

Evaluation de la fabrication additive métal utilisant le procédé de fusion sélective par laser appliquée aux prochaines générations de modules de puissance en aéronautique

Stéphane AZZOPARDI¹, Rabih KHAZAKA¹, Donatien MARTINEAU¹, Toni YOUSSEF¹,
Thanh Long LE¹, Elodie MARTIN², Joel ALEXIS²

¹SAFRAN - Safran Tech – Pôle Systèmes Electriques et Electroniques, 78114 Magny les Hameaux, France

²LGP, INP-ENIT 47 avenue d'Azereix BP 1629 65016 Tarbes Cedex, France

Résumé

La Fabrication Additive Métal (FAM) utilisant la technique de fusion sélective par laser (*Selective Laser Melting* -SLM-) a été investiguée afin d'envisager des solutions pour réduire le nombre d'étapes dans la fabrication des modules de puissance. Un alliage à base d'aluminium ($\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.6}$) a été utilisé dans le but de créer des fonctions additionnelles (ailettes de refroidisseur, connecteurs de puissance, broches, capteurs de courant et condensateur de découplage intégré au boîtier) directement sur un substrat en nitrure d'aluminium AlN avec métallisation aluminium (*Direct Bonded Aluminum* -DBA-). Afin de valider la viabilité de la solution proposée, l'impression de différents motifs sur les deux faces du substrat a été réalisée et les propriétés électriques, thermiques et mécaniques des pièces imprimées ont été évaluées, avec et sans traitement thermique. Cette technologie est ensuite employée pour la réalisation d'un premier module à refroidissement double face.

Mots clés: modules de puissance, alliage aluminium, fabrication additive métal, substrat fonctionnalisé

I. Introduction et Motivations

Les modules de puissance conventionnels [1-3] (figure 1a) peuvent présenter plusieurs inconvénients lorsqu'ils sont utilisés en environnements sévères. Ils sont traditionnellement constitués d'un substrat céramique métallisé sur lequel sont reportés les composants à semi-conducteur de puissance. L'autre face de ce substrat est en contact avec un dissipateur thermique couplé à un radiateur, via un matériau d'interface thermique (*Thermal Interface Material* -TIM). Ce matériau constitue une part élevée de la résistance thermique de l'assemblage (> 50%) et se dégrade rapidement à des températures supérieures à 150°C [4]. En plus du TIM, les autres matériaux organiques présents dans le module de puissance tel que le boîtier en polymère et son joint adhésif peuvent aussi limiter un fonctionnement à haute température. Les connecteurs brasés au substrat, la grande surface de brasure entre le substrat et le dissipateur de chaleur et la liaison par câblage filaire peuvent souffrir d'un manque de fiabilité dû aux sollicitations mécaniques et thermiques lors de l'utilisation du module en application. Par ailleurs, le condensateur de découplage et les capteurs de courant sont classiquement ajoutés à l'extérieur du module, bien que ces tendances semblent s'inverser [5].

Différents travaux présents dans la littérature utilisent la FAM pour réaliser la fabrication du système dissipateur/radiateur difficilement réalisable avec des procédés traditionnels (i.e. usinage) présentant des caractéristiques améliorées [6] ou des connectiques et pistes électriques sur un substrat céramique Al_2O_3 non métallisé [7].

Le but de cette étude est d'évaluer la FAM afin de fonctionnaliser le substrat métallisé, en imprimant directement sur ce dernier le dissipateur thermique, les

connecteurs, les broches et le boîtier double couche incluant le condensateur de découplage (figure 1b).

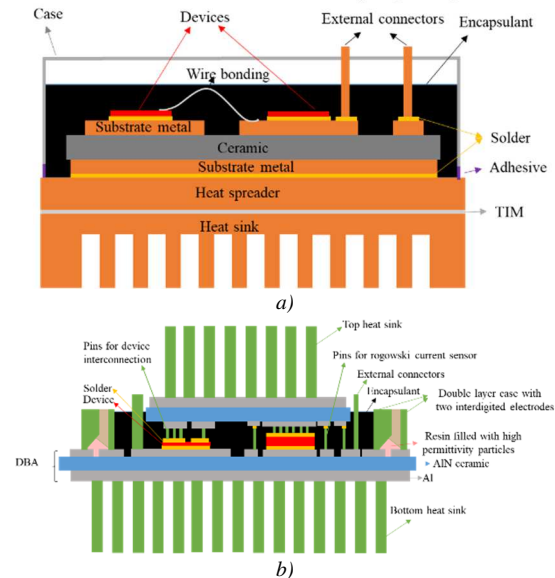


Figure 1 : a) Coupe d'un module de puissance conventionnel et b) de la structure proposée en simple ou double face (en vert, les parties qui sont directement imprimées sur la partie supérieure et inférieure du substrat).

