

## Sujet de thèse

### Evaluation des contraintes et des principaux mécanismes d'endommagement de modules de puissance MOSFETs SiC à forte densité d'intégration

**Laboratoires impliqués :** SATIE (Versailles), LAPLACE (Toulouse)

**Laboratoire d'accueil :** SATIE (Versailles)

**Directeur de thèse :** Laurent Dupont (SATIE)

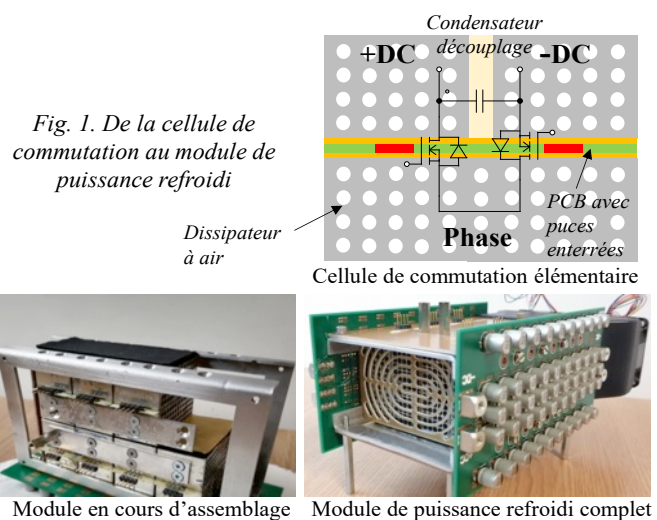
**Encadrant :** Emmanuel Sarraute (LAPLACE)

**Contact :** [laurent.dupont@univ-eiffel.fr](mailto:laurent.dupont@univ-eiffel.fr), [emmanuel.sarraute@laplace.univ-tlse.fr](mailto:emmanuel.sarraute@laplace.univ-tlse.fr)

#### Description du projet :

Le déploiement du vecteur électrique participe à la nécessaire transition énergétique dans des domaines applicatifs toujours plus nombreux. En cela, le convertisseur électronique de puissance est l'une des principales briques technologiques permettant de gérer efficacement et en toute sécurité les transferts des flux d'énergie. Aujourd'hui, les composants semi-conducteurs à grand gap ouvrent encore le champ des possibilités vers des performances accrues et une meilleure compacité. Mais, les conditions d'usage de ces composants reportent de nombreuses contraintes tant environnementales que fonctionnelles sur les constituants d'une électronique de puissance nécessairement plus intégrée. Aussi, la plus grande maturité des composants à matériaux semi-conducteurs à grand gap s'accompagne d'un nouveau modèle d'intégration de ces parties actives que sont ici des transistors MOSFET SiC intrinsèquement très performants. En effet, avec des dimensions plus petites combinées à des puissances commutées toujours plus grandes, les densités de contraintes ne cessent de croître à l'image des pertes de l'ordre de quelques centaines de Watts / cm<sup>2</sup> même sous des niveaux de rendement exceptionnels.

Or, même en ne considérant que les conditions électriques et thermiques, l'intégration conventionnelle des modules de puissance doit être dépassée pour gérer les éléments parasites : les inductances de connexion doivent être faibles pour réduire les surtensions lors des commutations et les capacités adaptées pour limiter la génération de perturbations électromagnétiques. Ce modèle de module de puissance repose sur l'intégration tridimensionnelle de cellules de commutations élémentaires refroidies à l'air parmi les meilleures de l'état de l'art (figure 1). Les collaborations avec d'autres laboratoires nationaux (G2Elab, AMPERE, LAPLACE, SATIE) seront encadrées par le projet DESTINI (2022-2025) de l'ANR qui finance la thèse.



Cette proposition d'intégration de l'électronique de puissance permet un excellent compromis thermique/éléments parasites. Mais, elle conduit à une profonde révision de la répartition des conditions fonctionnelles qui demeure méconnue (distributions des densités de courant et des gradients de température, reports des contraintes dont thermomécaniques...). La thèse proposée à travers ce sujet s'intéressera à l'évaluation des contraintes reportées à l'assemblage de puissance et particulièrement celles d'origine électrothermique et thermomécanique qui participent à l'endommagement de la brique technologique. La perspective est d'obtenir des briques technologiques efficaces avec une plus grande standardisation utile à un bilan plus vertueux sur le cycle de vie du convertisseur.

