

# Fonctionnalisation par fabrication additive des connectiques des modules d'électronique de puissance

Début souhaité : septembre 2024

## Consortium pour l'encadrement

- Paul-Étienne VIDAL Professeur des Universités (**Directeur de thèse**), équipe e-ACE<sup>2</sup> du Laboratoire Génie de Production (LGP) de l'Université de Technologie de Tarbes (UTTOP).
  - paul-etienne.vidal@uttop.fr
- Lionel Arnaud, Professeur des Universités, LGP
- Hélène Welemanne, Maître de conférences HDR, LGP
- Joël Alexis, Professeur des Universités, LGP
- Karl Delbé, Maître de conférences HDR, LGP

## Candidatures

- Ouverture des candidatures : 01/05/2024
- Fin des candidatures : 30/06/2024 -18p.m.
- Après une phase de sélection sur dossier, des auditions par visioconférences se tiendront sur convocation au fil de l'eau.
- Envoyer **un CV détaillé et une lettre de motivation** détaillant en quoi votre expérience vous permettra de satisfaire les attentes.

## Introduction du sujet

Le projet s'inscrit dans la stratégie régionale d'innovation « mobilité intelligente et durable » de la région, en lien avec l'objectif de poursuivre l'innovation dans les technologies et applications liées à la mobilité. Le développement des dispositifs de l'électronique de puissance, ou cœurs de puissance, est crucial pour l'électrification des transports et particulièrement pour l'aéronautique et l'automobile. Pour satisfaire des conditions environnementales de fonctionnement exigeantes, le défi actuel en électronique de puissance est de créer des modules de puissance innovants pour convertisseurs de haute tension/courant, en optimisant les propriétés des matériaux et en miniaturisant les composants. Les objectifs sont d'accroître la puissance convertie et les performances thermiques des modules, par rapport à leur masse ou volume.

Ce projet est également en phase avec l'enjeu scientifique « optimisation des systèmes énergétiques » de la nouvelle Université de Technologie de Tarbes.

## Question recherche et objectif scientifique

Le projet consiste à concevoir, fonctionnaliser, puis intégrer, des connectiques de puissance optimisées par le procédé de Fabrication Additive (FA) métallique de fusion laser sur lit de poudre (LPBF), en vue de leur mise en œuvre dans des Modules de Puissance (PM). L'originalité du projet réside à la fois dans l'objet d'étude considéré, mais également dans l'approche multidisciplinaire envisagée pour traiter la problématique.

Contact : paul-etienne.vidal@uttop.fr

LGP – ENIT – UTTOP, 47 av. d'Azereix, 65000 Tarbes, [www.uttop.fr](http://www.uttop.fr)

La connectique en électronique de puissance est un élément indispensable à l'assemblage. À ce jour, la connectique ne joue le rôle que de conducteur électrique et sa géométrie dite en forme de « lyre » est élémentaire.

Dans le cadre du projet, des connectiques de puissance, non dépendantes d'une technologie de packaging ou d'assemblage, seront créées et optimisées afin de réaliser trois fonctions : conducteur électrique, support mécanique et dissipateur thermique partiel. Pour cela, la conception s'appuiera sur un mode de FA, rajoutant une plus-value et permettant une optimisation structurelle et massique de cet élément indispensable de l'assemblage. La conception de cette connectique innovante et de son intégration au sein d'un module de puissance à refroidissement double face, sera possible par l'optimisation géométrique préalable pour la fonction dissipateur thermique. Dans un second temps, un procédé de scellement spécifique sera étudié. Il sera basé sur une approche par soudure par frottement (Friction Welding – FW), couplé à un traitement post-fabrication des connectiques. Enfin, une fois le module de puissance fabriqué, des caractérisations thermiques, électriques et mécaniques permettront de statuer sur les éléments d'innovation introduits et les situer à l'état de l'art.

