

# Caractérisation Thermoélectrique et Thermomécanique d'Assemblages PCB Intégrant des Puces de Puissance

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

La Revue  
3E.I

Mounira BOUARROUDJ<sup>1,2</sup> - Mickaël PETIT<sup>1</sup> - Said BENSEBAA<sup>1,4</sup>  
Stéphane LEFEBVRE<sup>1</sup> - Nicolas SCHMITT<sup>2, 3</sup>

Édité le  
29/01/2024

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

<sup>1</sup> SATIE, ENS Paris-Saclay, CNRS, UCP, Cnam, 91190, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup> Université Paris Est Créteil UPEC, 94000 Créteil, France

<sup>3</sup> LMPS, ENS Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

<sup>4</sup> Synchrotron SOLEIL, Gif-sur-Yvette, France

*Cet article fait partie du N° 111 de La Revue 3EI de janvier 2024.*

Un procédé d'intégration PCB (printed circuit board) basé sur l'utilisation d'une mousse métallique pressée pour assurer le contact électrique des puces de puissance est présenté. Ce procédé permet de réduire l'inductance parasite qui est liée aux connectiques (fils de bonding), il permet également de réduire les contraintes mécaniques dans la puce comparée à un assemblage avec prise de contact face arrière par brasure. Le principal avantage de ce procédé est la simplicité de sa réalisation et son faible coût.

Cet article propose une description du procédé de fabrication suivie d'une partie de caractérisation électrique et thermique des différents contacts et matériaux utilisés dans l'assemblage. À l'issue de cette étude un choix du matériau approprié est effectué (Mousse Nickel et/ou cuivre), enfin des résultats de tenue au cyclage passif sont présentés.

## 1 - Introduction

Les modules de puissance standards utilisant les fils de bonding, figure 1, pour la prise de courant présentent certaines limitations, à savoir : i) l'inductance parasite (de l'ordre de 5 à 20 nH) qui génère des surtensions lors des commutations, particulièrement pour les composants à grand gap (GaN), ii) une limitation thermique, où la dissipation de la chaleur se fait uniquement par la face arrière, iii) en terme de fiabilité, ces fils présentent une zone de fragilité limitant ainsi la durée de vie de ces modules.

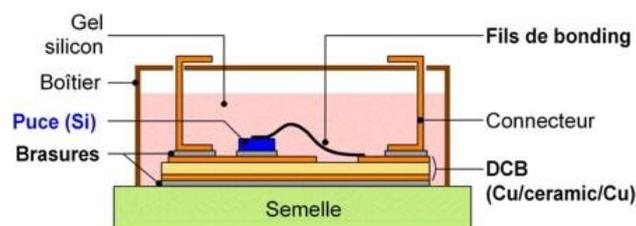


Figure 1 : Assemblage montrant les connectiques (fil de bonding en face avant et brasure en face arrière) de la puce dans un assemblage de puissance standard.

L'enfouissement des puces au cœur du PCB semble être une alternative intéressante en vue de remédier aux contraintes énoncées précédemment. Dans ce cas, l'amenée de courant se fait généralement par des Vias en cuivre réalisés par électro déposition et la puce est brasée sur le substrat PCB [1][2]. L'utilisation de la mousse métallique pour assurer le contact supérieur de la puce a été vérifiée et peut être une alternative simple et pas chère [3]. Dans cet article, nous

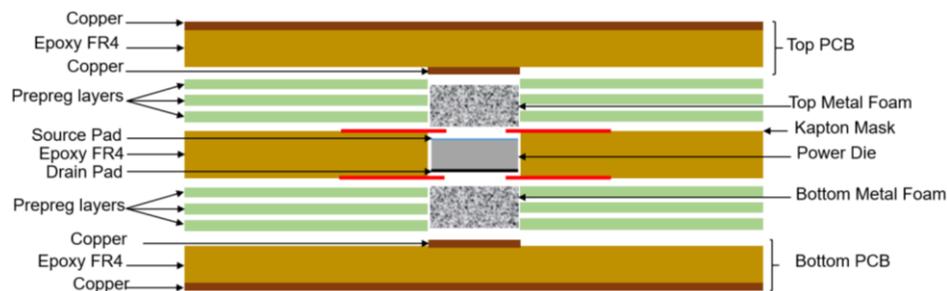
proposons un assemblage pour les puces enfouis au cœur du PCB avec une prise de contact supérieur et inférieur assurée par des mousses métalliques pressées sans l'utilisation de brasure. Nous présentons des travaux de caractérisations électriques et thermiques de l'assemblage ainsi que des résultats de tests de vieillissement thermiques passifs selon les normes PCB [MIL-STD-883E].

## 2 - Procédé d'intégration

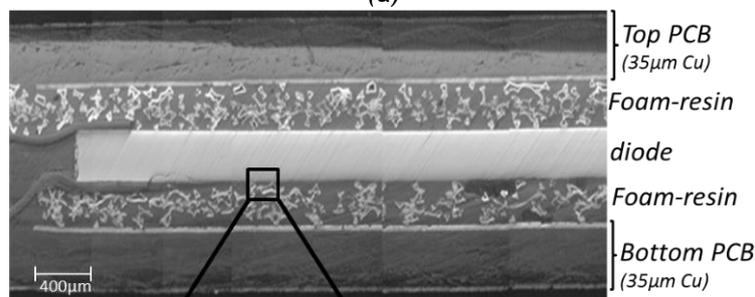
L'assemblage proposé comprend une diode enfouie entre deux mousses métalliques au cœur du PCB. Ces mousses assurent le contact entre les faces avant et arrière de la puce. Le procédé peut être décrit en deux étapes. La première étape, figure 2.a, consiste à effectuer un empilement de bas en haut des couches suivantes :

- PCB inférieur (Bottom PCB),
- Mousse métallique (Contact inférieur), entourée par des couches de Prepreg,
- Puce,
- Mousse métallique (Contact supérieur) entourée par des couches de Prepreg,
- PCB supérieur (Top PCB).

La deuxième étape consiste à laminer cet empilement de matériaux sous des conditions de pression et de température bien spécifiées (des conditions fournis par le fabricant des couches de Prepreg, voir figure 3). Cette étape est effectuée dans une presse (LPKF MultiPress S).