Cette approche permet d'améliorer la fiabilité du module de puissance en éliminant le TIM et d'augmenter la puissance commutée en diminuant la résistance thermique du système. Cette technologie sera ensuite employée pour la réalisation d'un module de puissance à refroidissement double face.

II. Approche technique

Initialement, des modélisations thermo-fluidiques par éléments finis ont été réalisées pour évaluer l'impact de l'élimination du TIM sur la température de jonction d'un composant à semi-conducteur de puissance (figure 2).

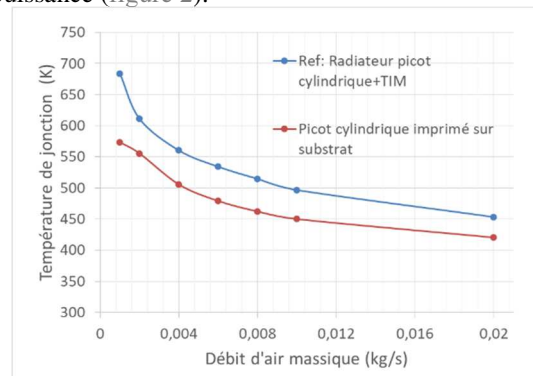


Figure 2 : Température de jonction des transistors MOSFET en fonction du débit d'air massique pour une solution référence de radiateur avec TIM face à une solution basée sur l'impression FAM SLM d'un radiateur sur un substrat céramique métallisé

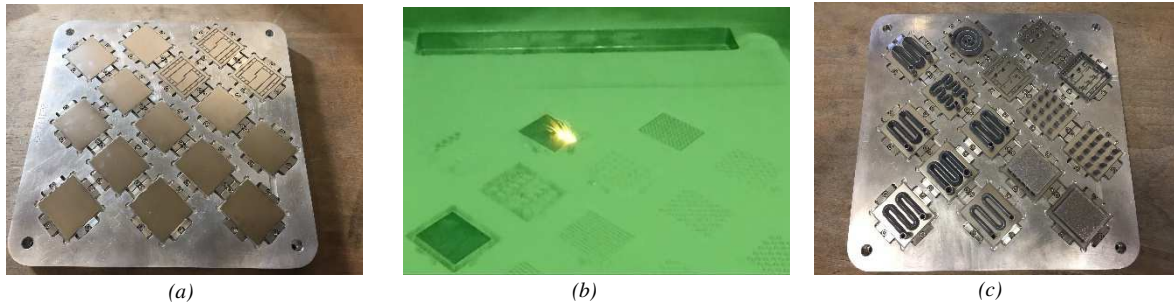


Figure 3 : Description des trois étapes principales du SLM pour les substrats métallisés (a) plateau accueillant les substrats céramique métallisés (des impressions se feront en face supérieure et d'autres en face inférieure), (b) laser fusionnant la poudre constituée de particules d'alliage AlSiMg de taille micrométrique, (c) résultats de l'impression en face supérieure (connecteurs, broches, boîtier) et inférieure des substrats (refroidisseur)

Pour cela, des picots cylindriques ont été modélisés directement sur un substrat céramique métallisé associé à un radiateur présentant les mêmes picots couplé à un TIM classique de $100\mu\text{m}$ d'épaisseur avec une conductivité thermique de 2 W/m.K [8]. La modélisation d'un module de puissance en fonctionnement a porté sur un bras d'onduleur $1200\text{V}@50\text{A}$ composé de 2 diodes Schottky SiC (pertes de 20W par composant) et de 2 MOSFET SiC (pertes de 40W par composant). Pour un flux d'air de refroidissement dans les picots des 2 systèmes modélisés fixé à $0,001\text{ kg/s}$ et à $0,02\text{ kg/s}$, la température de jonction peut être réduite d'une gamme entre 30°C et 110°C selon le débit d'air. L'élimination du TIM autorisée par l'impression du système de refroidissement par FAM SLM sur un substrat céramique métallisé permet une augmentation conséquente de la puissance dissipée.

