

## Proposal of a PHD topic

### *Contribution of embedding of magnetic components in PCB core*

#### Partner laboratories :

SATIE, site ENS Paris-Saclay  
4 Avenue des sciences  
91190 Gif/Yvette

Ampère, bâtiment Omega  
43 Bd du 11 Novembre 1918  
69100 Villeurbanne

#### Contacts :

Mickaël PETIT  
Laboratoire SATIE – ENS Paris Saclay,  
[mickael.petit@ens-paris-saclay.fr](mailto:mickael.petit@ens-paris-saclay.fr)  
Mounira Bouarroudj  
Laboratoire SATIE – ENS Paris Saclay,  
[mounira.berkani@ens-paris-saclay.fr](mailto:mounira.berkani@ens-paris-saclay.fr)

Christian Martin  
Laboratoire Ampère – Bâtiment Omega  
[Christian.martin@univ-lyon1.fr](mailto:Christian.martin@univ-lyon1.fr)

The challenges of reducing greenhouse gas emissions and the scarcity of resources are at the heart of current social concerns. The French transport sector alone represents more than 30% of energy consumption and is the main emitter of greenhouse gases (30% of emissions in 2017). As in many other European countries, the process of energy transition has already been launched with, in particular, the banning of the sale of thermal cars from 2035 (Law n 2019-1428 of 24/12/2019). In this sector, power electronics play a key role because they manage the energy exchanges between the battery storage and the drive train. Although these electronics are very efficient, a reduction of the losses they generate remains an essential objective.

In order to increase the efficiency of static converters, designers are using more and more transistors made of large bandgap semiconductor materials, especially GaN. Their switching speed reduces the losses in the converter and their small surface area contributes to the reduction of parasitic currents [1]-[3]. However, the strong current variations that they generate during switching produce overvoltages when the switching mesh is even so slightly inductive. This phenomenon can be reduced by decoupling the DC input bus with a good quality capacitor located in very close distance from the transistors.

In a similar way, the fast variations of the output voltages of the converter induce common mode currents and propagation phenomena in the cables and interconnections between the converter and the load. Just like the decoupling of the input of the converter, the output of the converter must be decoupled from the load by an efficient inductance. The latter must keep its inductive aspect on frequencies ranging from DC to the equivalent frequency of the switching transient. Moreover, to limit the propagation phenomena, the latter must be located as close as possible to the switching cells. To do this, the integration of power functions is a good candidate.

To date, integration technologies allow to reduce the interconnection lengths between chips, thus limiting the inductive effects in the switching mesh, as shown in Figure 1. We propose to address the inductive output filter of switching cells by simultaneously integrating the active components and inductors in the core of the PCB [4]. Figure 2. shows examples of possible implementations. Here, the magnetic circuit is integrated in the insulating substrate of the PCB, the tracks allow the realization of the winding.

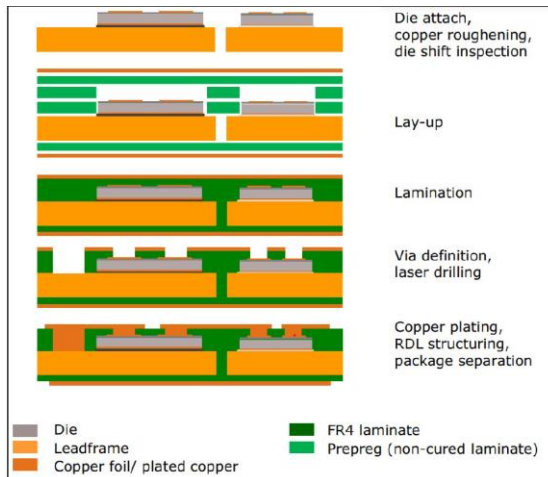


Figure 1 Active components embedding



Figure 2 PCB embedding Inductor

Initially, the PhD student will be in charge of characterizing these inductors in terms of electrical behavior (impedances, parasites, etc.), losses and aging of the components. In parallel, the implementation of multi-physics simulations will allow to understand the phenomena limiting the performances of the components.