(a)



(b)

Figure 2 : a) Schémas du procédé d'intégration proposé, b) Coupe microscopique d'une diode intégrée au cœur du PCB, avec zoom sur la zone de contact, observation au MEB (Microscope Electronique à Balayage).

La mousse utilisée sur la face avant ne doit pas court-circuiter la métallisation de la puce et l'anneau de garde. Pour cela un masque isolant en Polyimide est ajouté, il permet de spécifier la surface de contact entre mousse et puce, il peut également d'être utilisé pour isoler la grille et la source dans le cas des transistors. Pour des raisons de symétrie, le masque est également ajouté sur la face arrière de l'assemblage. La figure 2.b présente le schéma de l'assemblage ainsi qu'une micro-section de la zone de contact entre la mousse et puce (observation au MEB).

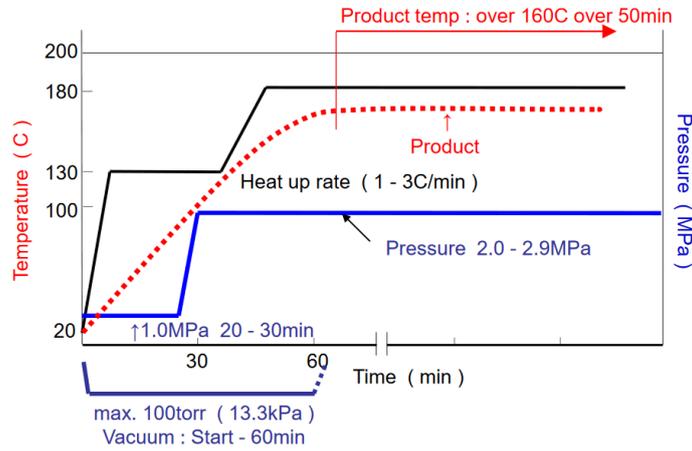


Figure 3 : Recommandations générales sur les conditions de pression et de température appliqués au niveau de la machine de pressage [4].

### 3 - Caractérisation électrique et thermique

Après laminage, la résine contenue dans le Prepreg pénètre à l'intérieur de la mousse, générant ainsi un nouveau matériau composite (mousse-résine). Les propriétés physiques de ce mélange doivent être déterminées si l'on souhaite estimer la robustesse et les contraintes induites dans cet assemblage. La qualité des contacts entre les différentes couches doit être également évaluée. La démarche et les résultats de ces travaux de caractérisations sont détaillés dans cette section.

#### 3.1 - Caractérisation thermique

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser les propriétés thermiques du matériau composite obtenu après laminage (constitué d'un mélange de mousse pressée et de la résine). Dans un second temps, nous avons estimé les résistances thermiques de contact.

##### 3.1.1 - Protocole de mesure

Le banc d'essais utilisé est illustré sur la figure 4 [5], où l'échantillon à caractériser est placé entre deux plaques de cuivre (cuivre supérieur et inférieur) à l'intérieur desquelles une sonde de température PT100 est insérée. Cet ensemble est monté sur un cylindre à base de duralumin ayant une résistance thermique connue  $R_{th\_duralumin}$  (préalablement calibrée). Ce cylindre comporte également deux sondes de température PT100 pour la mesure des températures aux extrémités ( $T_{Top-dur}$  et  $T_{bottom-dur}$ ). Cela permet ainsi de mesurer le flux de chaleur qui le traverse. Le dispositif est considéré thermiquement isolé. Sous cette hypothèse, le flux de puissance,  $P$ , mesuré dans le cylindre est égal à celui qui traverse l'échantillon. Il peut être exprimé par l'équation (1).

$$P = \frac{T_{Top-dur} - T_{bottom-dur}}{R_{th\_duralium}} \quad (1)$$

Connaissant la puissance qui traverse l'échantillon ainsi que la température entre ses bornes (en haut et en bas des plaques de cuivre), on pourra alors calculer la résistance thermique de l'échantillon avec l'équation (2).

$$R_{th\_measured} = \frac{T_{top-copper} - T_{bottom-copper}}{P} \quad (2)$$

Pour assurer un meilleur transfert de chaleur entre les plaques de cuivre et l'échantillon, des interface thermique (TIM) sont insérées. Par conséquent, et afin d'obtenir uniquement la résistance de l'échantillon, les résistances thermiques de ces TIM ont d'abord été caractérisées puis soustraites de la résistance mesurée, voir équation (3).

$$R_{th\_sample} = R_{th\_measured} - 2 \cdot R_{th\_TIM} \quad (3)$$

Les résistances thermiques des plaques de cuivre sont négligées (0,0015 et 0,0025 K/W) devant celles de l'échantillon à caractériser. Les résultats sont enregistrés directement sur MATLAB Simulink®, avec un contrôle instantané de la puissance et de la température dans le dispositif.

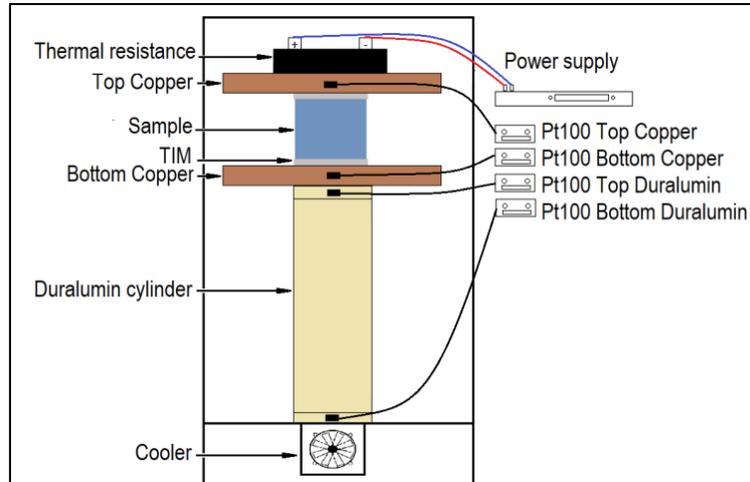


Figure 4 : Schémas du dispositif de mesure de la résistance thermique.

