

Méthode de détection de l'initiation du délaminage dans les assemblages MOSFETs SiC sur PCB

Souhila BOUZERD, Laurent DUPONT

Université Gustave Eiffel, Université Paris Saclay, ENS Paris Saclay, CNRS, SATIE (UMR CNRS 8029)
souhila.bouzerd@univ-eiffel.fr

RESUME – Cet article présente une méthode d'évaluation de l'initiation du délaminage dans les angles d'une brasure d'un assemblage 3D sur substrat PCB. Cet assemblage repose sur le brasage de matériaux métalliques et l'intégration de MOSFETs SiC de dimensions relativement petites par rapport à celles du dissipateur. Ce développement méthodologique s'inscrit dans l'évaluation de la robustesse d'un nouveau modèle d'assemblage de composants dit grand Gap. Or, les méthodes conventionnelles ne répondent pas efficacement à la détection de l'initiation du délaminage de la brasure. La méthode, adaptée aux besoins des campagnes de vieillissement accéléré, repose sur des mesures électriques présentant une grande sensibilité pour détecter le début du délaminage de la brasure. Des simulations par éléments finis sont réalisées pour quantifier les performances et les limites de la méthode. Aussi, afin de vérifier ces résultats, des prototypes représentatifs de l'assemblage sont fabriqués avec un contrôle du délaminage dans les angles de la brasure.

Mots-clés – Méthode électrique, initiation du délaminage, Joint métal-métal, Composant grand Gap.

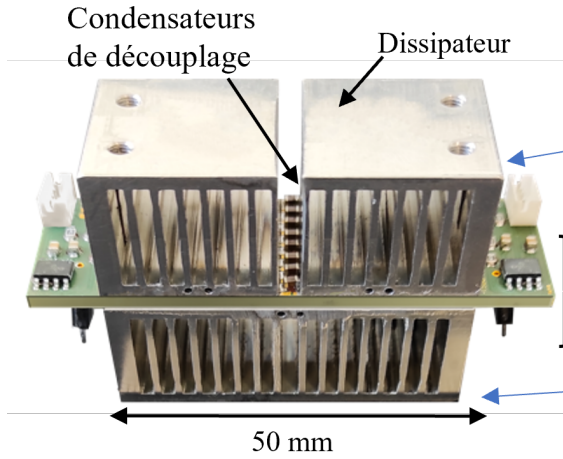
1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance est utilisée pour améliorer l'efficacité des transferts d'énergie tout en réduisant la taille des systèmes. La réduction de la taille du convertisseur et l'efficacité ont été améliorées grâce à l'utilisation des composants grand Gap [1]. Cependant, l'assemblage de ces composants nécessite une attention particulière. Ainsi, amplifiée par les performances dynamiques élevées des composants grand Gap, une réduction de la taille de la cellule de commutation est nécessaire afin d'éliminer l'impact négatif des éléments parasites dès la conception de la cellule de commutation. Aussi, un packaging 3D avec refroidissement double-face [2] à eau est proposé pour assurer un meilleur refroidissement, mais ce type de refroidissement rend le système plus lourd et plus coûteux. Par conséquent, un refroidissement à air est proposé. Mais pour maintenir des performances thermiques suffisamment élevées, il faut adapter l'assemblage des semi-conducteurs à ce type de refroidissement. Une technologie d'intégration en 3D avec un nombre minimal d'interfaces thermiques est proposée dans la technologie TAPIR [3]. Cette technologie consiste à intégrer des transistors grand Gap dans un substrat PCB avec un refroidissement double face à air. Les dissipateurs thermiques utilisés sont alors brasés de part et d'autre du substrat PCB et donc placés aux mêmes potentiels électriques que ceux de la partie active enfouie dans le substrat PCB. L'usage du refroidissement à air nécessite une surface d'échange thermique plus importante du fait d'un coefficient de transfert de chaleur inférieur à celui d'un refroidissement à fluide caloporteur. Cette condition implique des dimensions importantes pour accéder aux performances attendues de l'échangeur thermique. Ces dissipateurs thermiques sont brasés sur un substrat PCB mettant en jeu des différences significatives entre les coefficients de dilatation thermique du substrat et du dissipateur (CTE). De plus, une des imperfections fréquentes de la technologie des brasures est la disparité d'épaisseur entre le centre de la brasure et ses coins. Cela implique que l'un des

coins de la brasure supporte plus de contraintes conduisant à y favoriser l'initiation du délaminage [4]. Le mode d'endommagement étudié est un délaminage qui résulte de l'initiation puis de la propagation d'une fissuration de la brasure engendrée par les cycles thermiques [5]. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de détection d'un délaminage des brasures. Il existe les méthodes telles que les mesures de performances thermiques [6] qui ne conviennent pas à l'assemblage étudié en raison de la surface disproportionnée entre la partie active et le dissipateur, la mesure de la capacité électrique [7] rendue inefficace pour cet assemblage à cause de la continuité du potentiel électrique entre le dissipateur, la brasure et la métallisation du substrat PCB. D'autres techniques, comme la thermographie à verrouillage de phase [8], la tomographie par rayons X [9], la réflectométrie [10] et la microscopie acoustique [7], ne sont pas adaptées ici, pour surveiller continuellement les dommages lors des tests planifiés. Il est utile de développer des indicateurs pour détecter l'initiation du délaminage aux coins du joint de brasure. Cet article présente une solution de détection de l'initiation du délaminage de la brasure entre le dissipateur et le substrat PCB. Cette méthode a atteint une sensibilité au délaminage de l'ordre du pour cent en utilisant des mesures électriques. Cela permet une comparaison fine de différents choix technologiques. Cet article présente d'abord une description du modèle numérique qui est associé à une étude expérimentale sur des prototypes de test développés spécifiquement. Enfin, une discussion détaille les résultats pour introduire une conclusion et des perspectives.

