

## 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, 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)

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 déjà 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.

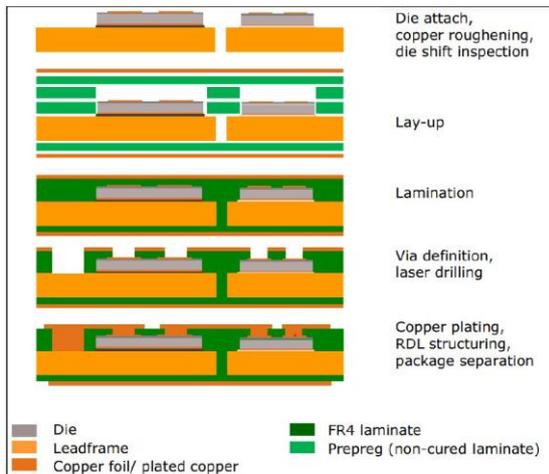


Figure 1 Intégration de composants actifs



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.