Pour les essais expérimentaux, des substrats céramiques AlN métallisés Al commercialisés par DENKA ont été employés. Ces derniers sont disposés et bridés sur un plateau métallique spécifique (figure 3a) pour assurer leur immobilité lors du procédé de fabrication et un alignement avec la surface du plateau. La FAM SLM a été utilisée afin d'imprimer directement du métal successivement sur les deux côtés du substrat métallisé DBA. La technique SLM est très utilisée pour la fabrication additive des pièces métallique par ajout de couches successives. Elle permet aussi de limiter les pertes en matériaux qui peuvent être extrêmement désirables pour les matériaux chers et rares. Dans ce cas, une source de puissance issue d'un laser vient amener de l'énergie localement sur une poudre métallique déposée par couche mince (typiquement $<100\mu\text{m}$) pour réaliser sa fusion et densifier le matériau (figure 3b). La succession des étapes de dépôt de couche et leur densification permet d'obtenir l'objet avec la forme désirée. Cette séquence sera répétée jusqu'à ce que la partie fonctionnelle soit terminée du premier côté du substrat. Ensuite, les substrats sont retournés et le même processus est utilisé afin d'imprimer sur le deuxième côté (figure 3c). Une poudre d'alliage à base d'aluminium (AlSi7Mg0.6) a été spécifiquement sélectionnée pour maximiser la compatibilité avec les métallisations aluminium du substrat DBA.

La FAM SLM sur substrat céramique métallisé permet l'impression d'une diversité élevée de motifs géométriques (figure 4). Ainsi, ont été imprimés des dissipateurs thermiques à base de picots cylindriques ou elliptiques, mais également des formes complexes, comme des structures lattices, inaccessibles par des procédés d'usinage utilisé traditionnellement pour la fabrication des radiateurs.



Figure 4 : Exemple de différentes géométries de dissipateur thermique réalisées par FAM SLM; a) structure lattice, b) picots elliptiques, c) picots en forme de goutte, d) et e) picots rectangulaires, f) picots cylindriques

Différents essais avec des motifs spécifiques ont conduit à une rupture de la céramique présente dans le substrat lors du procédé FAM SLM (figure 5). Il en ressort une règle de conception qui consiste à éviter les motifs continus suivant une ou plusieurs directions du plan du substrat comme peuvent l'être des ailettes ou des canaux permettant de faire circuler un liquide de refroidissement à l'intérieur.



Figure 5 : Exemple de différentes géométries de dissipateur thermique réalisées par FAM SLM induisant une rupture de la céramique du substrat

La figure 6 illustre un exemple de dissipateur thermique, de broches, de boîtier et de connecteur imprimés des deux côtés du substrat DBA.

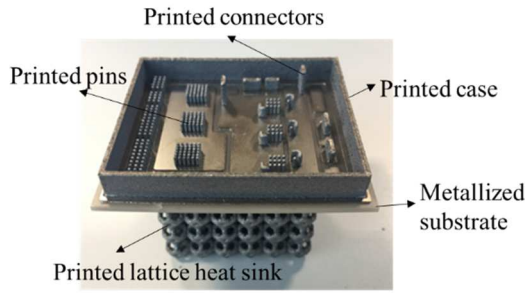


Figure 6 : Photo du substrat avec dissipateur thermique imprimé directement sur la face inférieure et boîtier, connecteurs et broches sur la face supérieure

III. Résultats et Discussion

La FAM SLM ne permet pas l'obtention d'un matériau massif similaire aux procédés d'élaborations traditionnels (fonderie, ...). Les pièces imprimées étant des dissipateurs thermiques, ou des connecteurs, elles doivent assurer un rôle thermique, électrique et mécanique. En conséquence, les propriétés thermiques, mécaniques et électriques du matériau imprimé ont été évaluées dans la plage de températures entre 20°C et 200°C

La résistivité électrique de l'alliage $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.6}$ a été caractérisée par micro-ohmmètre (Megger DLRO10HD). La valeur moyenne de celle-ci est de $7,2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ contre une résistivité de $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ pour Al massif (figure 7).

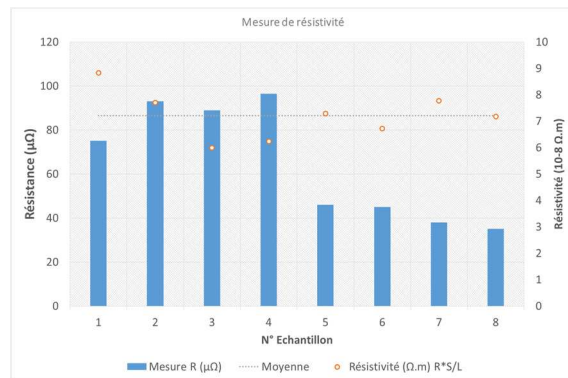


Figure 7 : Caractérisation de la résistivité électrique du matériau AlSiMg réalisé par FAM SLM

La conductivité thermique du matériau réalisé par FAM SLM doit être la plus grande possible pour assurer une dissipation thermique élevée par les radiateurs imprimés. Il a donc été décidé d'appliquer un traitement thermique particulier sur les éléments imprimés pour espérer améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du matériau. Les traitements thermiques traditionnels en métallurgie (i.e. trempe) ne sont pas envisageables de par la sensibilité aux chocs thermiques de la céramique au cœur des substrats. Un stockage thermique de 2h à 250°C a donc été privilégié.