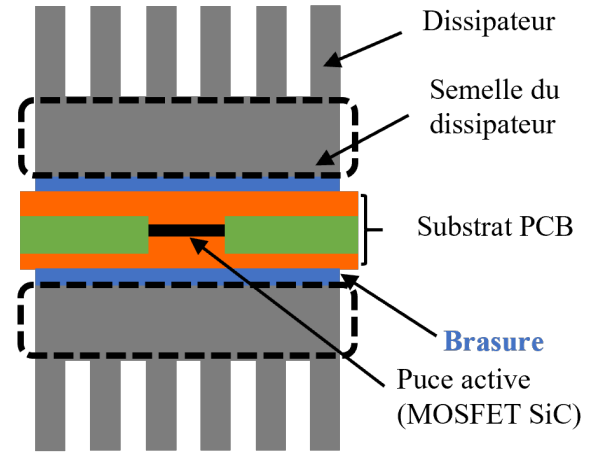
2. METHODE ELECTRIQUE

La méthode électrique consiste à injecter une impulsion de courant de courte durée au coin de la métallisation du substrat PCB. Les masses d'injection M_i et de mesure M_m sont imposées à la semelle du dissipateur thermique. Des simulations ont été réalisées sur des modèles avec une brasure sans dégradation, et d'autres avec différents taux de délaminage à un ou plusieurs coins de la brasure désignés A, B, C et D. Les potentiels électriques VA sont mesurés sur la métallisation du substrat PCB près du coin A. Les petites dimensions de la métallisation disponible pour les prototypes et de la brasure rendent les mesures de potentiel électrique très sensibles aux positions, en raison de la distribution des lignes du courant dans la couche de cuivre de 105 μm du PCB très proche du point d'injection de courant. Les valeurs de potentiel électrique sont analysées pour évaluer la sensibilité de la méthode et calculer un indicateur de délaminage correspondant aux taux prédéfinis pour l'étude. La méthode électrique consiste à injecter une impulsion de courant de courte durée de 100 A dans le coin de la métallisation du substrat PCB, du même côté que l'angle A de la brasure. La masse d'injection M_i est appliquée à la semelle du dissipateur thermique. Les simulations ont été effectuées pour des modèles avec une brasure uniforme et sans dégradation. En outre, d'autres simulations ont été effectuées pour étudier l'impact de délaminages introduits à l'endroit d'un ou plusieurs coins de la brasure à des taux variables. Les évaluations du potentiel électrique VA sont



a) Technologie du prototype

FIG. 1. Présentation du modèle d'intégration 3D TAPIR [3]



b) Schéma descriptif

effectuées sur la métallisation du substrat PCB près du coin A de la brasure, tandis que la masse de mesure Mm est appliquée à la semelle du dissipateur thermique, comme le montre la figure 3. Étant donné les dimensions réduites de la métallisation du substrat PCB et de la brasure, les mesures de potentiel électrique sont très sensibles à leur position en raison de la distribution du courant dans la couche de cuivre du PCB près de l'endroit où le courant est injecté. Les valeurs de potentiel électrique évaluées sont analysées pour évaluer la sensibilité de la méthode et d'évaluer un indicateur de délaminage correspondant aux taux de délaminage imposés à un ou plusieurs coins de la brasure. L'indicateur de délaminage est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta V_A = \frac{V_{AD} - V_{A0}}{V_{AD}} \times 100 \quad (1)$$

Où, ΔV_A (%) est l'indicateur de délaminage, V_{AD} (V) est le potentiel électrique mesuré sur le prototype délaminé et V_{A0} (V) est le potentiel électrique mesuré sur le prototype non délaminé.

3. ANALYSE NUMERIQUE

Une étude numérique est utilisée pour identifier les paramètres clés influençant la sensibilité de la méthode de détection de l'initiation du délaminage à un ou plusieurs coins de la brasure. Des simulations par éléments finis (FEM) ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Cette section commence par la présentation du modèle numérique qui sert de base aux calculs. Ensuite, les méthodes thermique et électrique sont introduites. Enfin, les résultats d'une analyse comparative entre ces deux méthodes sont présentés.