### 3.1.2 - Caractérisation thermique du mélange mousse-résine

La conductivité thermique du mélange mousse-résine dépend de plusieurs paramètres structuraux, tels que la porosité, la densité relative et la taille des pores de la mousse. Afin d'évaluer l'effet de la proportion de la mousse dans le mélange mousse-résine sur la conductivité thermique, des échantillons sont réalisés avec différentes épaisseurs. L'épaisseur finale de l'échantillon dépend de la pression appliquée lors du pressage, plus elle augmente plus la densité de la mousse dans le mélange augmente. Avant pressage, la densité moyenne initiale de la mousse (solide / air) est connue, ce qui permet de déduire le volume de mousse ( $V_{foam}$ ) et le volume d'air ( $V_{air}$ ). Lors du pressage, la résine remplace l'air, donc le volume de résine qui pénètre dans la mousse est égal au volume d'air. Lorsqu'une pression est appliquée sur l'échantillon, le volume de mousse ( $V_{foam}$ ) est toujours le même, mais le volume de résine diminue ( $V_{resin}$ ). Ainsi, le rapport entre le volume de mousse ( $V_{foam}$ ) et le volume total ( $V_{foam} + V_{resin}$ ) du mélange mousse-résine augmente. Cette fraction volumique ( $X$ ), est donnée par l'équation (4).

$$X = \frac{V_{foam}}{V_{foam} + V_{resin}} \quad (4)$$

La conductivité thermique  $\lambda$  mesurée est ainsi exprimée en fonction de la fraction volumique  $X$ . Les résultats obtenus pour le mélange mousse Cuivre-résine sont représentés sur la figure 5.

La conductivité thermique du mélange augmente avec l'augmentation de la fraction volumique, ce qui est logique, car la conductivité thermique du mélange augmente lorsque la densité du cuivre augmente. Les résultats obtenus sont comparés avec le modèle de conductivité thermique "Bhattachaya" d'une mousse à pores ouverts [6], équation (5).

$$\lambda_{eff} = M \cdot (zK_f + (1 - z) \cdot K_s) + \frac{1 - M}{\left(\frac{z}{K_f} + \frac{1 - z}{K_s}\right)} \quad (5)$$

Où  $K_s$  et  $K_f$  représentent la conductivité thermique du métal et du fluide respectivement,  $z$  la proportion du métal dans le mélange et  $M$  est à déterminer expérimentalement.

Néanmoins, on observe que pour une forte proportion de cuivre ( $X_{cu}=0.7$ ), la conductivité thermique mesurée est très faible (4.5 W/mK) par rapport à celle du cuivre solide (400 W/mK). Cela est probablement dû à la résistance thermique des contacts entre les différentes couches de l'assemblage.

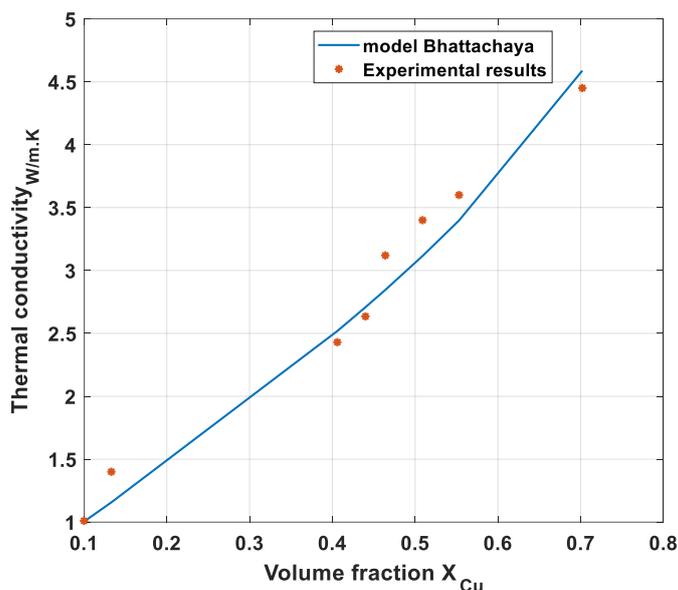


Figure 5 : Conductivité thermique  $\lambda$  du mélange mousse Cuivre-résine en fonction de la fraction volumique ( $X_{cu}$ ).

### 3.1.3 - Caractérisation thermique du contact Mousse-Puce

La deuxième partie de la caractérisation thermique consiste à étudier le contact thermique entre la puce et la mousse. Pour cela, la résistance thermique  $R_{th(j-case)}$  (jonction-refroidisseur) de l'assemblage est mesurée. Pour effectuer cette mesure, on polarise la puce, cette dernière dissipe une puissance ( $P$ ). La température du refroidisseur est mesurée avec une sonde de température PT100 et celle de jonction est obtenue en utilisant un paramètre électrique thermosensible (TSEP), basé sur la tension directe  $V_f$  de la diode à l'état passant. En effet, il existe une dépendance linéaire entre la tension directe et la température de jonction au niveau de la puce (environ  $-2mV/^\circ C$  pour les composants à base de Silicium). Ainsi, pour obtenir l'image de la température de jonction, un faible courant est injecté (2 mA) dans la puce et la mesure de  $V_f$  fournit l'image de la température (figure 6).

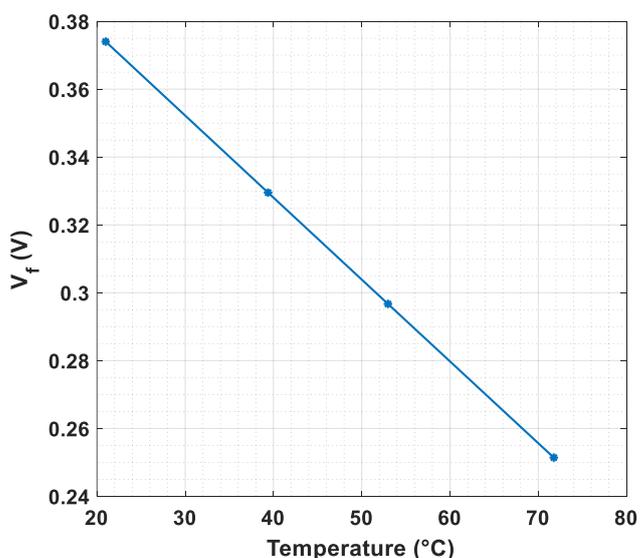


Figure 6 : Résultats de caractérisation de la tension de seuil  $V_f$  (évolution de  $V_f$  en fonction de la température  $T$ ).

