

Proposition de sujet de thèse

Modélisation des interconnexions des puces semiconductrices par mousses métalliques

Contacts : Mickael PETIT, laboratoire SATIE, mickael.petit@lecnam.net

Justin DIRRENBARGER, laboratoire PIMM, justin.dirrenberger@lecnam.net

Les enjeux liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'à la raréfaction des ressources sont au cœur des préoccupations sociétales 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 bien d'autres pays européens, le processus de transition énergétique est d'ores et déjà lancé avec notamment à partir de 2035, l'interdiction de la vente de voitures thermiques (Loi n°2019-1428 du 24/12/2019). Dans ce secteur, l'électronique de puissance joue un rôle primordial car elle permet la gestion des échanges énergétiques entre les batteries de stockage et la motorisation de traction. Bien que cette électronique soit très efficace, une réduction des pertes qu'elle génère reste un objectif indispensable.

Afin d'accroître le rendement des convertisseurs statiques liés, les concepteurs utilisent de plus en plus de transistor à grand gap, notamment le GaN. Leur rapidité de commutation diminue les pertes dans le convertisseur et leur faible surface contribue à la réduction des courants parasites [1]–[3]. Cependant, les fortes variations de courant qu'ils génèrent produisent des surtensions dès lors que le circuit électrique est légèrement inductif. De ce fait, les interconnexions entre les différentes puces de puissance formant le convertisseur doivent être les plus courtes possible. L'enfouissement des puces au sein de leur substrat PCB permet de répondre, au moins partiellement, à cette problématique.

Si l'accroissement des performances électriques des convertisseurs est un premier enjeu, leur fiabilisation en est un second. L'utilisation de brasures dans les empilements PCB permet une accroche mécanique importante mais reste fragile pour une charge thermomécanique importante [4]. Diverses techniques de reprises de contact ont été étudiées par le passé, notamment par brasure [5], [6], micro-via électrodéposés [6] ou, comme nous le proposons au laboratoire SATIE, par mousses métalliques [7], [8]. Ces études ne se sont intéressées qu'aux aspects électriques et de vieillissement des assemblages [9]. Les aspects refroidissements n'ont été traité qu'à travers des études de résistance thermique des assemblages en supposant un refroidissement externe au PCB.

Le sujet de thèse proposé vise à étudier les méthodologies de reprise de contact entre la puce et les conducteurs du PCB en se basant sur une technologie développée au laboratoire SATIE : la reprise de contact par mousse métallique.

La technique de reprise de contact par mousse, développée par le laboratoire SATIE, est propice à la réalisation de convertisseurs économiques, par la simplicité de réalisation des assemblages. En effet, elle ne nécessite que des équipements classiques pour un fabricant de PCB. Elle possède des performances électriques, proches des assemblages de type modules industriels [10]. Cependant, elle souffre d'un problème de fiabilité. En effet, comme le montre Saïd Bensebaa dans sa thèse de doctorat, la résistance électrique des interconnexions augmente régulièrement en appliquant des cyclages thermiques typiques des vieillissements accélérés. Une cause, mise en évidence dans ces travaux, est une rupture partielle des contacts par déformation du PCB, comme le montre la Figure 1.

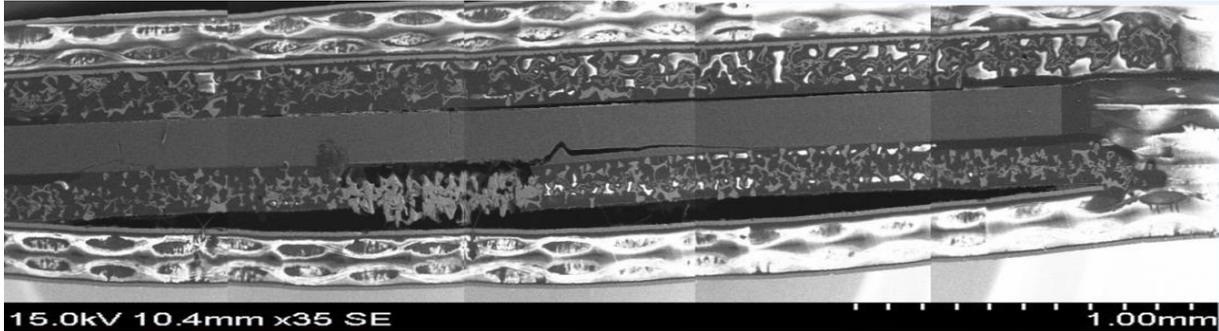


Figure 1 Puce semiconductrice au cœur d'un PCB après vieillissement, reprise de contact par mousse métallique