En synthèse, le sujet poursuivra des travaux initiés sur la modélisation multiphysiques afin d'appréhender plus finement la distribution des contraintes dans une structure d'intégration 3D. Les moyens expérimentaux disponibles et à développer viendront consolider ces modèles raisonnablement simplifiés. Aussi, des campagnes de vieillissement accéléré apporteront les clés d'une meilleure optimisation en mettant en perspective tout autant la durée de vie de la brique technologique que la réponse aux attentes de performances électrothermiques.

## **Travaux envisagés :**

### 1. Etude bibliographique

Les travaux de recherche seront accompagnés tout au long de la thèse par une étude bibliographique approfondie sur les méthodes d'évaluation des performances et des mécanismes d'endommagements reportés dans une intégration 3D de composants à grand gap de type MOSFET SiC.

### 2. Modélisation multiphysique d'une brique technologique représentative de l'intégration 3D

Les contraintes résiduelles seront estimées en considérant le procédé de réalisation dans la limite des seules conditions thermomécaniques passives. Puis, en superposition sur le champ des contraintes résiduelles ainsi calculées, l'influence de la contribution des conditions d'usage thermomécaniques ou électrothermiques sera étudiée. Les modèles numériques mis en place au SATIE et au LAPLACE seront améliorés en conséquence afin d'affiner la compréhension des principaux contributeurs qui affectent les performances et les mécanismes d'endommagement au sein d'un tel assemblage 3D. Des règles de conception seront proposées et la recherche du meilleur placement de capteurs permettra de mieux considérer les performances et l'intégrité du module de puissance.

### 3. Evaluer les contraintes et les mécanismes d'endommagement

La contre-expertise des résultats numériques s'appuiera sur des campagnes expérimentales en consolidant des méthodes éprouvées de caractérisations électrothermiques développées au laboratoire SATIE, l'intégration de capteurs, ou de nouvelles méthodes permettant d'évaluer également les contraintes thermomécaniques. Les moyens originaux disponibles au laboratoire SATIE à Versailles (caractérisation électrothermique, vieillissement accéléré et analyses) permettront de vérifier, sous des conditions électrothermiques adaptées, les principaux mécanismes d'endommagement représentatifs de l'usage. La meilleure compréhension des conditions de stress de l'assemblage du module à MOSFET SiC sera utile pour proposer des améliorations structurelles ou fonctionnelles à la technologie 'TAPIR' avec le support des partenaires impliqués dès les procédés de conception.

### 4. Conception et caractérisation de cellules de commutation et de modules de puissance

A la suite des tâches du projet, des choix d'optimisation des dispositifs seront proposés afin de réaliser un démonstrateur de convertisseur statique fonctionnel à base de MOSFET SiC dont l'application sera décidée en cours de projet. Elle sera effectuée en collaboration avec d'autres doctorants affectés sur ce projet. Ce démonstrateur sera caractérisé et confronté à l'état de l'art.

### 5. Rédaction d'articles scientifiques et du mémoire de thèse

## **Profil du candidat**

- **Formation** : Ecole d'ingénieur ou M2 dans le domaine du génie électrique.
- **Compétences techniques** : Electronique de puissance, Mécatronique, Mesures, Modélisation.
- **Logiciels** : MATLAB, outil de modélisation par éléments finis (COMSOL sera un plus).
- **Personnalité** : Goût prononcé pour la modélisation, les recherches expérimentales, une nécessaire rigueur pour prendre rapidement de l'autonomie en collaboration avec une équipe.

# Thesis subject

## *Evaluating constraints and main damage mechanisms in high integration density power modules of SiC MOSFETs*

**Involved Labs:** SATIE (Versailles), LAPLACE (Toulouse)

**Hosting Lab:** SATIE (Versailles)

**Thesis supervisor:** Laurent Dupont (SATIE)

**Tutor:** Emmanuel Sarraute (LAPLACE)

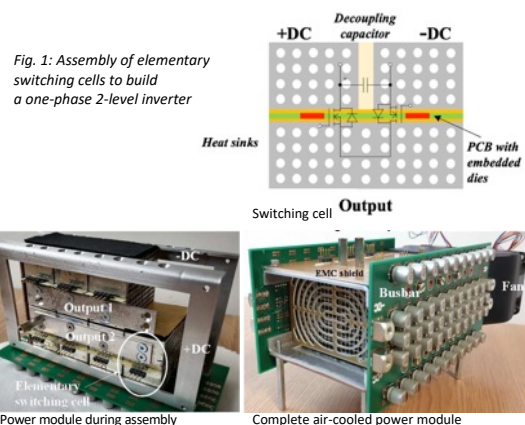
**Contact :** [laurent.dupont@univ-eiffel.fr](mailto:laurent.dupont@univ-eiffel.fr), [emmanuel.sarraute@laplace.univ-tlse.fr](mailto:emmanuel.sarraute@laplace.univ-tlse.fr)

### **Project's description:**

Deploying the electric vector is part of the necessary energy transition in an ever-growing number of application fields. In that matter, the electronic power converter is one of the main technological bricks allowing to deal safely and efficiently with energy flows transfers.