3.1. Modèle numérique

Le modèle d'éléments finis étudié est une géométrie 3D simplifiée, équivalente à celle de la technologie TAPIR, composée uniquement de trois parties (Fig. 3). La première partie est la métallisation du substrat PCB (35 mm × 35 mm) avec une épaisseur de cuivre de 105 µm. Cette épaisseur est choisie en considérant le cas le plus défavorable pour la méthode électrique, car la sensibilité de l'indicateur est inversement proportionnelle à l'épaisseur du cuivre. La deuxième partie est la semelle du dissipateur (17 mm × 17 mm) en cuivre avec une épaisseur de 3 mm. La troisième partie est la brasure (17 mm × 17 mm) entre le PCB et la semelle du dissipateur, constitué d'un alliage Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) avec une épaisseur de 100 µm et de résistivité électrique $1,04 \times 10^{-6} \Omega \text{m}$ [11]. La puce active est représentée par une zone de 5 mm × 5 mm sur le substrat PCB, si-

mulant la métallisation supérieure d'un MOSFET dissipant une puissance équivalente à celle de sa partie active. Le délaminage est représenté dans le modèle par une absence de matière entourée d'un cercle rouge (figure 3). Pour améliorer la sensibilité de la méthode, un maillage contrôlé est utilisé, avec une maille triangulaire adaptative sur les bords de la brasure, afin d'obtenir des valeurs robustes avec un temps de calcul optimisé.

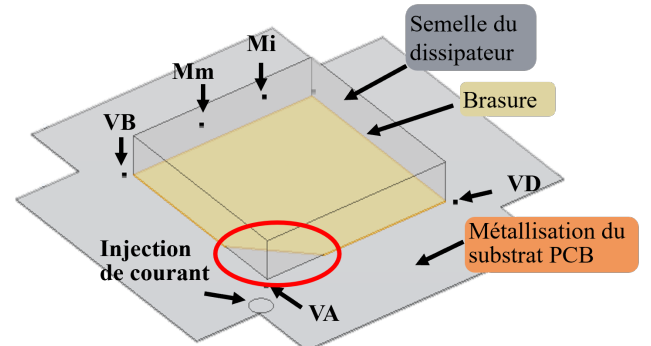


FIG. 2. Géométries et conditions aux limites du modèle d'éléments finis montrant les positions d'injection du courant et de mesure du potentiel électrique.

Une campagne expérimentale a permis de vérifier la résistivité du cuivre de la métallisation du substrat PCB, trouvée à $1,40 \times 10^{-6} \Omega \text{m}$ proche de la valeur théorique du cuivre massif $1,7 \times 10^{-6} \Omega \text{m}$ [12]. Le modèle numérique est ajusté sur la valeur mesurée.

3.2. Résultats numériques

Les simulations ont été réalisées avec une épaisseur de cuivre de 105 µm. Les résultats montrent que les taux de délaminage imposés à un ou plusieurs coins du joint de brasure affectent significativement l'indicateur VA. L'indicateur est calculé en référence au potentiel électrique d'un prototype sans délaminage, mesuré à 4,05 mV. Une comparaison est réalisée entre la méthode de mesure de la résistance thermique et la méthode de mesure électrique, en utilisant le modèle numérique décrit précédemment. La résistance thermique est exprimée en K/W et représente l'opposition à la circulation du flux thermique entre la source de chaleur et le système de refroidissement. Elle est calculée par l'équation suivante [13] :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_j - T_d}{P} \quad (2)$$

Où ; les paramètres P , T_j et T_d sont respectivement la puissance dissipée dans le MOSFET SiC (W), la température de jonction virtuelle et la température de la semelle du dissipateur thermique en $^{\circ}C$.

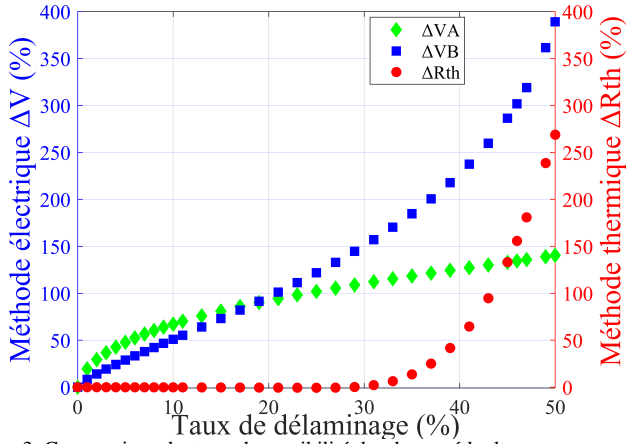


FIG. 3. Comparaison des taux de sensibilité des deux méthodes : mesures électriques et thermiques.

Une densité de dissipation thermique de $30 W/cm^2$ est appliquée sur la surface représentant la puce active. Les températures moyennes sont calculées sur cette surface et celle de la semelle du dissipateur. Les résultats de la figure 3 montrent que la méthode électrique est plus sensible aux faibles taux de délaminage que la méthode thermique. Cette dernière ne devient sensible qu'à partir d'un taux de délaminage supérieur à 45% , ce qui est trop élevé par rapport au seuil critique de 20% utilisé en fiabilité des modules de puissance. Pour atteindre une sensibilité plus élevée aux taux de délaminage importants en utilisant la méthode électrique, des mesures supplémentaires ont été prises à proximité du coin B. Ces valeurs montrent également une sensibilité supérieure par rapport à la méthode de mesure de la résistance thermique.