Une calibration préalable de l'évolution de la tension  $V_f$  en fonction de la température est réalisée en utilisant un conditionneur thermique. Les résultats de caractérisation sont donnés par l'équation (6).

$$\frac{\Delta V_f}{\Delta T} = -2,412 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6)$$

La diode possède deux terminaisons différentes, à savoir une métallisation en aluminium sur la face supérieure et une terminaison nickel sur la face inférieure. Le refroidissement par face avant ou arrière peut donc conduire à des résultats différents. Nous avons cherché à caractériser le transfert thermique par les deux faces. Le dispositif de mesure est présenté dans la figure 7. La diode est polarisée en direct et dissipe une puissance contrôlée avec MATLAB Simulink®. Dans un premier temps, le refroidissement se fait par la face avant afin de caractériser le contact supérieur (Al/mousse). Dans un second temps il se fait par la face inférieure pour caractériser le contact Ni/mousse.

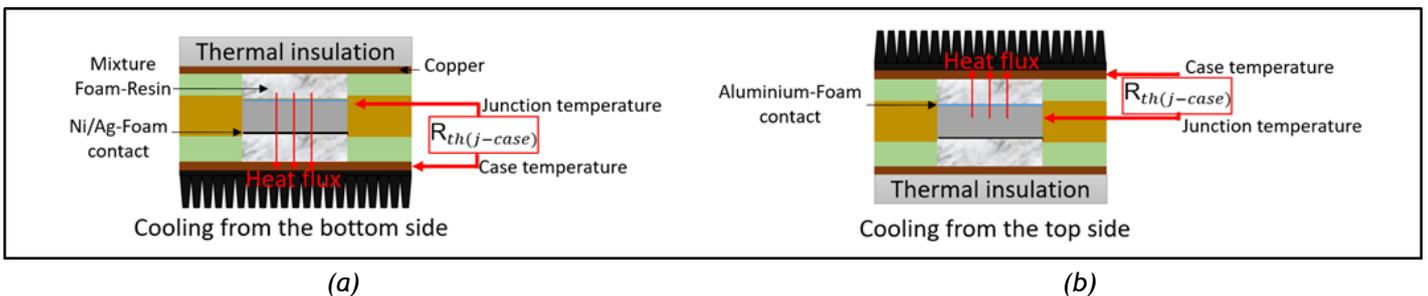


Figure 7 : Dispositif de mesure de  $R_{th(j-case)}$ , (a) Refroidissement par face arrière, (b) refroidissement par face avant

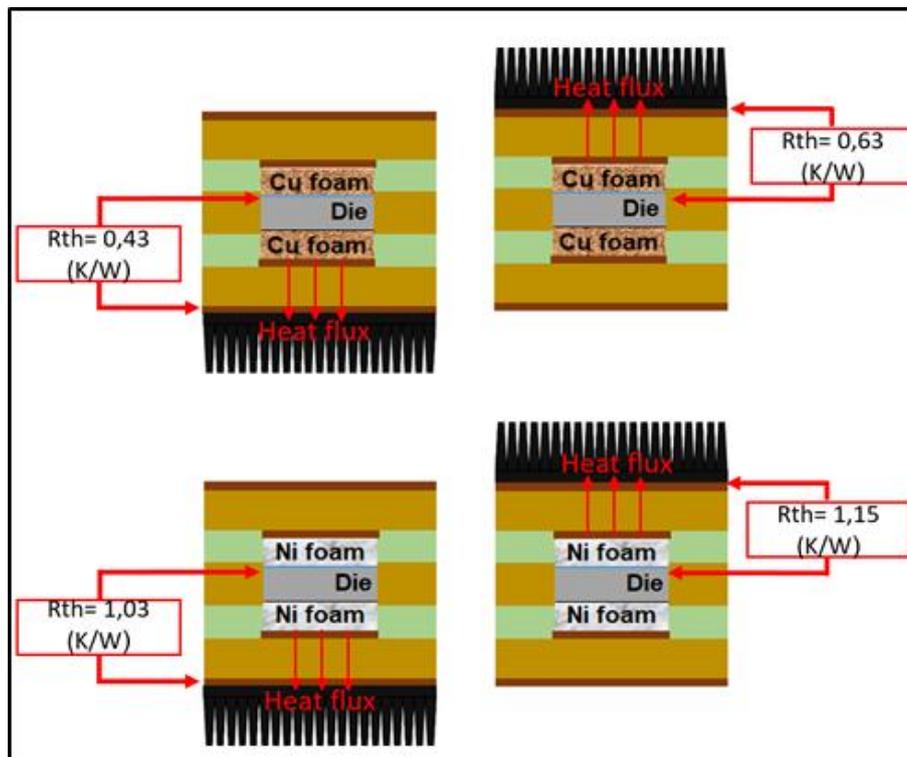


Figure 8 : Résultats de mesure de la résistance thermique  $R_{th(j-case)}$

Comme indiqué sur la (figure 8), la résistance thermique mesurée  $R_{th(j-case)}$  est plus faible lorsqu'on refroidit par la face arrière et cela quelle que soit la nature de la mousse (cuivre ou nickel). Ce résultat peut être lié à la nature des contacts entre mousse et puce (Ni/Ag face arrière, Al face avant) et/ou à la présence d'anneaux de garde sur la face avant de la puce, ce qui réduit la surface de transfert de chaleur entre la puce et la mousse. De plus, l'utilisation de la mousse de cuivre

permet de réduire la résistance thermique par un facteur de 2 par rapport à la mousse nickel. Ainsi, d'après ces résultats, pour maximiser le transfert de chaleur, il est préférable de refroidir par la face arrière et d'utiliser une mousse pressée à base de cuivre.

### 3.2 - Caractérisation électrique

Les caractéristiques statiques directes des diodes intégrées ont été tracées à l'aide d'un traceur de courbe Tektronix 371 (mesure 4 fils), (figure 9.a). La résistance électrique à l'état passant de l'assemblage représente la pente de la courbe  $I_F = f(V_F)$  pour un courant donné (dans notre cas 40 A, voir figure 9.b).