Today, wide-band-gap semiconductor components open wider the field of possibilities towards increased performances and compactness. However, those component's conditions of use make many environments constraints as well as harsh function-related constraints fall back on the parts of the integrated power-electronics devices. The greater technological maturity of these components thus comes along with a new model for the integration of inherently high-performance active parts such as the MOSFET SiC transistors. Smaller scales combined with higher power switching capability lead indeed to growing levels of constraint, such as shown by the hundreds of W/cm<sup>2</sup>-range power losses observed even within the best performance levels.

Therefore, even considering only thermal and electrical conditions, the conventional integration of power modules needs to be thought over in order to deal with parasitic elements: low connexion inductances are required to reduce surge during power switches, as are appropriate capacities in order to minimize electromagnetic disturbances. This model of power module is based on three-dimensional integration of the best, state-of-the art air-cooled, elementary switching cells (figure 1). Collaborations with other national labs (G2Elab, AMPERE, LAPLACE, SATIE) will be regulated by the ANR, who finances the thesis, through the DESTINI project (2021-2025).



This proposal for power electronics integration provides an excellent compromise between thermal performances and parasitic elements. But it leads to a deep revision of a yet unknown distribution of functional conditions (current density and temperature gradients distribution, constraints as thermo-mechanical ones...). The thesis proposed throughout this subject will evaluate the constraints transferred to the power electronics assembly, especially those originating from thermo-electrical and thermomechanical issues, which both participate to damaging the technological bricks. The plan being to obtain efficient, more standardized technological bricks, proving useful to a more virtuous life cycle assessment of the converter.

Summing up, the subject will carry on initiated works on multiphysics modeling, leading to better understanding of constraints distribution in a three-dimension integration structure. Experimental resources available as of today, along with forthcoming others that are yet to be developed, will reinforce those reasonably simplified models. Fast-aging campaigns will also bring clues for greater optimization as they will bring better prospects on the technological brick's lifetime, as well as answers on electrothermal performances expectations.

## Considered forthcoming works:

### 1. Bibliographic studies

All throughout the thesis and alongside the research work will come a deepened bibliographic study regarding the methods for evaluating performance and damage mechanisms in a 3D integration of WBG components.

### 2. Multiphysics modeling of a 3D-integration representative technological brick

Residual constraints will be estimated based on the realization process, limited to only passive thermomechanical conditions. Then, over the field of the residual constraints thus calculated, will be studied the contributing influence of thermomechanical or thermoelectrical conditions of use. The numerical models established by the SATIE and the LAPLACE labs will be consequently improved in order to provide finer understanding of the main contributing factors affecting performances and damaging mechanisms inside such a 3D assembly. Conception rules will be proposed, while researching the best sensors' location will enable better consideration of the power module's performances and integrity.

### 3. Evaluating constraints and damage mechanisms

Numerical results' counter-expertise will be based on experimental campaigns reinforcing proven methods in electrothermal characterization, as developed in the SATIE lab, sensors integration, or new methods enabling also thermomechanical constraints' evaluation. The unique resources available in the Versailles SATIE lab (electrothermal characterization, fast-aging processes and analysing work) will enable to confirm, under proper electrothermal conditions, the main, use-representative, damage mechanisms. Supported by the partners involved from the very design process, a better understanding of stress conditions in the MOSFET SiC-module's assembly will prove useful in offering structural or functional improvements to the « TAPIR » technology.

### 4. Designing and characterizing switching cells and power modules

Next to the project's tasks, optimizing choices will be offered in order to complete a demonstrator of a full functional SiC MOSFET static converter, whose practical application will be decided along the way. It will be done so in association with other PhD students assigned on the project. This demonstrator shall be characterized and confronted with the state of the art.

### 5. Writing of scientific papers and PhD dissertation

## Profil du candidat

- **Academic training:** Engineer school or Master in the electrical-engineering field.
- **Technical skills:** power electronics, mechatronics, measuring, modeling.
- **Software:** MATLAB, finite elements modeling tool (COMSOL would be an asset).
- **Personnalité:** Acute interest in modeling and experimental research.

Rigorousness is required so as to quickly gain self-reliance on a team collaboration.