

Caractérisation Électrique d'un Packaging Modulaire 3D Assemblé par Pression et Incluant des Mousses Métalliques

^{1,2}Paul BRUYERE, ¹Yvan AVENAS, ²Eric VAGNON

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, Grenoble, France

²Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, UMR5005, 69130 Ecully, France

RESUME – Cet article propose un nouveau concept de packaging modulaire basé sur l'intégration 3D de puce SiC MOSFET 1,2kV avec des mousses métalliques utilisées comme contact électrique via un assemblage par pression. L'utilisation de ces mousses comme interconnexion donne notamment la possibilité de désassembler plus simplement le module de puissance tout en garantissant une résistance électrique et une inductance parasite faibles au sein du packaging. Ce type de matériau a pu être comparé à une solution plus classique représentée par des blocs de cuivre massifs. Les caractérisations statiques menées ont permis de mesurer une résistance de 2,3mΩ pour le packaging, i.e. 7% de la résistance totale du module. Des caractérisations dynamiques ont ensuite permis de souligner une inductance parasite de 2,7nH pour la cellule. Avec des résultats proches pour les interconnexions massives comparé aux mousses, la solution d'interconnexion ne semble pas avoir d'impact sur les caractéristiques du module. Une modification de la répartition de la pression d'assemblage du module a cependant permis de montrer que les interconnexions électriques déformables semblent plus intéressantes dans le cas des modules de puissance assemblés par pression.

Mots-clés—Packaging, Modularité, Mousse, Parasites électriques.

1. INTRODUCTION

Grâce à leurs meilleures caractéristiques intrinsèques, les composants à large bande interdite [1] permettent d'améliorer les performances électriques des convertisseurs. Cependant, leur intégration reste très sensible aux éléments parasites de la cellule, e.g. les inductances ou capacités parasites. Quelques solutions présentes dans la littérature traitent de ce problème. Par exemple, Huang et al. [2] et Morand et al. [3] proposent des modules de puissance avec puces en Carbure de Silicium (SiC) 1,2kV basés sur des technologies comme les substrats céramiques (DBC) ou les circuits imprimés (PCB). Les inductances parasites de ces modules très performants sont globalement comprises entre 0,5nH et quelques nH.

Malgré leurs propriétés électriques très intéressantes, ces types de module de puissance, aussi connus sous la dénomination *Multi Chip Module* (MCM), ne favorisent pas des critères de modularité ou de désassemblage. En effet, de par leur forte intégration, l'utilisation de ces modules reste cantonnée le plus souvent à un seul cahier des charges. Une modification de ce dernier passe alors par le design d'un nouveau module, ceci ne favorisant pas des critères de modularité. De plus, cette forte intégration en faveur des performances induit également des

critères d'éco-conception limités. En effet, dans le cas d'une défaillance constatée sur l'une des puces ou partie du module de puissance, une mise au rebus de l'ensemble du module est à effectuer. Cette dernière remarque implique ainsi une perte de valeur fonctionnelle pouvant mener à une augmentation des impacts environnementaux induits par le convertisseur. Ces aspects sont notamment soulignés dans [4].

Une autre solution classique basée sur le concept *Single Chip Module* (SCM) favorise d'avantage la modularité. En effet, ces packagings dit *discrets*, e.g. les boîtiers TO-247, permettent de sélectionner la référence de semi-conducteur la plus adaptée vis-à-vis de l'application, et de développer le convertisseur autour de celle-ci. L'inconvénient de cette solution réside cependant dans des performances électriques et thermiques moins bonnes que les modules basés sur le concept MCM [5]. De plus, l'assemblage mécanique des modules SCM sur les PCB étant le plus souvent réalisé par des brasures, le désassemblage reste possible mais demeure complexe.