Dans un premier temps, des assemblages utilisant le même type de mousse sur les deux faces ont été caractérisés (soit Nickel/Nickel ou Cuivre/Cuivre). Les résultats obtenus sont également comparés aux assemblages utilisant une mousse en Nickel sur la face avant et une brasure sur la face arrière [5]. Ces derniers montrent une résistance électrique équivalente à celle des assemblages utilisant une mousse en cuivre sur les deux faces.

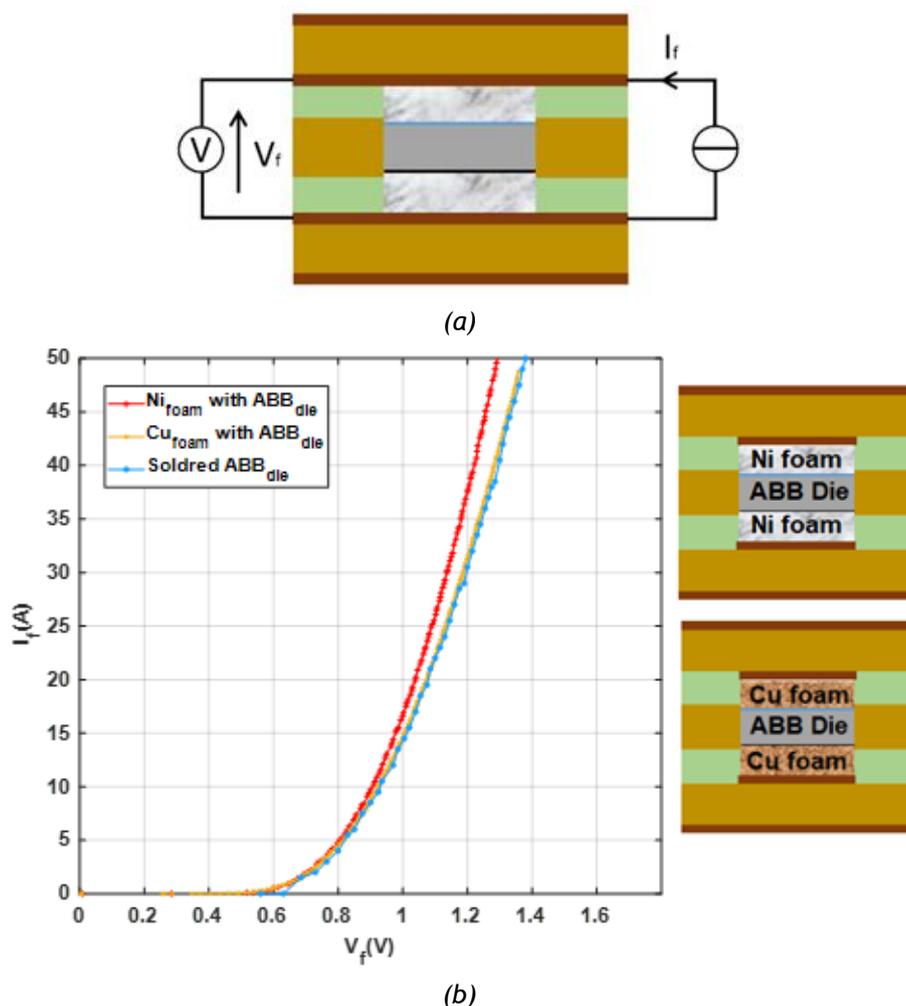


Figure 9 : (a) Circuit de mesure 4 fils, (b) caractéristiques statiques directes  $I_F = f(V_F)$  des assemblages utilisant uniquement de la mousse (Cuivre ou Nickel) et ceux utilisant mousse Nickel face avant et brasure face arrière.

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 1, ils montrent que les assemblages qui utilisent la mousse en Nickel sur les deux faces possèdent une résistance plus faible comparée à celle obtenue dans le cas des assemblages qui utilisent la mousse en Cuivre. Ce résultat est contradictoire puisque le cuivre est moins résistif que le nickel. On présume alors que le problème n'est pas lié au type de mousse, mais probablement à la nature des contacts aux interfaces entre mousse et puce.

Tableau 1 : Résistances directes moyennes des assemblages (calculées pour un courant de 40 A)

	Echantillons avec mousse Nickel des deux faces	Echantillons avec mousse Cuivre des deux faces	Echantillons avec mousse Nickel et brasure
Résistance (mΩ)	7,4	9,09	9

Dans un second temps, la résistance électrique de contact entre la mousse métallique et les deux faces de la puce est étudiée (métallisation Aluminium sur la face avant et métallisation Nickel sur la face arrière). Pour cela, on a réalisé des assemblages où la puce a été remplacée par un métal ayant les mêmes dimensions que la puce : i) Métal en Al qui correspond à la métallisation avant de la puce et ii) un métal en Al nickelé, ce qui correspond à la métallisation arrière de la puce. La couche de revêtement doit être fine, afin d'avoir approximativement la même résistance électrique pour de l'aluminium et de l'aluminium nickelé (afin d'être représentatif de la terminaison arrière d'une puce).

Dans ce cas, la résistance mesurée représente la somme des résistances du métal, des mousses et des différents contacts entre mousse et métal, tel qu'indiqué dans la figure 10. Les courbes  $I=f(V)$  obtenues pour les différents assemblages réalisés sont présentées sur la figure 11.

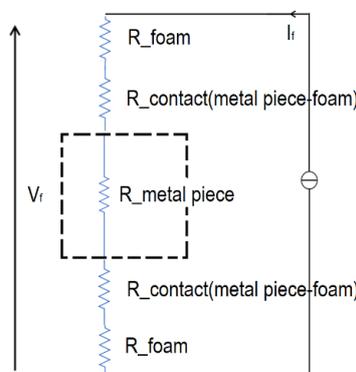


Figure 10 : Différentes résistances dans l'assemblage.