3.3. Effet de la position des mesures

La première étude numérique permet d'évaluer la sensibilité des mesures de potentiel électrique en fonction de la position entre le point d'injection du courant et l'angle A du dissipateur thermique. La sensibilité de la méthode augmente à mesure que la position de mesure se rapproche du point d'injection du courant. En conditions réelles d'utilisation, la mesure du délaminage est effectuée sur un dispositif qui évolue au cours du temps, mais l'étude présentée ici est réalisée à l'aide de prototypes définis selon différents états prédéterminés, allant de l'absence de délaminage à des taux de délaminage compris entre 1% et 5% . Cette condition impose de caractériser d'abord un véhicule de test sans délaminage, puis de passer à un autre véhicule de test pour évaluer la sensibilité de l'indicateur en fonction du taux de délaminage. Il est donc important de préciser que les mesures sont nécessairement affectées par la variabilité liée aux erreurs de positionnement manuel lors des mesures destinées à évaluer l'indicateur de dégradation ΔV_A , entre une condition de référence idéale (sans délaminage) et une condition délaminée selon l'équation 1. Les calculs présentés dans la Figure 5 sont réalisés en fixant une position de référence pour le cas de référence sans délaminage imposé, et en faisant varier la position du point de mesure dans le cas avec délaminage imposé. Les points de référence (Ref1, Ref2 et Ref3) sont choisis de manière à avoir un espacement d'environ 300 à $350 \mu m$ entre eux. Par ailleurs, un espacement de $70 \mu m$ est imposé entre deux points de mesure sur le module présentant un délaminage imposé.

Cela met en évidence la sensibilité de la méthode vis-à-vis de la variabilité de la position de mesure. Les résultats indiquent

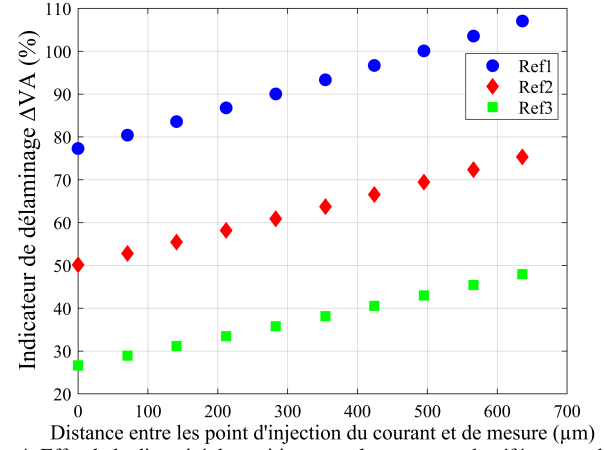


FIG. 4. Effet de la disparité de position entre le prototype de référence et le prototype avec délaminage imposé sur la sensibilité de la méthode.

qu'un décalage d'environ $200 \mu m$ entre les deux cas avec et sans délaminage imposé conduit à une variation d'environ 10% de l'indicateur de délaminage ΔV_A .

4. EVALUATION DE LA METHODE ELECTRIQUE

À la suite des résultats de simulation encourageants, des prototypes ont été développés afin de valider expérimentalement la méthode. Une présentation des prototypes et de leur caractérisation est d'abord proposée. Ensuite, une étude expérimentale est menée pour démontrer la sensibilité de la méthode à différents taux de délaminage et analyser la répartition du délaminage sur les différentes zones de la brasure.

4.1. Définition du prototype de test

Pour cette étude, des prototypes simplifiés ont été conçus afin de valider les résultats numériques. Ces prototypes intègrent un substrat PCB ($35 mm \times 35 mm$) avec des couches de cuivre d'une épaisseur de $105 \mu m$. Ils comportent également un bloc de cuivre ($17 mm \times 17 mm$) d'une épaisseur de $3 mm$, représentant la semelle du dissipateur, assemblé sur le substrat PCB au moyen d'une brasure SAC305 d'une épaisseur de $100 \mu m$. Le bloc de cuivre, représentant la semelle du dissipateur, est nickelé pour éviter l'oxydation du cuivre avant la brasure sur le substrat. Le délaminage contrôlé de la brasure est obtenu en appliquant un solder-stop dans l'un des coins ciblés de la brasure, permettant de contrôler à la fois le taux de délaminage et l'épaisseur de la brasure. Même si la brasure recouvre le solder-stop, aucun contact électrique ne se produit entre la métallisation du substrat PCB et la semelle du dissipateur dans les coins désignés comme délaminés, assurant ainsi la robustesse de la dégradation imposée pour l'évaluation de la méthode électrique. Cette configuration représente l'initiation du délaminage que nous cherchons à détecter par la méthode électrique. Le prototype avec délaminage imposé sur trois coins avant brasage ainsi que l'analyse par microscopie acoustique est présenté dans la figure 6. L'analyse par microscopie acoustique est réalisée pour prendre en compte la présence de vides dans la brasure ainsi que leur localisation. La première étape vise à valider la méthode dans des conditions initiales favorables, en augmentant le rapport signal/bruit par l'injection d'un courant élevé pour évaluer la sensibilité de la méthode électrique. En raison de la petite taille des prototypes, la précision des mesures de potentiel électrique dépend fortement de la position des points de mesure. Par conséquent, des sondes positionnées par un robot manuel sont utilisées pour garantir un positionnement précis. Ces sondes peuvent supporter des courants jusqu'à $3 A$ en mode continu. Afin de permettre l'injection d'un courant continu équivalent à $100 A$ tout en évitant les effets d'auto-échauffement, le banc de test est conçu