With this knowledge, a second part of the work will be devoted to the improvement of the structures of buried magnetic components. One track, to limit the skin effects in the conductors, is to replace the large tracks by tracks reproducing a Litz wire. In addition, the PhD student will have to conduct characterization campaigns of magnetic materials. Indeed, the impact of the thermocompression cycle necessary to the realization of the PCB on the intrinsic characteristics of the material is currently completely unknown. If necessary, we will think about limiting the residual mechanical stresses during the annealing cycle.

Finally, the aging of these components must be characterized. To do this, controlled temperature rise and fall cycles will allow the acceleration of the aging of the components. We will have to define the protocol(s) of aging and we will have to define indicators of aging to specify the health of the component. Indeed, the damage phenomena of PCB integrated converters are currently not well known. Moreover, the components that we propose to realize occupy an important surface (tens of square centimeters) of the substrate compared to the switching cells. This raises questions about aging and electro-thermo-mechanical damage of integrated passive components.

This thesis is part of the ANR TECOCIP program, in which the Ampère, Laplace and Satie laboratories are partners. The 3Dphi platform, available in the LAPLACE laboratory (Toulouse), will facilitate the realizations envisaged in this thesis and will complete the fabrication tools available in the Satie laboratory. The PhD student will work in close collaboration with the 3Dphi platform and will visit it regularly.

Finally, in the framework of this ANR, another PhD student will be in charge of the development of PCB integrated converters. The aging of these stacks must also be studied simultaneously with the inductors. The PhD student recruited on this thesis will therefore also participate in the aging of active components.

## Bibliographic reference

- [1] A. R. Ekon, M. Petit, F. Costa, F. Bouvet, et E. Dupuy, « Impact of routing on the EMC behavior of a GaN HEMT-based full bridge DC-DC converter », in *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, sept. 2022, p. 415-420. doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9900951.
- [2] P. B. Derkacz, J.-L. Schanen, P.-O. Jeannin, P. J. Chrzan, P. Musznicki, et M. Petit, « EMI Mitigation of GaN Power Inverter Leg by Local Shielding Techniques », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, n  10, p. 11996-12004, oct. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3176943.
- [3] P. B. Derkacz, J.-L. Schanen, P.-O. Jeannin, P. Musznicki, P. J. Chrzan, et M. Petit, « 3D PCB package for GaN inverter leg with low EMC feature », in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, sept. 2020, p. P.1-P.10. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215641.
- [4] R. Caillaud, « Integration of a 3.3 kW, AC/DC bidirectional converter using printed circuit board embedding technology », These de doctorat, Lyon, 2019. Consult  le: 27 ao t 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019LYSEI001>

## Summary:

The new technologies of large gap transistors are promising for static converters in terms of efficiency. Their implementation requires not only a particular packaging but also a quality decoupling of both the DC bus of the converter and the output from the load. This output decoupling must be done by a wide frequency band inductance which must be as close as possible to the output of the converters. Through this thesis topic, we want to develop a buried inductor technology. The latter will be integrated into the PCB substrate simultaneously with the active components. The PhD student will set up experimental protocols and simulations to understand the impact of the PCB burial of magnetic materials on their intrinsic behavior. In a second part, the PhD student will investigate the electrical behavior of the buried inductors and will try to optimize the topologies of the components. Finally, the reliability of the latter will be addressed through accelerated aging protocols. The doctoral student will also define the indicators of the aging of these components.

## Proposition de sujet de thèse

### *Contribution à l'enfouissement PCB des composants magnétiques*

#### Laboratoires partenaires :

SATIE, site ENS Paris-Saclay  
4 Avenue des sciences  
91190 Gif/Yvette

Ampère, b timent Omega  
43 Bd du 11 Novembre 1918  
69100 Villeurbanne

#### Contacts :

Mickaël PETIT  
Laboratoire SATIE – ENS Paris Saclay,  
[mickael.petit@ens-paris-saclay.fr](mailto:mickael.petit@ens-paris-saclay.fr)  
Mounira Bouarroudj  
Laboratoire SATIE – ENS Paris Saclay,  
[mounira.berkani@ens-paris-saclay.fr](mailto:mounira.berkani@ens-paris-saclay.fr)