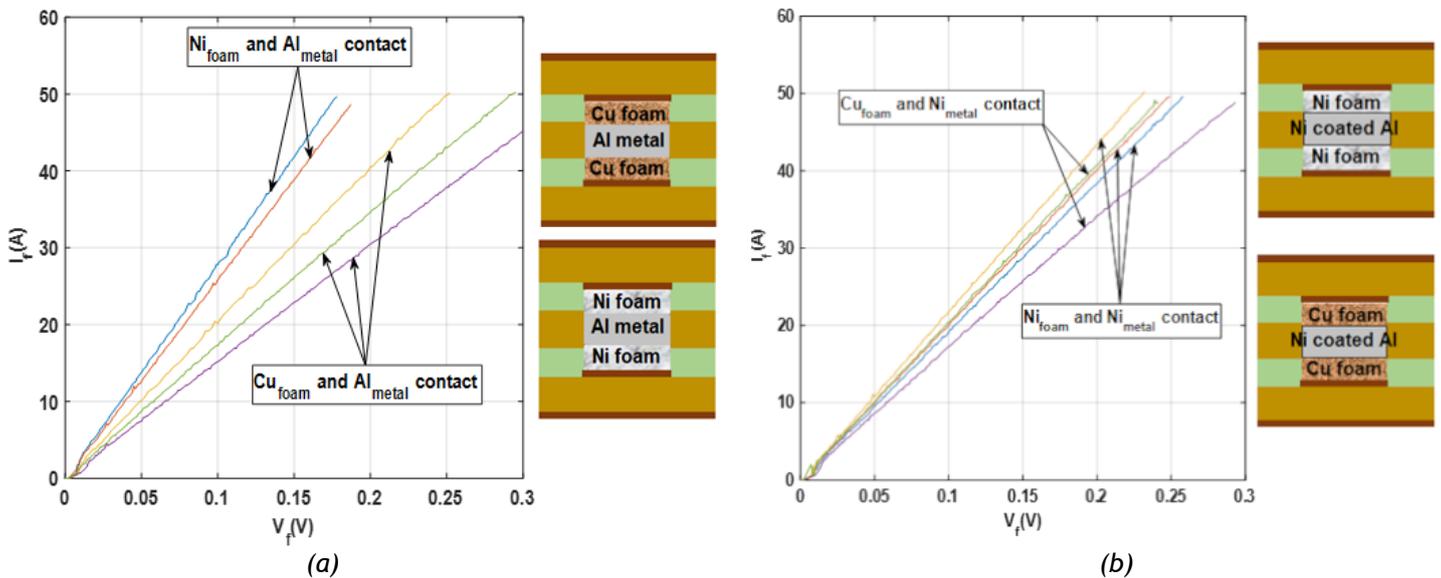


Figure 11 : (a) Caractéristique statique direct des contacts  $Cu_{foam}-Al_{m\acute{e}tal}$  et  $Ni_{foam}-Al_{m\acute{e}tal}$ ,  
(b) Caractéristique statique direct des contacts  $Ni_{foam}-Ni_{m\acute{e}tal}$  et  $Cu_{foam}-Ni_{m\acute{e}tal}$ .

Les résultats sont résumés dans le Tableau 2, ils indiquent que le contact  $Cu_{foam}/Al_{m\acute{e}tal}$  possède une résistance électrique plus élevée, environ 1,5 fois, que le contact  $Ni_{foam}/Al_{m\acute{e}tal}$ . De ce fait, il est préférable d'utiliser la mousse Nickel sur la face avant de la puce (terminaison Al). La résistance électrique du contact lors de l'utilisation de mousse en cuivre ou nickel avec un métal d'aluminium

nickelée (Ni<sub>métal</sub>) est similaire, alors au niveau de la face arrière de la puce (terminaison Ni/Ag) on peut utiliser indifféremment une mousse en cuivre ou en nickel.

Tableau 2 : Résistance obtenue pour les différents assemblages (calculée à un courant de 40 A)

Package		Résistance (mΩ/cm <sup>2</sup> )
Face avant de la puce (métal Al)	Contact Ni - Al	2,18
	Contact Cu - Al	2,84 to 3,55
Face arrière de la puce (métal Ni)	Contact Ni - Ni	2,72
	Contact Cu - Ni	2,67 to 3,25

### 3.3 - Caractérisation mécanique

Le résumé des résultats précédents nous amène à la conclusion que la mousse de cuivre sur la face inférieure permet une meilleure évacuation de la chaleur et que la mousse de nickel sur le contact supérieur permet de réduire la résistance de contact électrique.

Dans cette partie, nous détaillerons la caractérisation thermomécanique. Même si le mélange Mousse-Résine présente un comportement élasto-plastique, cette étude s'est limitée à l'identification des propriétés thermoélastiques du mélange.

#### 3.3.1 - Coefficient d'expansion thermique du mélange mousse-résine

Le coefficient de dilatation thermique (CTE)  $\alpha_i$  dans la direction  $X_i$  a été mesuré à l'aide d'un analyseur thermomécanique NETZSCH TMA 402 F1 Hyperion (voir figure 12). Le protocole de mesure consiste à imposer à l'échantillon caractérisé, une variation de température  $\Delta T = T - T_0$ , (T variant entre 200 et -50 °C et  $T_0 = 25$  °C) et en mesurant la variation de la longueur dans la direction donnée,  $\Delta l_i = l_i - l_{0i}$ . L'équation (7) donne les relations correspondantes :

$$\alpha_i(T) = \frac{\varepsilon_i^{th}}{\Delta T} \quad \text{avec} \quad \varepsilon_i^{th} = \frac{\Delta l_i}{l_{0i}} \quad (7)$$

Le long de l'axe Z, le CTE est d'environ  $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , entre -50 °C et 100 °C. Il augmente ensuite, d'abord lentement jusqu'à 70 ppm/°K à 150 °C et enfin brusquement entre 150 °C et 200 °C pour atteindre 250 ppm/°K à 200 °C et dépasser 250 ppm/°K, une fois que la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) de l'époxy est atteinte. Pour les axes X et Y, le CET est d'environ 46 ppm/°K. Ainsi, la température maximale de fonctionnement de l'assemblage ne doit pas dépasser la  $T_g$  de la résine époxy.