Un nouveau type d'intégration est proposé dans ces travaux. Basé sur le concept SCM, une puce SiC MOSFET 1,2kV est intégrée dans un packaging unitaire, i.e. un prépackage, permettant de favoriser des performances électriques et thermiques supérieures aux boîtiers discrets. L'assemblage des prépackages est ensuite pensé de sorte à favoriser des critères de modularité et démontabilité. Ce concept de packaging est présenté dans un premier temps. Les caractérisations électriques menées permettent ensuite de comparer les performances de ce concept aux types d'intégrations plus classiques tels que ceux développés dans [2] et [3].

2. PRESENTATION DU PACKAGING MODULAIRE 3D

2.1. Description du prépackage

Le concept de packaging développé dans ces travaux est basé sur l'intégration d'une puce SiC 1,2kV – 134A – 17mΩ au sein d'un prépackage unitaire réalisé par l'entreprise *Deep Concept*. Une représentation de ce dernier est proposée en Figure 1. Une puce SiC (ref. EP3M-1200-0017D1-R01 *Wolfspeed*) est dans un premier temps assemblée entre deux substrats DBC AlN afin d'assurer un assemblage mécanique, une isolation électrique et un refroidissement double-face de la puce. La face arrière de cette dernière est dans un premier temps brasée sur le premier DBC afin de réaliser l'interconnexion de l'électrode de Drain. Des bumps en cuivre permettent ensuite d'interconnecter les

autres électrodes en face avant de la puce, i.e. Grille, Source et Kelvin Source, à un second DBC.

De sorte à pouvoir réaliser un assemblage de plusieurs composants, chaque électrode de ces derniers doit être reportée en surface du prépackaging. Pour cela, un PCB est utilisé et inséré entre les deux DBC de l’assemblage. Les diverses interconnexions mécaniques entre couches peuvent être réalisées grâce à des brasures. Enfin, un gel diélectrique permettant une isolation périphérique de la puce est inséré entre les deux DBC. Les caractéristiques des diverses couches composant ce prépackaging sont résumées dans le Tableau 1. Une représentation de l’assemblage final du prépackaging est proposée en Figure 2.

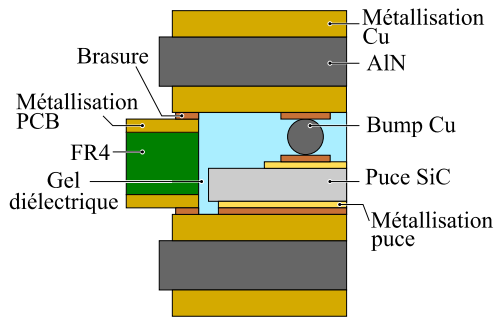


Figure 1 : Schéma synoptique du prépackaging développé (vue en coupe partielle).

Tableau 1 : Différentes couches utilisées pour l’assemblage du prépackaging avec les différents matériaux et épaisseurs associées.

Couche	Matériau	Épaisseur
Métallisation DBC	Cu	300µm
Substrat	AIN	1mm
Brasure	SAC305	non fixée
Bump	Cu	Diamètre 1mm
Puce	SiC	183µm
Métallisation PCB	NiAu	35µm
PCB	FR4	1,53mm

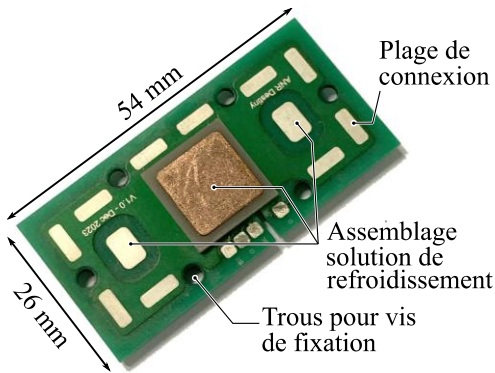


Figure 2 : Assemblage final du prépackaging développé.