Montrer de quelle manière la fonctionnalisation des interconnexions électriques au sein d'un module de puissance permet d'améliorer significativement :

Le rendement de conversion : Cible 1 ;

La complexité des procédés d'assemblage : Cible 2 ;

## Enjeux scientifiques et technologiques

À l'issue du projet, la connectique optimisée et intégrée jouera trois rôles. Elle permettra de manière évidente le cheminement du courant de puissance. Sa géométrie optimisée permettra l'extraction d'une fraction de la chaleur produite par le fonctionnement en commutation de l'interrupteur. Enfin, la géométrie créée permettra la fixation mécanique des amenées de courant extérieures au PM.

## Livrables et jalons identifiés

### Livrables

- L1 : Première version du connecteur innovant (CAO + démonstrateur).
- L2 : Un rapport de caractérisations expérimentales et numériques.
- L3 : Un article scientifique dans une revue internationale.
- L4 : Un manuscrit de thèse et une présentation de soutenance.

### Jalons

- J1 : Rapport bibliographique préliminaire.
- J2 : Note technique sur géométrie optimisée.
- J3 : Note technique sur nouvelle technique de report.

## Description du plan de travail envisagé

La connectique est un élément qui est très peu étudié. Sa géométrie a été modifiée pour la première fois pour les modules à refroidissement double face. Ce projet a l'ambition de renforcer la fonctionnalisation de la connectique, en exploitant les possibilités de la fabrication additive. L'accès à des géométries innovantes pose la question du procédé d'assemblage et d'intégration de ces nouvelles connectiques au sein d'un PM.

Les verrous auxquels s'attacheront à répondre les tâches sont la miniaturisation et fonctionnalisation d'un assemblage de PM par une solution de FA. Il s'agira de déterminer le choix de matériaux, les formes géométriques et les paramètres de fabrication afin d'obtenir une connectique de puissance innovante et

en rupture avec l'état de l'art. La connectique possédera des propriétés intrinsèques qui devront être caractérisées, ainsi que des propriétés fonctionnelles. Le projet proposera des indicateurs/moyens pour parvenir à la caractérisation des performances de la connectique innovante, notamment du point de vue thermique. Enfin, la mise au point d'un procédé de liaison mécanique de la connectique à la surface supérieure de la puce de puissance sera étudiée.

Afin de lever ces verrous, la stratégie de recherche que nous proposons s'appuie sur une étape de positionnement scientifique et d'analyse de l'état de l'art (couleur bleue Fig. 1) et quatre étapes pour les développements scientifiques (couleurs terre, verte, jaune et grise), comme illustré Fig. 1.

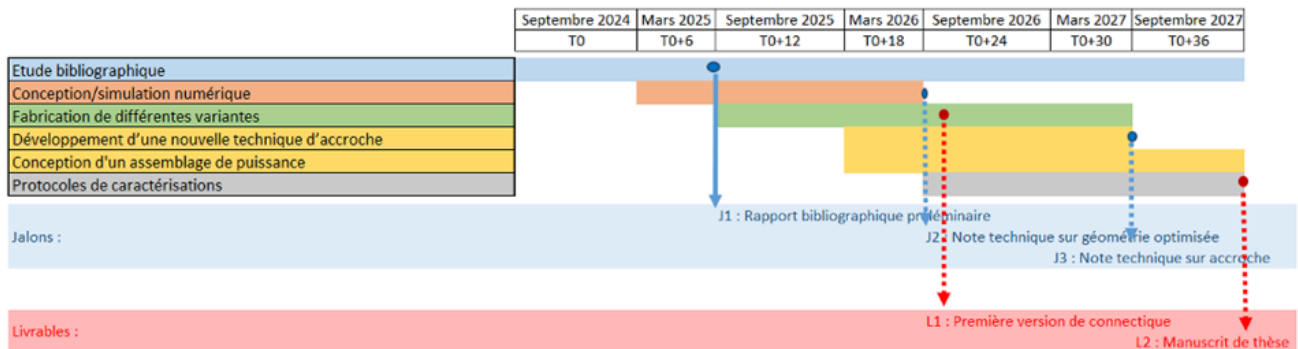


Fig. 1: Planning prévisionnel

Au cours de l'étude bibliographique, le doctorant établira un état de l'art (publications, brevets, etc.) portant sur les connectiques de puissance, les dissipateurs et la caractérisation de leur performance, ainsi que les procédés de soudure par frottement. Un rapport bibliographique préliminaire sera généré.