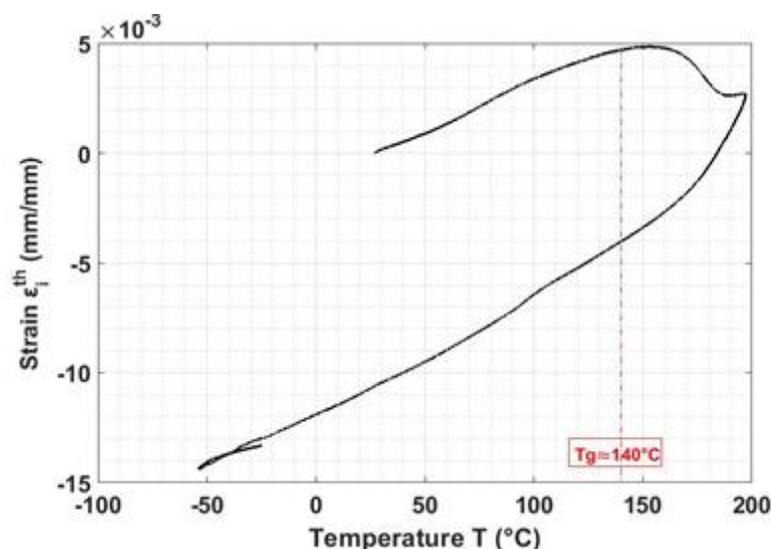


Figure 12 : Essai de dilatométrie pour la mesure du CTE le long de l'axe z en fonction de la température pour le contact de nickel pressé.

### 3.3.2 - Propriétés élastiques du mélange mousse-résine

Les propriétés élastiques dans les trois directions (X, Y, Z) et pour plusieurs températures ont été caractérisées à l'aide du même analyseur thermomécanique sur des échantillons de dimension 6x6 mm et d'une épaisseur maximale  $l_{oi} = 0,79$  mm. Des essais de chargement-relaxation en compression ont été réalisés en appliquant une charge  $F$  inférieure à 3 N pour s'assurer que l'échantillon reste élastique. La contrainte normale est calculée par  $\sigma_{ii} = F/S_i$  et la déformation normale associée  $\varepsilon_{ii} = \Delta l_i/l_{oi}$  à partir de la mesure du changement de longueur de l'échantillon  $\Delta l_i = l_i - l_{oi}$ . On déduit ainsi, à partir des deux mesures le module d'Young  $E_i$  dans la direction  $X_i$ , (équation. 8).

$$E_i(T) = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}} \quad (8)$$

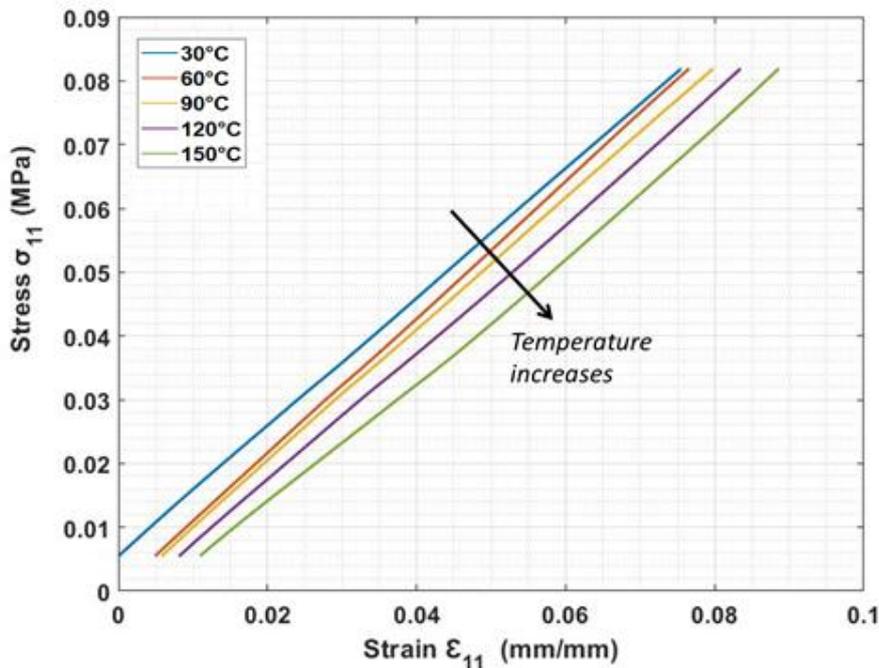


Figure 13 : Diagramme Contraintes-déformations du mélange mousse-résine à différentes températures, dans la direction Z.

Les essais ont été réalisés à plusieurs températures inférieures à 150°C. Pour chaque température, un essai de chargement/déchargement par compression a été appliqué. Comme le montre la figure 13, la température n'affecte pas le module d'Young dans la plage de température considérée.

En raison des faibles valeurs de charge qui peuvent être appliquées par l'analyseur thermomécanique, nous avons rencontré des problèmes liés à la faible rigidité des contacts entre l'échantillon et les plaques et, par conséquent, les valeurs du module d'Young sont trop faibles par rapport à ce que nous aurions dû attendre d'un tel mélange. En effet, avec un mélange constitué de résine (module d'Young de 3.5 GPa) et de cuivre (131 GPa) nous devrions trouver une valeur entre ces deux valeurs. Par conséquent, nous avons utilisé une méthode de caractérisation numérique en utilisant un modèle géométrique 3D de la microstructure obtenu à partir de l'analyse tomographique et nous avons calculé le module d'Young.

Les relations contraintes-déformations effectives sont données par l'équation (9), où  $\varepsilon_{ij}$  et  $\sigma_{ij}$  sont respectivement la déformation élastique moyenne et la contrainte Cauchy moyenne, et  $E_i$ ,  $\nu_{ij}$  et  $G_i$ , les paramètres élastiques de tensor.

$$\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{xx} \\ \bar{\varepsilon}_{yy} \\ \bar{\varepsilon}_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{xx} \\ \bar{\sigma}_{yy} \\ \bar{\sigma}_{zz} \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}_{xy} \\ \bar{\varepsilon}_{yz} \\ \bar{\varepsilon}_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{xy} \\ \bar{\sigma}_{yz} \\ \bar{\sigma}_{zx} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Le module d'Young  $E_X$  et les coefficients de Poisson ( $\nu_{xy}$  et  $\nu_{xz}$ ) ont été identifiés par la simulation d'un essai de traction effectué dans la direction de l'axe X. La figure 14.a montre les conditions aux limites appliquées. Une charge de déplacement uniforme est appliquée sur le bord B1 (dans la direction X). Le déplacement du bord B4 dans la direction X n'est pas autorisé, tandis que les déplacements sur les bords B2 et B3 sont considérés comme étant sans contrainte.