2.2. Description d’une cellule de commutation

Une cellule de commutation est obtenue via l’assemblage de plusieurs prépackages, une vue en coupe est représentée en Figure 3. L’interconnexion des prépackages est réalisée par deux PCB nommés « carte mère ». Les interconnexions électriques entre prépackages et cartes mères sont obtenues via l’utilisation de matériaux nommés *Electrical Interface Material* (EIM). Ces

derniers peuvent être disposés au niveau des diverses plages de connexion prévues à cet effet (Figure 2). Ces EIM sont réalisés par des mousses métalliques [6] compressibles possédant un taux de porosité important (>85%). Initialement envisagées pour des applications telles que les reprises de contact sur puce [7], [8] ou la gestion thermique [9], ces mousses paraissent également intéressantes à étudier pour des interconnexions électriques de puissance entre PCBs. En effet, de par leurs propriétés de déformation, ces mousses permettent d’absorber les possibles différences de niveaux lors de l’assemblage du module, et ainsi d’améliorer la répartition du courant au sein de la structure. Dans cet exemple, l’assemblage de la cellule est réalisé à faible pression grâce à différentes vis. Ces dernières permettent également un alignement des diverses couches constituant la cellule de commutation.

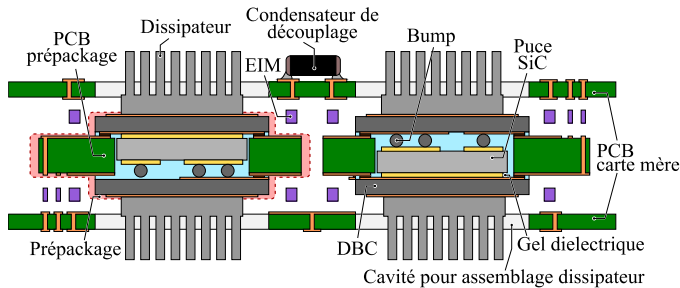


Figure 3 : Vue éclatée en coupe d’une cellule de commutation basée sur l’assemblage de prépackages 3D.

Chaque carte mère possède un circuit de commande rapprochée pour les différents prépackages composant la cellule de commutation. L’interconnexion série des prépackages est réalisée par la carte mère inférieure tandis que la carte mère supérieure permet une connexion de la cellule au busbar d’alimentation. Ce dernier PCB permet également une disposition de condensateurs de découplage au plus proche des puces afin de minimiser l’inductance parasite de la cellule de commutation. Dix condensateurs céramiques (1kV – 6,8nF C0G) disposés en parallèle permettent d’aboutir à un découplage total de 68nF pour la cellule.

De par son intégration à l’échelle d’une puce, cette cellule de commutation bénéficie d’une conception modulaire. L’assemblage à basse pression et l’utilisation des EIMs permet également d’envisager une démontabilité plus simple du module. Une cellule de commutation basée sur ce concept est illustrée en Figure 4. Ce concept d’intégration visant à étudier une nouvelle solution d’interconnexion électrique, les performances du module vis-à-vis de ce critère nécessitant d’être évaluées. Pour cela, différentes méthodes permettant de mesurer la résistance électrique et l’inductance parasite du module sont présentées dans la partie suivante.

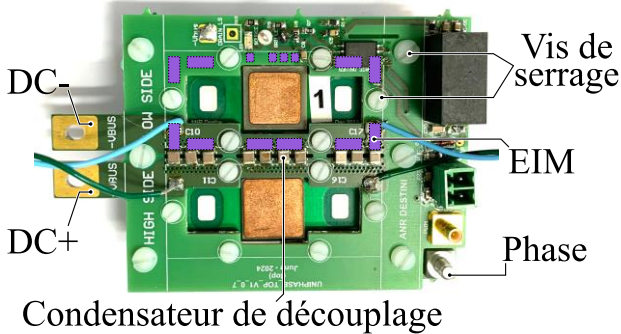


Figure 4 : Assemblage final d’une cellule de commutation (vue de dessus).

3. METHODOLOGIE DE CARACTERISATION ÉLECTRIQUE

Cette section propose de présenter la méthodologie de caractérisation des performances du concept de packaging développé. Les différentes solutions d'EIM utilisées pour l'assemblage de la cellule de commutation seront présentées dans un premier temps. Les méthodes de caractérisation statiques et dynamiques de ce module seront ensuite détaillées dans un second et troisième temps. Enfin, une dernière sous-partie proposera une étude paramétrique relative aux conditions de mise en pression de ce module afin de vérifier l'impact de ce paramètre sur les performances de la cellule.