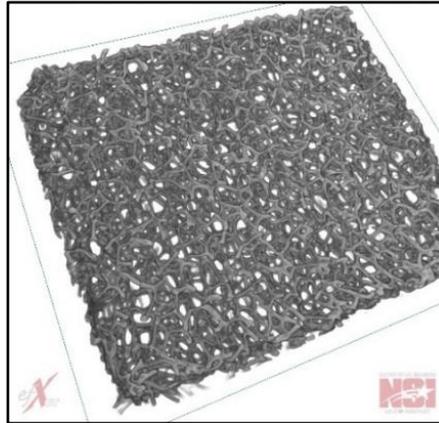


Figure 2 Image tomographique d'une mousse métallique

Un des objectifs de la thèse proposée ici est de comprendre les mécanismes qui engendrent ces déformations. Cependant, les mousses métalliques possèdent des géométries complexes et aléatoires les rendant difficiles à modéliser. La compréhension des phénomènes d'endommagement nécessitera donc une modélisation fine de ces mousses. Une approche par homogénéisation numérique du comportement [11], [12] sera mise en œuvre, en lien avec des analyses morphologiques par tomographie 3D (Figure 2). Ces modèles, développés au laboratoire PIMM, permettront de prédire les caractéristiques électriques, thermiques et mécaniques des mousses métalliques avant et après laminage.

Le procédé de fabrication des PCB « classiques » est basé sur la fusion sous pression, et température contrôlée, de feuilles de fibre de verre pré imprégnées de résine époxy (Pré-preg FR4). Lors de la phase de refroidissement des contraintes thermomécaniques résiduelles naissent au cœur du circuit imprimé laminé. Un second objectif de la thèse sera de prédéterminer ces contraintes résiduelles et d'imaginer des solutions pour les diminuer. Un troisième volet des travaux de thèses permettra de tenir compte à la fois du PCB mais aussi des puces enfouies et de leur connectique à base de mousse. En effet, lors du laminage du PCB, la mousse subit une déformation plastique et ajoute des contraintes résiduelles. Le ou la doctorante mettra en évidence l'impact de ces contraintes résiduelles sur le vieillissement des convertisseurs enfouis.

Références bibliographiques :

- [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] L. Dupont, « Contribution à l'étude de la durée de vie des assemblages de puissance dans des environnements haute température et avec des cycles thermiques de grande amplitude ».
- [5] C. Buttay *et al.*, « Application of the PCB-Embedding Technology in Power Electronics – State of the Art and Proposed Development », in *2018 Second International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM)*, juin 2018, p. 1-10. doi: 10.1109/3DPEIM.2018.8525236.
- [6] « p² Pack® - SCHWEIZER ELECTRONIC AG ». https://www.schweizer.ag/en/products-solutions/embedding/p2_Pack_en.html (consulté le 6 décembre 2019).
- [7] « TEL - Thèses en ligne - Intégration dans un substrat PCB de composants à semi-conducteur grand gap pour le développement d'un convertisseur d'électronique de puissance à forte densité ». <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02275807> (consulté le 6 décembre 2019).
- [8] Y. PASCAL, A. Amar, D. Labrousse, M. Petit, S. Lefebvre, et F. Costa, « Using Laminated Metal Foam as the Top-Side Contact of a PCB-Embedded Power Die », *IEEE Electron Device Lett.*, 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2748223.
- [9] S. Bensebaa, M. Berkani, S. Lefebvre, M. Petit, N. Schmitt, et S. Zhang, « Reliability study of PCB-embedded power dies using solderless pressed metal foam », *Microelectron. Reliab.*, vol. 114, p. 113904, nov. 2020, doi: 10.1016/j.microrel.2020.113904.
- [10] S. Bensebaa, « Etude de la Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans un circuit imprimé PCB », Thèse de doctorat, université Paris-Saclay, 2022. Consulté le: 14 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2022UPAST162>
- [11] F. Albertini, J. Dirrenberger, C. Sollogoub, T. Maconachie, M. Leary, et A. Molotnikov, « Experimental and computational analysis of the mechanical properties of composite auxetic lattice structures », *Addit. Manuf.*, vol. 47, p. 102351, sept. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102351.
- [12] J. Dirrenberger, S. Forest, et D. Jeulin, « Computational Homogenization of Architected Materials », in *Architected Materials in Nature and Engineering: Archimats*, Y. Estrin, Y. Bréchet, J. Dunlop, et P. Fratzl, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 89-139. doi: 10.1007/978-3-030-11942-3_4.