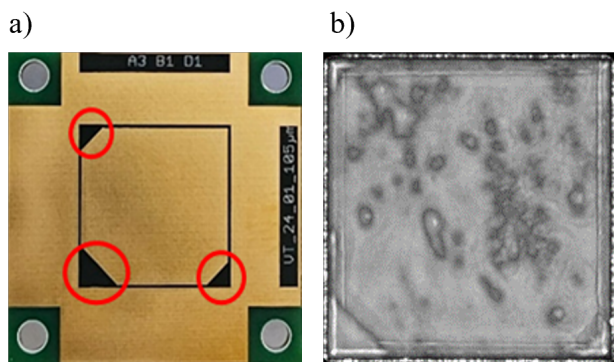


FIG. 5. Substrat PCB dédié : a) avant la brasure de la semelle du dissipateur, b) son analyse par microscopie acoustique. Cas 5 (cf. Tableau 1)

pour permettre l'injection de courant pulsé d'environ 100 A avec une durée d'impulsion de 300 μ s. Les mesures électriques sont réalisées à l'aide de l'unité d'acquisition HBM GEN3i, offrant une fréquence d'échantillonnage de 2 MS/s et une résolution ADC de 18 bits.

4.2. Campagnes expérimentales

Une étude expérimentale est menée afin de valider ces résultats numériques. Un banc de test est développé pour l'injection de courant et les mesures de potentiel électrique. La figure 7 présente une image du banc de test. Une série de mesures de potentiel électrique est réalisée sur l'ensemble des prototypes. Ces derniers incluent tous les cas répertoriés dans le tableau 1. À partir des mesures effectuées, l'indicateur de délaminage est calculé à l'aide de l'équation 1. Les données de potentiel électrique recueillies sur tous les prototypes ont permis d'analyser la relation entre le délaminage imposé et les réponses mesurées. Les données utilisées pour le calcul de l'indicateur de délaminage correspondent aux valeurs moyennes relevées pendant la période de stabilité du signal.

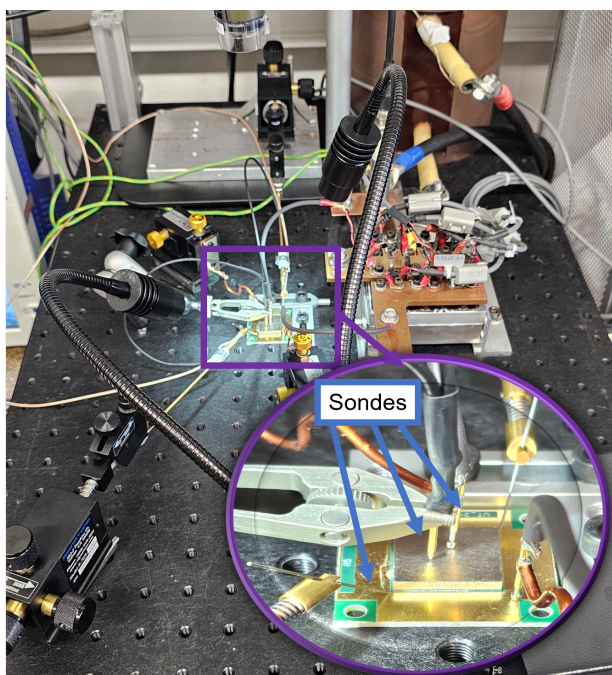


FIG. 6. Vues du banc d'essai expérimental et détails de la zone de mesure le véhicule de test.

4.3. Évaluation de la sensibilité de la méthode

La méthode électrique a démontré une sensibilité élevée aux différents taux de délaminage ainsi qu'à leur localisation. Il est important de noter qu'une seule injection de courant est imposée dans le coin situé en face du coin A, et qu'une seule mesure de potentiel est effectuée au coin A (VA), même si le délaminage est imposé aux coins B et D. Le tableau 1 résume l'ensemble des cas étudiés avec l'indicateur de délaminage ΔV_A (%), pour les résultats de simulation et les résultats expérimentaux. Une comparaison entre les cas présentés dans le tableau 1 est effectuée afin de démontrer la sensibilité de la méthode à la distribution du taux de délaminage au sein de la brasure. Par exemple, les cas 3 (taux de délaminage de 3 % imposé uniquement au coin A), 4 (taux de 5 % au coin A) et 5 (taux de 5 % réparti sur trois coins : A, B et D) ont été comparés. Dans un premier temps, la comparaison entre les cas 4 et 5 montre que la valeur mesurée de VA est plus élevée dans le cas 4. Cela s'explique par le fait que, dans ce cas, l'ensemble du taux de délaminage est localisé au coin A, proche de la zone d'injection de courant, ce qui conduit à une sensibilité maximale. Cependant, la valeur mesurée de VA dans le cas 5 reste supérieure à celle du cas 3. Cela démontre que, bien qu'il y ait une sensibilité plus marquée au niveau du coin A, la méthode est également sensible aux taux de délaminage imposés aux coins adjacents B et D de la brasure. Tandis qu'aucune sensibilité n'est détectée sur le coin C de la brasure.

TABLEAU 1. Indicateur de délaminage ΔV_A pour tous les prototypes avec différents taux de délaminage et leur répartition aux coins de la brasure.