Dans la première étape scientifique, le projet ambitionne par conception et simulation numérique, l'optimisation géométrique de la connectique. Le doctorant développera des modèles de design des connectiques dans leurs différentes variantes. Sur la base de résultats de simulation, il analysera de quelle manière proposer une optimisation de la fonction de dissipateur thermique. Les simulations seront de type éléments finis thermomécaniques 3D.

Dans la deuxième étape, la fabrication de différentes variantes de la connectique sera effectuée par FA. Un travail sur le choix et l'adéquation des matériaux, du paramétrage du procédé de FA et des traitements pour les étapes de finition sera effectué. Le doctorant proposera et vérifiera que des indicateurs démontrant la maîtrise de la fabrication ont été atteints.

Dans la troisième étape, deux tâches en parallèle seront menées. Un premier travail consistera à évaluer le potentiel pour le développement d'une nouvelle technique d'accroche innovante, par frottement, rendue possible par les géométries obtenues par FA et par un traitement de finition optimisé. Un deuxième travail consistera à réaliser l'assemblage de puissance, des phases de conception aux réalisations.

- Développement d'une nouvelle technique d'accroche :

le doctorant analysera de quelle manière une technique de type FW peut être réalisée. Il analysera l'adéquation entre géométrie des interfaces à relier, nature des matériaux (avec éventuellement un traitement de surface spécifique à envisager) et la mise au point des machines pour le procédé ainsi que leurs paramétrages. Les paramètres du FW sont essentiels et à traiter pour chaque nouvelle situation (puissance, fréquence de déplacement, pression, environnement).

- Conception d'un assemblage de puissance :

le doctorant fera ses premiers développements sur la base d'un assemblage déjà réalisé. Il proposera de nouvelles variantes de connectiques. Ensuite, il définira un nouvel assemblage qui permettra de révéler l'apport des nouvelles connectiques, notamment d'un point de vue thermique et procédés d'assemblage. Ici la difficulté réside essentiellement dans la conception d'un assemblage à la fois représentatif de l'électronique de puissance et qui puisse en même temps démontrer tout le potentiel de la connectique innovante.

La quatrième étape sera la mise en œuvre de protocoles de caractérisations thermique et électrique, leur analyse, et leur confrontation aux résultats numériques et à des indicateurs de performances usuels en électronique de puissance. La tâche consiste à développer un protocole de caractérisation expérimentale, qui permette la comparaison de mesures à des résultats numériques. Il s'agit de proposer des indicateurs de performances (résistance et impédance thermique par exemple) et de développer les bancs de caractérisation adaptés. La difficulté réside dans la complexité de mise en œuvre de bancs de caractérisation électrothermique. La géométrie même du connecteur innovant, qui par principe consistera à extraire une partie de la chaleur à l'opposé du flux principal, entraîne une dépendance entre géométrie et performance thermique. Ainsi, les bancs de caractérisation usuels devront être adaptés. Nous proposons ici de les coupler à des mesures de champs par thermographie infrarouge effectués sur l'ensemble de la pièce [1].

La connectique en électronique de puissance est un élément indispensable à l'assemblage, mais ne fait pas l'objet aujourd'hui de travaux spécifiques. Tout au moins peut-on citer les travaux sur les modules double face [2], où la connectique est remplacée par des billes brasées, et idéalement supprimées. Ces deux approches sont idéales en termes de dissipation thermique [3], mais problématiques lorsque les niveaux de tension et de courant s'élèvent. Notre travail consistera à fonctionnaliser la connectique supérieure pour prélever une portion du flux de chaleur, tout en conservant un assemblage compatible avec les très fortes tensions et puissances. La fonctionnalisation ne s'arrête pas là puisque l'utilisation de la fabrication additive permet d'envisager d'autres fonctions telles que la fixation mécanique des amenés de courant extérieures au module. Ceci n'a jamais été fait à notre connaissance. De plus, les géométries rendues possibles par la FA, nous permettent d'envisager le développement d'un procédé de soudure par frottement (FW). Ce qui constituerait une innovation unique. Par ailleurs, l'équipe d'encadrement possède également l'expertise pour procéder des traitements de finition post-fabrication pour favoriser le scellement par FW.