Christian Martin  
Laboratoire Ampère – Bâtiment Omega  
[Christian.martin@univ-lyon1.fr](mailto:Christian.martin@univ-lyon1.fr)

Les enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de raréfaction des ressources sont au cœur des préoccupations sociales actuelles. Le secteur des transports français représente à lui seul plus de 30 % de la consommation d'énergie et est le principal émetteur de gaz à effet de serre (30 % des émissions en 2017). Comme dans de nombreux autres pays européens, le processus de transition énergétique est d j   engagé avec notamment l'interdiction de la vente de voitures thermiques à partir de 2035 (Loi n 2019-1428 du 24/12/2019). Dans ce secteur, l'électronique de puissance joue un rôle clé car elle gère les échanges d'énergie entre le stockage des batteries et la chaîne de traction. Bien que cette électronique soit très performante, la réduction des pertes qu'elle génère reste un objectif essentiel.

Afin d'augmenter l'efficacité des convertisseurs statiques, les concepteurs utilisent de plus en plus de transistors fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, en particulier le GaN. Leur vitesse de commutation réduit les pertes dans le convertisseur et leur petite surface contribue à la réduction des courants parasites [1]-[3]. Cependant, les fortes variations de courant qu'ils génèrent lors de la commutation produisent des surtensions lorsque la maille de commutation est ne serait-ce que légèrement inductive. Ce phénomène peut être réduit en découplant le bus d'entrée CC à l'aide d'un condensateur de bonne qualité situé à une distance très proche des transistors.

De la même manière, les variations rapides des tensions de sortie du convertisseur induisent des courants de mode commun et des phénomènes de propagation dans les câbles et les interconnexions entre le convertisseur et la charge. Tout comme le découplage de l'entrée du convertisseur, la sortie du convertisseur doit être découplée de la charge par une inductance efficace. Cette dernière doit conserver son aspect inductif sur des fréquences allant du courant continu à la fréquence équivalente du transitoire de commutation. De plus, pour limiter les phénomènes de propagation, cette dernière doit être située au plus près des cellules de commutation. Pour ce faire, l'intégration de fonctions de puissance est un bon candidat.

  ce jour, les technologies d'intégration permettent de réduire les longueurs d'interconnexion entre les puces, limitant ainsi les effets inductifs dans la maille de commutation, comme le montre la figure 1. Nous proposons de traiter le filtre de sortie inductif des cellules de commutation en intégrant simultanément les composants actifs et les inducteurs au cœur du circuit imprimé [4]. La figure 2

montre des exemples d'implémentations possibles. Ici, le circuit magnétique est intégré dans le substrat isolant du circuit imprimé, les pistes permettant la réalisation du bobinage.

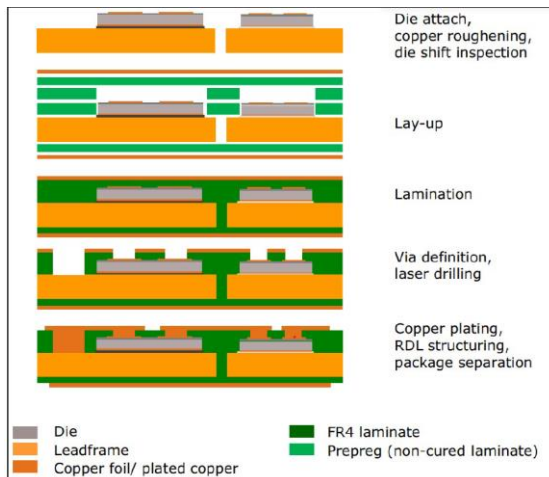


Figure 1 Intégration de composants actifs



Figure 2 Incorporation dans le circuit imprimé Inducteur

Dans un premier temps, le doctorant sera chargé de caractériser ces inducteurs en termes de comportement électrique (impédances, parasites, etc.), de pertes et de vieillissement des composants. En parallèle, la mise en œuvre de simulations multi-physiques permettra de comprendre les phénomènes limitant les performances des composants.