Numéro de cas	Taux de délaminage imposé sur les coins de la brasure(%)				Indicateur de délaminage ΔV_A (%)	
	A	B	D	Sum	Simu.	Exp.
1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	1	14.56	15.05
3	3	0	0	3	28.12	37.54
4	5	0	0	5	37.21	53.73
5	3	1	1	5	28.21	44.07
6	1	3	1	5	14.68	26.98
7	1	1	3	5	14.67	19.01

4.4. Comparaison entre les résultats de simulation et expérimentaux

Une comparaison a été effectuée entre les résultats de simulation et expérimentaux. Tous les cas présentés dans le tableau 1 ont été comparés et sont présentés à la figure 7. Celle-ci montre la variation de l'indicateur de délaminage en fonction du taux de délaminage (Delam.) imposé aux coins A, B et D, tant pour les campagnes expérimentales que pour les simulations. Dans la figure 7, les résultats de simulation sont représentés par la barre grise, tandis que les résultats expérimentaux sont représentés par la barre multicolore. Des notes sont ajoutées à la figure 12 pour attribuer à chaque étiquette son numéro de cas correspondant, tel que présenté dans le tableau 1. Le cercle coloré qui s'étend au-delà du cercle gris représente la différence entre les résultats de simulation et expérimentaux. Cette différence varie d'un prototype à l'autre, en fonction de la position des mesures de potentiel électrique, comme présenté dans la section 3.3.

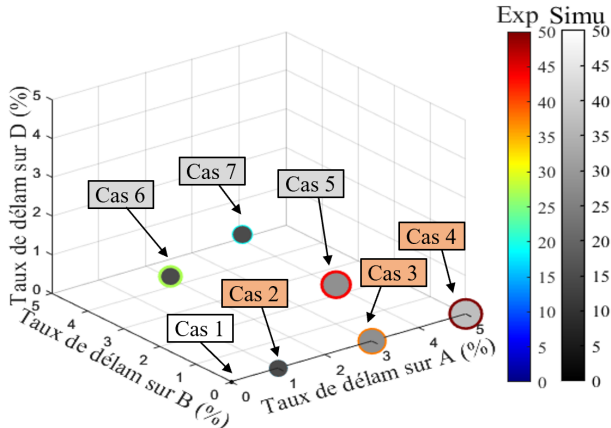


FIG. 7. Comparaison entre les résultats de simulation (Simu) et les résultats expérimentaux (Exp)

5. AMELIORATION DE LA SENSIBILITE DE LA METHODE ELECTRIQUE PAR LA CONCEPTION DESIGN TO SENSOR

À la suite des résultats obtenus, nous proposons une conception révisée du substrat PCB afin d'améliorer la sensibilité globale de l'indicateur de délaminage aux coins du joint de brasure, en imposant un seul point d'injection de courant. Cette amélioration est réalisée par des gravures du cuivre du substrat PCB, ici proposée de formes rectangulaires dans des zones dédiées, comme illustré à la figure 8.a et qui détaille en 8.b l'état de la brasure après assemblage de la semelle en cuivre nickelé. Ces zones sont ajoutées pour guider les lignes de courant vers les points de mesure situés aux coins de la brasure, dans le but d'améliorer la sensibilité des mesures. Cette configuration de routage a été choisie pour être placée uniquement sur deux bords du module. Le choix de laisser les deux autres bords libres a été fait pour permettre l'accès aux courants fonctionnels et de contrôle dans les modules opérationnels. Ces dimensions spécifiques de routage ont été mises en œuvre pour valider l'efficacité de cette approche. Une optimisation plus robuste sera étudiée afin de déterminer les meilleures dimensions et positions de routage permettant d'atteindre la meilleure performance possible.

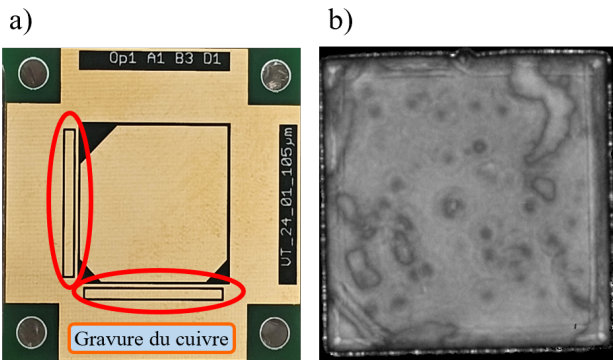


FIG. 8. Substrat PCB dédié des prototypes avec conception design to sensor : a) avant la brasure de la semelle du dissipateur, b) son analyse par microscopie acoustique. Cas Op 1.2 (cf. Tableau 2)

5.1. Évaluation des avantages de l'approche de conception design to sensor

Les prototypes présentant des configurations de routage destinées à améliorer la sensibilité des mesures sont résumés dans le tableau 2. Ce tableau présente la distribution des taux de délaminage à travers les coins de la brasure, ainsi que l'indicateur de délaminage ΔV_A pour chaque prototype, à la fois en simulation et expérimentalement. Les cas 1 à 4 représentent les prototypes sans l'approche de conception design to sensor, tandis que les

cas Op 1.1 à Op 1.4 correspondent aux prototypes avec l'approche de conception. La comparaison entre les prototypes avec et sans l'approche de conception design to sensor met en évidence l'efficacité des routages pour améliorer la sensibilité des mesures, comme en témoigne les changements plus cohérents et marqués des valeurs de ΔV_A . Comme nous pouvons le voir dans le tableau 2, il existe un écart entre les résultats de simulation et expérimentaux. Cet écart est dû à la sensibilité de la position des mesures.

