> <b>Financement partiellement acquis ?</b> <input type="checkbox"/>	Contrats de Recherche <input checked="" type="checkbox"/> Préciser : IPCEI – VALEO	Autre <input type="checkbox"/> Préciser :

## Modélisation à haute fréquence des convertisseurs d'électronique de puissance embarqués pour l'analyse CEM dans les applications automobiles

### Contexte :

L'utilisation de convertisseurs d'électronique de puissance, dans le domaine de la mobilité électrique, s'est largement développée ces dernières années. Afin d'améliorer les performances électriques des convertisseurs embarqués, des composants rapides à base de matériaux semi-conducteurs à grand gap (SiC : Carbure de Silicium et GaN : Nitrure de Gallium) sont utilisés. Ces derniers permettent de fonctionner à des fréquences de commutation très élevées, ce qui a pour avantage une augmentation de la densité de puissance des convertisseurs (réduction du poids et du volume) mais comme inconvénient une augmentation des perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées. Afin de respecter les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes embarqués, il est nécessaire de réduire le niveau de ces perturbations en dessous des limites préconisées par ces normes. Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons principalement aux perturbations conduites générées par les convertisseurs statiques embarqués dans les véhicules. Il est bien connu que les convertisseurs statiques constituent la source principale des perturbations électromagnétiques conduites générées par les systèmes électriques embarqués. La commercialisation de ces systèmes est conditionnée, entre autres, par le respect des normes CEM. Cependant, la mise en conformité des convertisseurs d'énergie nécessite des évaluations CEM à différentes étapes allant de la conception jusqu'à la réalisation. Afin d'étudier les perturbations électromagnétiques conduites sur une large bande de fréquences, il est nécessaire de considérer une chaîne de conversion d'énergie composée d'une source d'alimentation de puissance, d'un convertisseur statique et d'une charge.

### Objectifs de la thèse :

Ce sujet de thèse entre dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe Electronique de Puissance du L2EP et l'entreprise VALEO. Il a pour objectif de développer des modèles qui seront utilisés dans des simulations afin de déterminer les niveaux de perturbations électromagnétiques générés par les systèmes d'électronique de puissance. Ces modèles permettent de décrire les sources de perturbations et les mécanismes de couplages à l'origine des émissions conduites. L'utilisation des outils de simulation permet de proposer des solutions de réduction de ces émissions. Afin d'atteindre cet objectif, l'approche scientifique est basée sur quatre étapes : caractérisation, modélisation, conception par simulation et validation expérimentale.

- Méthodes de caractérisation : développement de méthodes de caractérisation des composants actifs, passifs et de la connectique (fil, câble, piste...) de la chaîne de conversion. Pour cela, des équipements de mesure de type analyseur d'impédance ou d'analyseur de réseau vectoriel (VNA : Vector Network Analyzer) seront utilisés. Il est également possible de recourir à des logiciels de simulation (ADS, FastHenry...) pour déterminer les caractéristiques des conducteurs (Busbar, pistes...).
- Méthodes de modélisation : les résultats de caractérisation des différents composants de la chaîne de conversion, sur une large bande de fréquences, permettront la détermination des paramètres des modèles. Dans le cadre de ce travail de thèse, des modèles de type circuit électrique équivalent seront proposés. Ils sont bien adaptés aux logiciels de simulation de type circuit (SPICE, SIMetrix...) Nous nous intéressons dans ce projet principalement à la modélisation des composants de puissance qui fonctionnent en commutation.
- Conception par simulation : les modèles développés seront utilisés pour effectuer des simulations dans les domaines temporel et fréquentiel durant la phase de conception de la chaîne de conversion. L'utilisation des modèles non linéaires des composants semi-conducteurs de puissance en simulation dans le domaine temporel nécessite des temps de calcul exorbitants avec des risques de non-convergence des simulations. Afin de réduire les temps de calcul, nous effectuerons des simulations dans le domaine fréquentiel en utilisant la méthode de modélisation MTES (Multi-Topology Equivalent Sources) développée au L2EP.
- Validation expérimentale : afin de valider les résultats de simulations, il est nécessaire de développer un dispositif expérimental d'une chaîne de conversion proche des systèmes embarqués. Il est essentiel de valider dans un premier temps le modèle de la cellule de commutation qui constitue la source de perturbations électromagnétiques conduites. Un équipement de mesure des formes d'ondes des composants de puissance durant les commutations sera employé. Un oscilloscope utilisant des sondes de tension isolées par fibre optique, (sonde de tension Isovu) sera utilisé. Le but est d'isoler les différents potentiels du convertisseur de la terre de l'oscilloscope et éviter ainsi de perturber la mesure.

### High-frequency modeling of embedded power electronics converters for EMC analysis in automotive applications

#### Context:

The use of power electronics converters in electric mobility has grown considerably in recent years. To improve the electrical performance of on-board converters, fast components based on wide bandgap semiconductor materials like Silicon Carbide (SiC) and Gallium Nitride (GaN) are used. These components can operate at very high switching frequencies, which has the advantage of increasing the power density of converters (reducing weight and volume), but the disadvantage of increasing conducted and radiated electromagnetic interferences (EMI). In order to comply with electromagnetic compatibility (EMC) standards, it is necessary to reduce the level of such interference to below the limits recommended by these standards.

In this thesis, we focus on conducted interference generated by on-board static converters in vehicles. It is well known that static converters are the main source of electromagnetic interference generated by

in-vehicle electrical systems. The marketing of these systems is conditioned, among other things, by compliance with EMC standards. However, bringing power converters into compliance requires EMC assessments at different stages, from design to production. In order to study the conducted electromagnetic disturbances, over a wide frequency band, it is necessary to consider an energy conversion chain consisting of a power supply source, a static converter and a load.