Fort de ces connaissances, une seconde partie du travail sera consacrée à l'amélioration des structures des composants magnétiques enterrés. Une piste, pour limiter les effets de peau dans les conducteurs, est de remplacer les grandes pistes par des pistes reproduisant un fil de Litz. Par ailleurs, le doctorant devra mener des campagnes de caractérisation des matériaux magnétiques. En effet, l'impact du cycle de thermocompression nécessaire à la réalisation du PCB sur les caractéristiques intrinsèques du matériau est actuellement totalement inconnu. Le cas échéant, nous réfléchirons à limiter les contraintes mécaniques résiduelles lors du cycle de recuit.

Enfin, le vieillissement de ces composants doit être caractérisé. Pour ce faire, des cycles de montée et de descente en température contrôlés permettront d'accélérer le vieillissement des composants. Il faudra définir le(s) protocole(s) de vieillissement et définir des indicateurs de vieillissement pour préciser l'état de santé du composant. En effet, les phénomènes d'endommagement des convertisseurs intégrés sur PCB sont actuellement mal connus. De plus, les composants que nous proposons de réaliser occupent une surface importante (plusieurs dizaines de centimètres carrés) du substrat par rapport aux cellules de commutation. Ceci soulève des questions sur le vieillissement et l'endommagement électro-thermo-mécanique des composants passifs intégrés.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme ANR TECOCIP, dont les laboratoires Ampère, Laplace et Satie sont partenaires. La plateforme 3Dphi, disponible au sein du laboratoire LAPLACE (Toulouse), facilitera les réalisations envisagées dans cette thèse et complétera les outils de fabrication disponibles au sein du laboratoire Satie. Le doctorant travaillera en étroite collaboration avec la plateforme 3Dphi et la visitera régulièrement.

Enfin, dans le cadre de cette ANR, un autre doctorant sera en charge du développement des convertisseurs intégrés aux PCB. Le vieillissement de ces empilements doit également être étudié en même temps que les inducteurs. Le doctorant recruté sur cette thèse participera donc également au vieillissement des composants actifs.

## Bibliographic reference

- [1] A. R. Ekon, M. Petit, F. Costa, F. Bouvet, et E. Dupuy, « Impact of routing on the EMC behavior of a GaN HEMT-based full bridge DC-DC converter », in *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, sept. 2022, p. 415-420. doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9900951.
- [2] P. B. Derkacz, J.-L. Schanen, P.-O. Jeannin, P. J. Chrzan, P. Musznicki, et M. Petit, « EMI Mitigation of GaN Power Inverter Leg by Local Shielding Techniques », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, n  10, p. 11996-12004, oct. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3176943.
- [3] P. B. Derkacz, J.-L. Schanen, P.-O. Jeannin, P. Musznicki, P. J. Chrzan, et M. Petit, « 3D PCB package for GaN inverter leg with low EMC feature », in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, sept. 2020, p. P.1-P.10. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215641.
- [4] R. Caillaud, « Integration of a 3.3 kW, AC/DC bidirectional converter using printed circuit board embedding technology », These de doctorat, Lyon, 2019. Consulté le: 27 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019LYSEI001>

## Résumé :

Les nouvelles technologies de transistors à grand écart sont prometteuses pour les convertisseurs statiques en termes d'efficacité. Leur mise en œuvre nécessite non seulement un conditionnement particulier, mais aussi un découplage de qualité du bus continu du convertisseur et de la sortie de la charge. Ce découplage de sortie doit être réalisé par une inductance à large bande de fréquence qui doit être aussi proche que possible de la sortie des convertisseurs. A travers ce sujet de thèse, nous souhaitons développer une technologie d'inductance enterrée. Cette dernière sera intégrée dans le substrat du PCB en même temps que les composants actifs. Le doctorant mettra en place des protocoles expérimentaux et des simulations pour comprendre l'impact de l'enfouissement dans le PCB des matériaux magnétiques sur leur comportement intrinsèque. Dans une deuxième partie, le doctorant étudiera le comportement électrique des inducteurs enfouis et tentera d'optimiser les topologies des composants. Enfin, la fiabilité de ces derniers sera abordée à travers des protocoles de vieillissement accéléré. Le doctorant définira également les indicateurs de vieillissement de ces composants.