TABLEAU 2. Indicateur de délaminage ΔV_A pour tous les prototypes avec et sans la conception design to sensor.

Numéro de cas	Taux de délaminage imposé sur les coins dela brasure(%)				Indicateur de délaminage ΔV_A (%)	
	A	B	D	Sum	Simu.	Exp.
1	0	0	0	0	0	0
2	3	1	1	5	28.21	44.07
3	1	3	1	5	14.68	26.98
4	1	1	3	5	14.67	19.01
Op 1.1	0	0	0	0	0	0
Op 1.2	3	1	1	5	40.33	67.04
Op 1.3	1	3	1	5	25.06	51.77
Op 1.4	1	1	3	5	25.03	53.87

5.2. Comparaison des résultats expérimentaux entre les prototypes avec et sans l'approche de conception design to sensor

Dans cette section, nous comparons les résultats expérimentaux obtenus à partir des prototypes avec et sans l'approche de conception design to sensor pour évaluer son efficacité. Les mesures des prototypes avec cette approche de conception ont été effectuées dans des conditions similaires, en utilisant la même configuration de banc d'essai pour une comparaison directe. L'approche de conception design to sensor a démontré un gain de sensibilité numérique de 12 % pour la méthode. Cependant, le gain expérimental est d'environ 25 % et varie d'un prototype à l'autre en raison des différences de positions de mesure, car nous avons deux prototypes distincts, l'un avec et l'autre sans l'approche de conception design to sensor. La figure 10 montre la variation de l'indicateur de délaminage ΔV_A en fonction du taux de délaminage (Delam.) imposé aux coins A, B et D pour les deux prototypes, avec et sans l'approche de conception design to sensor.

Dans la figure 10, les résultats expérimentaux des prototypes sans la conception design to sensor sont représentés par la barre grise, tandis que les résultats expérimentaux des prototypes avec la conception design to sensor sont représentés par la barre multicolore. Des post-its sont ajoutés dans la figure 10 pour associer chaque étiquette au numéro de cas correspondant présenté dans le tableau 2. Le cercle coloré qui dépasse de la barre grise illustre la différence entre les résultats expérimentaux des prototypes avec et sans la conception design to sensor. Les prototypes avec la conception design to sensor ont démontré une sensibilité plus élevée aux taux de délaminage comparés à ceux sans cette optimisation. Globalement, les résultats expérimentaux confirment que l'intégration de la conception design to sensor dans le prototype améliore significativement la sensibilité de la méthode électrique pour la détection de l'initiation du délaminage sur trois des quatre coins de la brasure.

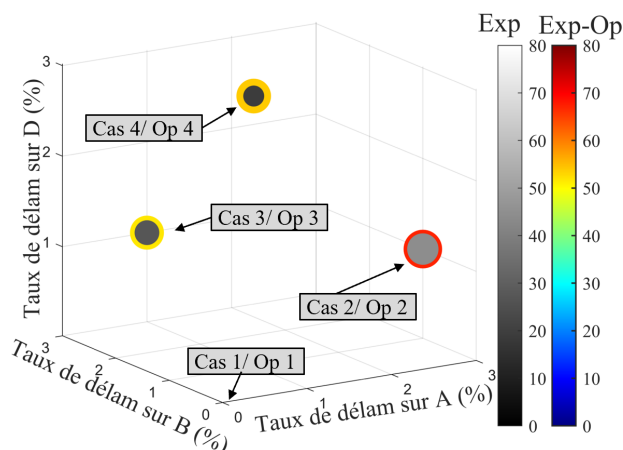


FIG. 9. Comparaison des résultats expérimentaux entre les prototypes sans (Exp) et avec conception design to sensor (Exp-Op).