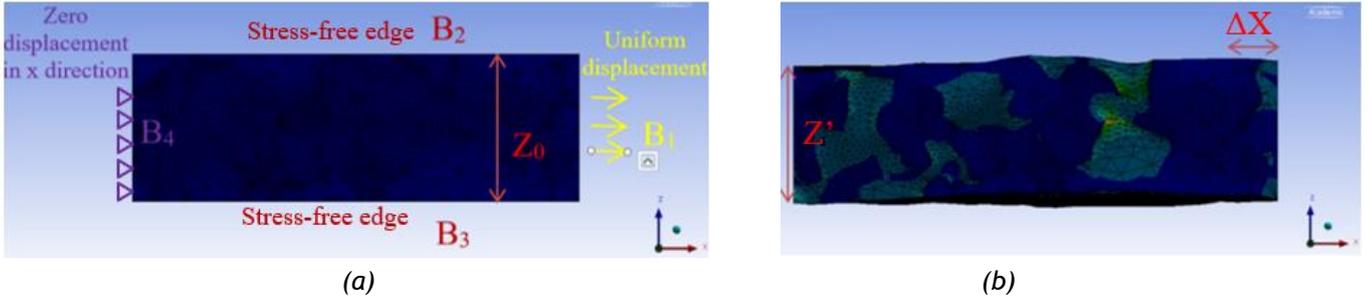


Figure 14 : (a) Conditions aux limites pour l'estimation du module d'Young selon l'axe X, (b) état final après un essai de traction.

Le module d'Young  $E_X$  correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe  $\bar{\sigma}_{xx} - \varepsilon_{xx}$ , équation (10). Le coefficient  $\nu_{xz}$  représente le rapport entre la déformation  $\varepsilon_{zx}$  mesurée dans la direction z (c'est-à-dire perpendiculaire à la contrainte  $\sigma_{xx}$ ) et la déformation mesurée dans la direction x,  $\varepsilon_{xx}$ , équation (11). De même, le coefficient  $\nu_{xy}$  est le rapport entre la contrainte  $\varepsilon_{yx}$  et la contrainte mesurée dans la direction x  $\varepsilon_{xx}$ , équation (12). Les autres paramètres  $E_y$ ,  $E_z$  et  $\nu_{yz}$  ont été calculés en modifiant les conditions aux limites et en appliquant des déplacements dans les directions y et z.

$$E_x = \frac{\bar{\sigma}_{xx}}{\bar{\varepsilon}_{xx}} \quad \text{with} \quad \bar{\varepsilon}_{xx} = \frac{\Delta \bar{l}_x}{l_{x0}} = \frac{\bar{l}_x - l_{x0}}{l_{x0}} \quad (10)$$

$$\nu_{xz} = \frac{\bar{\varepsilon}_{xz}}{\bar{\varepsilon}_{xx}} \quad \text{with} \quad \bar{\varepsilon}_{xz} = \frac{\Delta \bar{l}_z}{l_{z0}} = \frac{\bar{l}_z - l_{z0}}{l_{z0}} \quad (11)$$

$$\nu_{xy} = \frac{\bar{\varepsilon}_{xy}}{\bar{\varepsilon}_{xx}} \quad \text{with} \quad \bar{\varepsilon}_{xy} = \frac{\Delta \bar{l}_y}{l_{y0}} = \frac{\bar{l}_y - l_{y0}}{l_{y0}} \quad (12)$$

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Estimation numérique des paramètres mécaniques effectifs du mélange mousse(Ni)-résine.

	Young modulus (GPa)	Poisson ratio	CTE (ppm.K <sup>-1</sup> )
Mélange mousse- Resin (Numerical value)	37,6 (z-axis)	0,2 (XY)	47,9 (z-axis)
	37,9 (x-axis)	0,22 (YZ)	35,8 (x-axis)
	44,8 (y-axis)	0,17 (ZX)	39,9 (y-axis)
Nickel (Datasheet)	204	0,31	12,7
Resin (Datasheet)	3,36	0,4	61

## 4 - Conclusions

Dans cet article, nous avons montré la faisabilité d'une prise de contact électrique sur une puce enfouie au cœur du PCB, en utilisant uniquement des mousses métalliques pressées, ce qui a permis

de s'affranchir des fils de bonding et de la brasure. Des travaux de caractérisations thermiques et électriques ont été réalisés et montrent des performances électriques et thermiques prometteuses. Selon les résultats, l'utilisation d'une mousse cuivre pour le contact arrière assure de bonnes performances thermiques et une mousse nickel sur la face avant permet de réduire les pertes électriques.

## Références :

- [1] T. Huesgen, "Printed circuit board embedded power semiconductors: A technology review," *Power Electron. Devices Components*, vol. 3, no. July, p. 100017, 2022, doi: 10.1016/j.pedc.2022.100017.
- [2] C. Chen, "A Review of SiC Power Module Packaging: Layout, Material System and Integration," *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 3, pp. 170-186, 2017, doi: 10.24295/cpsstpea.2017.00017.
- [3] Y. Pascal, A. Abdedaim, 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.*, vol. 38, no 10, p. 1453-1456, oct. 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2748223.
- [4] P. G. Panasonic Corporation, "Pressur Process." [https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/processguideline\\_R-1766GH.pdf](https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/processguideline_R-1766GH.pdf)
- [5] S. Zhang, "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 To cite this version: HAL Id: tel-02275807 Wide Bandgap Semiconductor Components Integrat," 2018.
- [6] A. Bhattacharya, V. V. Calmide, and R. L. Mahajan, "Thermophysical properties of high porosity metal foams," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 45, no. 5, pp. 1017-1031, 2002, doi: 10.1016/S0017-9310(01)00220-4.