La conductivité thermique a été caractérisée avant et après le traitement thermique par conductimètre flash laser Linseis LFA 500 Light-flash. Initialement, elle est en moyenne voisine de 127,4 W/mK, et augmente légèrement à 133,9 W/mK suite au traitement thermique (figure 8). En comparaison, elle est de 237 W/mK pour l'aluminium massif.

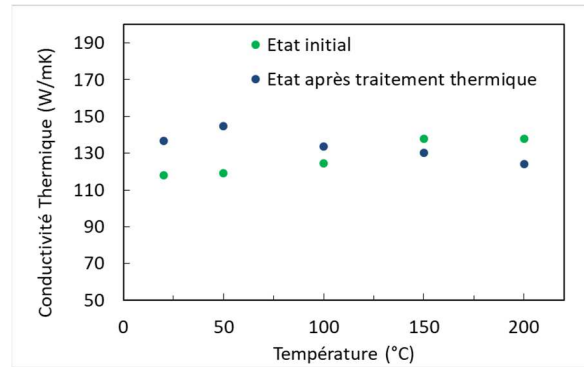


Figure 8 : Caractérisation de la conductivité thermique du matériau AlSiMg réalisé par FAM SLM avant et après traitement thermique

La caractérisation de la résistance à la traction ultime (*Ultimate Tensile Strength* – UTS) (figure 9) et la limite d'élasticité indique des valeurs toutes deux supérieures à l'alliage coulé traditionnel. Cela est dû d'une part à la microstructure à grains ultra fins favorisant le renforcement des joints de grains, d'autre part par les constituants qui induisent le renforcement structurel apporté par les interactions des dislocations. L'adhérence de l'alliage imprimé sur la métallisation du substrat a été évaluée à température ambiante en utilisant un test de cisaillement. Des valeurs élevées de contrainte de cisaillement supérieures à 100MPa ont été obtenues.

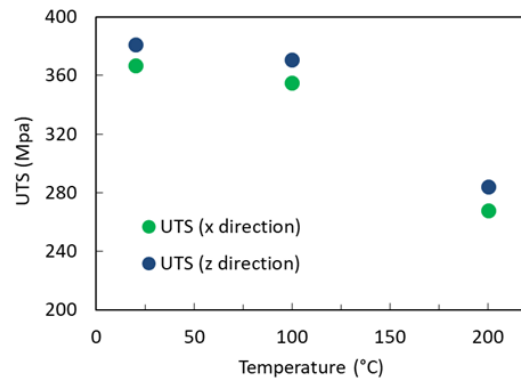


Figure 9 : Résumés montrant la résistance à la traction ultime (UTS) de l'alliage imprimé

L'effet du traitement thermique (2h à 250°C) sur la relaxation des contraintes a été évalué en mesurant la déformation du substrat obtenue avant et après traitement pour les substrats nus et les substrats avec dissipateur thermique imprimé (Figure 10). La réalisation par FAM SLM de géométries de motifs variés induit des niveaux de contraintes différents dans le substrat. Les dissipateurs présentant des éléments continus importants suivant une ou plusieurs directions du plan du substrat engendrent un niveau de contraintes important dans le substrat, illustré par une cambrure post-procédé élevée. Après le traitement thermique, les substrats initialement légèrement déformés ne présentent pas de modifications significatives. En revanche, le traitement thermique réduit la cambrure pour les substrats qui ont été déformés de manière significative. Cette relaxation des contraintes est liée au fluage de l'alliage à base d'aluminium à environ 40% de sa température de fusion.

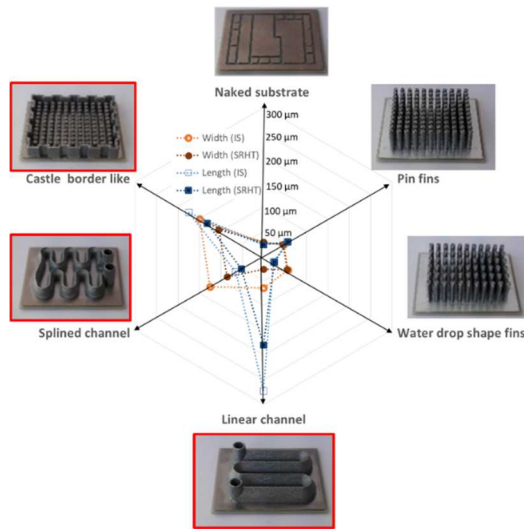


Figure 10 : Comparaison entre l'état initial (IS) et les mesures de gauchissement après traitement thermique (SRHT). Les bordures rouges entourent les substrats qui présentent une déformation supérieure à 100μm dans au moins une direction

Afin d'évaluer les caractéristiques thermiques et électriques de cette technologie appliquée aux modules de puissance double face, des travaux sur l'interconnexion des surfaces aluminium (face avant des composants à semi-conducteur de puissance) ont été engagés.