6. CONCLUSION

Cette étude présente une méthode électrique pour détecter l'initiation du délaminage dans un joint de brasure au sein d'un assemblage métal-métal dans l'électronique de puissance pour les composants à large bande interdite (WGB). Cet assemblage représente une situation qui se généralise où une puce active à large bande interdite est intégrée dans un substrat de PCB. La puce est de petite taille par rapport à celle des dissipateurs, et ces composants sont au même potentiel électrique. Une simulation par éléments finis a été réalisée pour évaluer et étudier la sensibilité de la méthode. Une comparaison entre les méthodes de détection thermique et électrique a également été effectuée. Les résultats de cette comparaison ont montré qu'à 20 % de délaminage imposé sur un seul coin A, la méthode thermique ne présente aucune sensibilité, tandis que la méthode électrique affiche une sensibilité de 90 %. La comparaison a principalement porté sur le seuil de 20 %, car il représente le seuil historique de dégradation qui définit une limite d'état d'endommagement pour l'évaluation de la durée de vie lors des tests de vieillissement accéléré des modules d'électroniques de puissance. Après les résultats encourageants des simulations, des prototypes ont été développés pour les tests expérimentaux. Les résultats expérimentaux obtenus ont ensuite été comparés avec les résultats de simulation. La comparaison a révélé une corrélation entre les deux ensembles de résultats. Les résultats expérimentaux confirment que la méthode est sensible au taux de délaminage imposé au coin A de la brasure, qui est en face du point d'injection de courant. De plus, les résultats ont montré que la méthode est sensible aux taux de délaminage imposés aux coins B et D, même avec une seule injection de courant et une seule mesure de potentiel près du coin A. Les résultats expérimentaux et de simulation sont satisfaisants, démontrant la sensibilité de la méthode à de faibles taux de délaminage, aussi petits qu'un pour cent. Bien que la méthode ait démontré une bonne sensibilité même aux faibles taux de délaminage, des investigations supplémentaires ont été menées pour améliorer sa sensibilité. Une approche a été proposée, consistant à imposer des routages spécifiques sur le substrat de PCB. Cette approche s'est avérée efficace, conduisant à une amélioration de la sensibilité de la méthode électrique de 25 %. Une étude détaillée de cette approche, menant à une optimisation, sera menée pour déterminer la configuration de routage appropriée maximisant la sensibilité pour cet assemblage spécifique. Il est en outre essentiel de l'utiliser pour des tests de vieillissement accéléré afin de distinguer précisément les différentes technologies d'intégration dans le cadre du projet de recherche DESTINI. Malgré des résultats prometteurs, plusieurs défis persistent. Les prochaines étapes consisteront à améliorer l'évaluation de la sensibilité au coin A ainsi qu'aux autres coins, C, B et D. De plus, il sera important d'éva-

luer la robustesse de la solution proposée en prenant en compte différents taux et emplacements de délaminage, ainsi que d'optimiser les géométries pour le "Design to sensor". Aussi, une injection de courant alternatif sera étudiée pour tirer parti des effets de peau, dans le but d'améliorer la sensibilité de la méthode. Enfin, la méthode sera appliquée à d'autres modes d'excitation électrique compatibles avec les technologies de l'électronique de puissance (par exemple, joints frittés ou intermétalliques, connexions électriques ou mécaniques), caractérisées par un facteur de forme où l'épaisseur est minimale par rapport à la surface.

7. REMERCIMENT

Les auteurs souhaitent remercier l'Agence Nationale de la Recherche (ANR - DESTINI - ANR-21-CE05-0037-01) pour le financement de cette recherche et aussi l'accompagnement de Monsieur Philippe LASSERE de la société Deep-Concept pour son soutien dans le développement des prototypes avec l'aide des membres de l'équipe de la plateforme 3DPhi à Toulouse.

8. REFERENCES

- [1] G.-J. Su, « Comparison of Si, SiC, and GaN based Isolation Converters for Onboard Charger Applications », IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, p. 1233-1239, sept. 2018.
- [2] B. C. Charboneau et al., « Double-Sided Liquid Cooling for Power Semiconductor Devices Using Embedded Power Packaging », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no 5, p. 1645-1655, sept. 2008.
- [3] W.-F. Bikinga et al., « TAPIR (compact and modular Power modules with Integrated cooling) Technology : Goals and Challenges », Third International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM), Osaka, Japan : IEEE, juin 2021.
- [4] M. Ciappa, « Selected failure mechanisms of modern power modules », Microelectron. Reliab., vol. 42, no 4-5, p. 653-667, avr. 2002.
- [5] M. Bouarroudj, Z. Khatir, S. Lefebvre, et L. Dupont, « Thermo-mechanical investigations on the effects of the solder meniscus design in solder joint lifetime for power electronic devices », EuroSime, London, 2007.
- [6] F. Arabi, E. Woïgard et al., « Power electronic assemblies : Thermo-mechanical degradations of gold-tin solder for attaching devices », Microelectron. Reliab., vol. 64, p. 409-414, sept. 2016.
- [7] L. Dupont, Z. Khatir, S. Lefebvre, et al., « Electrical characterizations and evaluation of thermo-mechanical stresses of a power module dedicated to high temperature applications », European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, 2005.
- [8] W. Qiu, et al., « Thermal simulations of lock-in-thermography for failure analysis of integrated circuits », International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, Malaysia, juillet, 2023.
- [9] W. Sabbah et al., « Evaluation of silver-sintering die attach », Conference on Integrated Power Systems (CIPS), Germany, 2012.
- [10] Y.-D. Lu et B. Yao, « Degradation detecting of solder joints by time domain reflectometry technology », 13th International Conference on Electronic Packaging Technology High-Density Packaging, China, août 2012.
- [11] K. Guth, D. Siepe, J. Gorlich, H. Torwesten, R. Roth, F. Hille, and F. Umbach, "New assembly and interconnects beyond sintering methods."
- [12] N. Ismail, A. Jalar, A. Afdzaluddin, and M. A. Bakar, "Electrical resistivity of sn-3.0ag-0.5cu solder joint with the incorporation of carbon nanotubes," vol. 11, p. 184798042199653. [Online]. Available : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1847980421996539>
- [13] Ahmed, P. Lai, S. Chinnaiyan, A. Mantooth, and Z. Chen, "Electrical and thermal characterization of (250 °C) SiC power module integrated with LTCC-based isolated gate driver," vol. 7, p. 100412. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772671123003078>