### **Thesis objectives:**

This thesis is a part of a collaboration between the L2EP Power Electronics team and VALEO. Its aim is to develop models to be used in simulations to determine the levels of electromagnetic disturbance generated by power electronics systems. These models can be used to describe the sources of disturbance and the coupling mechanisms behind conducted emissions. The use of simulation tools enables to propose solutions to reduce these emissions. To achieve this objective, the scientific approach is based on four stages: characterization, modeling, design by simulation and experimental validation.

- Characterization methods: development of methods to characterize active and passive components and connectors (wire, cable, track, etc.) in the conversion chain. To achieve this, measuring equipment such as impedance analyzers or Vector Network Analyzers (VNA) will be used. Simulation software (ADS, FastHenry...) can also be used to determine the characteristics of conductors (busbars, tracks...).
- Modeling methods: characterization results of the various components, used in the conversion chain, over a wide frequency range, will be used to determine model parameters. In this thesis, equivalent electrical circuit models will be proposed. They are well suited to circuit simulation software (SPICE, SIMetrix...). In this project, we are mainly interested in the modelling of the commutation cell in operating conditions.
- Design by simulation: the models developed will be used to carry out simulations in time and frequency domains during the design phase of the converter. Nonlinear models of power semiconductor components in time-domain simulation requires exorbitant computation times, with the risk of simulation non-convergence. In order to reduce calculation times, we will carry out frequency-domain simulations using the MTES (Multi-Topology Equivalent Sources) modeling method developed at L2EP.
- Experimental validation: in order to validate the simulation results, it is necessary to develop an experimental set-up for a conversion chain close to on-board systems. First, it is essential to validate the model of the switching cell, which is the source of conducted electromagnetic disturbances. An oscilloscope using fiber-optically isolated voltage probes (Isovu voltage probe) will be used. The aim is to isolate the various converter potentials from the oscilloscope ground to avoid disturbing the measurement.

### **Bibliography**

- [1] Y. Liu, K. Y. See, S. Yin, R. Simanjorang, A. K. Gupta and J.-S. Lai, "Equivalent circuit model of high-power density SiC converter for common-mode conducted emission prediction and analysis", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine., vol. 8, no. 1, pp. 67–74, Apr. 2019.
- [2] F. A. Kharanaq, A. Emadi, and B. Bilgin, "Modeling of conducted emissions for EMI analysis of power converters: State-of-the-Art review", IEEE Open Access, vol. 8, 2020.
- [3] N. Ishibashi, L. K. Manepalli, D. Nath, B. P. Nayak, S. Kadam, D. Gope, "Black-Box DC-DC integrated circuit modeling towards design for EMC in automotive electronics", 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium.
- [4] A. Gahfif, P. E. Levy, M. Ali, M. Berkani, F. Costa, "EMC "Black Box" model for unbalanced power electronic converters", International Symposium on Electromagnetic Compatibility – 2019, EMC Europe.
- [5] H. Bishnoi, A. C. Baisden, P. Mattavelli, and D. Boroyevich", Analysis of EMI terminal modeling of switched power converters", IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, 2012.
- [6] C. Baisden, D. Boroyevich, and F. Wang, "Generalized terminal modeling of electromagnetic interference", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 5, pp. 2068–2079, Sep. 2010.

- [7] A. Vedde, M. Neuburger, H. C. Reuss, "An optimized high-frequency EMI filter design for an automotive DC/DC-converter", 2021 National Power Electronics Conference (NPEC), 2021.
- [8] V. Tarateeraseth, K. Y. See, F. G. Canavero, and R. W.-Y. Chang, "Systematic electromagnetic interference filter design based on information from in-circuit impedance measurement", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 52, no. 3, pp. 588–598, 2010.
- [9] S. Negr, G. Spadacini, F. Grassi, S. Pignari, "Measurement-based equivalent circuit model for time-domain simulation of EMI filters", International Symposium on Electromagnetic Compatibility – 2022, EMC Europe.
- [10] L. Wan, A. Hamid, F. Grassi, G. Spadacini, S. A. Pignari, "SPICE simulation of modal impedances in automotive powertrains under different operating conditions", International Symposium on Electromagnetic Compatibility - 2020, EMC EUROPE.
- [11] E. Gubia, P. Sanchis, A. Ursua, J. Lopez, and L. Marroyo, "Frequency domain model of conducted EMI in electrical drives", IEEE Power Electronics Letter, vol. 3, no. 2, pp. 45–49, Jun. 2005.
- [12] V. Tarateeraseth, B. Hu, K. Y. See, F. G. Canavero, "Accurate extraction of noise source impedance of an SMPS under operating conditions", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 1, jan. 2010.
- [13] K. Li, A. Videt, N. Idir, "Multi-probe measurement method for voltage-dependent capacitances of power semiconductor devices in high voltage", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, no. 11, nov. 2013.
- [14] M. Touré, S. Grivet-Talocia, F. G. Canavero, F. Robert, F. Paladian, M. Bensetti, and L. Dufour, "Fast and accurate modeling methodology using passive macro-modeling techniques", International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2018.
- [15] C. Marlier, A. Videt, 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, feb. 2015.
- [16] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", IEEE Transactions on power delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999.
- [17] B. Gustavsen and C. Heitz, "Modal vector fitting: A tool for generating rational models of high accuracy with arbitrary terminal conditions", IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 31, no. 4, 2008.
- [18] S. Vienot, A. Videt, N. Idir, L. Koné, S. Weiss, F. Laffon, "Frequency-domain simulation of power electronic systems based on multi-topology equivalent sources modelling method", 22nd European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'20 ECCE Europe, 09/2020.