Cette étude s'appuiera sur les résultats déjà obtenus au cours d'un premier stage par un assistant-ingénieur [4]. Il a été ainsi démontré la possible conception d'un assemblage avec des connectiques multifonctionnelles mais non encore optimales. Au cours de ce travail, un assemblage de type « press-pack » c'est-à-dire sans soudure de la connectique, a été réalisé. Ces premiers résultats nous permettent d'appréhender, voire de limiter, les risques pour l'étude à venir en ayant la possibilité d'adopter des solutions alternatives éprouvées au cours du stage.

## Bibliographie

- [1]. Characterization of an integrated buck converter using infrared thermography, Quantitative InfraRed Thermography, N. Viviés, M. Haussener, H. Weleman, B. Trajin, P.-E. Vidal, QIRT 2014, Bordeaux, France, 7-11 jul. 2014.
- [2]. New technology and tool for enhanced packaging of semiconductor power devices, Pierre Solomala; Alberto Castellazzi; Michel Mermet-Guyennet; Mark Johnson, 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul Korea.
- [3]. Comparative thermal and thermomechanical analyses of solder-bump and direct-solder bonded power device packages having double-sided cooling capability, J.G. Bai; J.N. Calata; Guo-Quan Lu, 19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04.
- [4]. Rayan Azzoug, Fonctionnalisation par fabrication additive de composants d'électronique de puissance, mémoire de stage de semestre 6, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, février - juin 2023 (rapport disponible sur demande).

## Profil recherché

Le (la) candidat(e) devra être issu(e) d'une formation scientifique spécialisée dans le génie des matériaux et des procédés de mise en forme, ou de formation généraliste avec une dominante en sciences des matériaux et conception mécanique. Des connaissances en génie électrique / électronique de puissance, mêmes élémentaires sont indispensables. Outre des qualités techniques à attester, le (la) candidat(e) devra posséder une curiosité scientifique pour aborder les différentes étapes proposées, mais aussi être force de proposition dans le déroulement de l'étude. La maîtrise/connaissance de logiciels pour la simulation thermomécanique sera évaluée. Une expérience technique en conception micro-électronique (ou domaine proche - type assemblage salle blanche), ou en fabrication additive métallique de pièces de précisions serait un atout très pertinent.

Le (la) candidat(e) devra également posséder un bon niveau de maîtrise de l'anglais et des qualités de communication et de synthèse écrites et orales en français comme en anglais. Idéalement, le (la) candidat(e) sera soit en fin de cursus Master Recherche, soit aura cumulé une à deux années d'expérience après son Master recherche.

## Lieu de déroulement de la thèse

L'étude se déroulera sur plusieurs lieux de l'UTTOD – LGP :

- Laboratoire Génie de Production, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 av. d'Azereix, 65000 Tarbes, [www.lgp.enit.fr](http://www.lgp.enit.fr)
- Plateforme PRIMES, 67 bd. Pierre Renaudet, Tarbes, [www.primes-innovation.com](http://www.primes-innovation.com)
- Plateforme CEF3D, 47 av. d'Azereix, Tarbes, [www.cef3D.fr](http://www.cef3D.fr)

Le doctorant sera hébergé au sein des locaux du LGP et de la plateforme PRIMES.

## Financement

Ce sujet est co-financé par la région Occitanie dans le cadre de l'AAP ÉMERGENCE 2024 et de l'Université de Technologie de Tarbes (UTTOD).

Le(la) doctorant(e) bénéficiera d'un contrat de travail de l'UTTOD pour une durée de 36 mois. **Salaires mensuel net, environ 1 687 €.**