Cependant, et afin d'initier les premiers tests suite à la réalisation de connectiques et dissipateurs thermiques sur les substrats céramiques métallisés, une diode SiC a été reportée à l'aide d'une colle époxy chargée en particules d'argent pour former un premier module de puissance à refroidissement double face (figure 11). Les caractéristiques électriques sont validées au niveau des contacts des plots aluminium imprimés mais ne sont pas très représentatives du fait de la faible conductivité électrique de la colle époxy chargée en particules d'argent et donc la forte résistance à l'état passant présentée par le module. Ces travaux se poursuivent pour optimiser le report double face des composants à semi-conducteur de puissance.

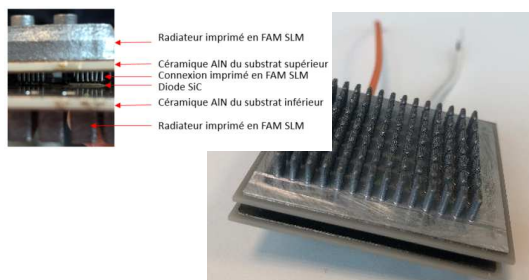


Figure 11 : Module de puissance (diode SiC reportée sur les plots imprimés sur un des substrats) à refroidissement double face réalisé par FAM SLM sur substrat céramique métallisé.

III. Conclusion

Ces travaux visent à développer des modules de puissance utilisant la fabrication additive métal notamment la technique « *Selective Laser Melting* » SLM sur lit de poudre pour faire le radiateur, les connectiques électriques, et le boîtier avec un alliage à base aluminium (AlSiMg) directement sur un substrat en céramique AlN métallisé en Al. Après avoir validé l'impression d'un refroidisseur air ou liquide sur une face du substrat céramique métallisé, le plateau d'accueil a été retravaillé afin de pouvoir retourner le substrat et effectuer une impression sur la face opposée. Les connectiques de puissance, le boîtier, ainsi que les picots d'interconnexion pour les composants à semi-conducteur de puissance ont été imprimés avec succès. L'adhésion entre le matériau imprimé et le substrat a été évalué et s'avère très satisfaisante. La géométrie du radiateur imprimé impacte directement la déformation du substrat et des recommandations concernant des règles de design ont été proposées. Un traitement thermique a permis de réduire la déformation des substrats et relaxer une partie des contraintes induites par le procédé de fabrication.

Les travaux se poursuivent pour évaluer les interconnexions sur surface aluminium afin de réaliser des modules double face.

IV. Références

- [1] R. Schnell et al. "LinPak, a new low inductive phase-leg IGBT module with easy paralleling for high power density converter designs," PCIM 2015; pp. 1–8.
- [2] K. Takao et al. "Ultra low inductance power module for fast switching SiC power devices," ISPSD, 2015, pp. 313–316. [1]
- [3] S. Li "Packaging Design of IGBT Power Module Using Novel Switching Cells", Ph.D dissertation, University of Tennessee - Knoxville, December 2011.
- [4] R. Skuriat, et al. "Degradation of thermal interface materials for high-temperature power electronics applications", Microelectronics Reliability, Vol. 53, pp. 1933–1942, 2013.
- [5] B. Cougo et al « Characterization of low inductance SiC module with integrated capacitors for aircraft applications requiring low losses and low EMI issues" IEEE Trans. Power Electronics, Sept. 2020
- [6] E. M. Dede, et al. "Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink" Journal of Mechanical Design, vol. 137, pp. 1-9, 2015.
- [7] A. Syed-Khaja, et al. "Investigations in Selective Laser Melting as Manufacturing Technology for the Production of High-temperature Mechatronic Integrated Devices" 2016 IEEE International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, pp. 247-250, 2016
- [8] R. Khazaka, et al., "Direct Printing of Heat Sinks, Cases and Power Connectors on Insulated Substrate Using Selective Laser Melting Techniques", IEEE 69th ECTC, 2019.