3.1. Mousse métallique vs cuivre massif

L'objectif principal de la caractérisation électrique du module de puissance vise à évaluer la performance d'une interconnexion électrique réalisée grâce à un matériau déformable. Pour cela, deux cellules de commutation différentes sont caractérisées. La première est constituée d'EIM réalisées par des mousses métalliques représentées en Figure 5. Une seconde solution plus classique est représentée par des EIM constitués de blocs de cuivre massif. Une comparaison des performances de ces deux solutions permet d'investiguer si les caractéristiques de déformation des mousses sont intéressantes ou non pour un assemblage du module réalisé par pression. Pour ces deux solutions, l'épaisseur finale des interconnexions est de 2mm une fois le module totalement assemblé.

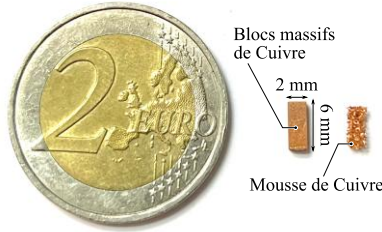


Figure 5 : Différentes solutions d'EIM utilisées pour l'assemblage des cellules de commutation. L'épaisseur finale de chacune des EIM est de 2mm lorsque la cellule est assemblée.

3.2. Résistance parasite du module de puissance

Une caractérisation statique permet d'évaluer la résistance électrique du module de puissance et de quantifier l'apport des interconnexions EIM vis-à-vis de l'ensemble. Les différentes résistances constituant l'assemblage, i.e. les pistes des PCBs cartes mères ($R_{PCB \text{ carte mère}}$), les pistes des PCBs prépackages ($R_{PCB \text{ prépackage}}$), les MOSFETs (R_{puce}) et les EIMs (R_{EIM}), peuvent être représentées sous forme d'un réseau de résistances 3D décrit en Figure 6. Bien que plusieurs EIM soient utilisées pour l'assemblage de la cellule, quatre résistances sont utilisées pour représenter ces contacts afin de faciliter la lecture. Enfin, le réseau 3D peut être simplifié sous une forme 2D afin de représenter les différentes résistances mesurées pour cette caractérisation. Cette simplification est représentée en Figure 7.

Un traceur de courbe (B1505A *Agilent Technologies*) permettant l'injection d'un courant pulsé (5A) au sein de la cellule, et la mesure des chutes de tension au travers des différentes résistances de l'assemblage (Figure 7) est utilisé afin de réaliser la caractérisation statique du module. Les différents MOSFETs de la cellule sont pour cela placés en mode conduction ($V_{GS}=15V$). En mesurant les tensions V_{TOT} , V_{DS1} et V_{DS2} , les résistances R_{TOT} , $R_{DSon,HS}$ et $R_{DSon,LS}$ peuvent respectivement être obtenues. La résistance du packaging R_{pack} peut ensuite être déduite en appliquant (1). Cette dernière comprend l'ensemble des interconnexions électriques du

packaging représentées par les pistes des divers PCB (cartes mères et prépackages) et les différentes EIM.

$$R_{pack} = R_{TOT} - (R_{DSon,HS} + R_{DSon,LS}) \quad (1)$$

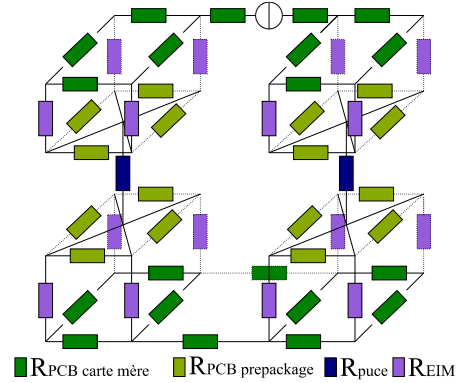


Figure 6 : Réseau de résistances 3D décrivant l'assemblage développé avec 4 EIMs par interconnexion.

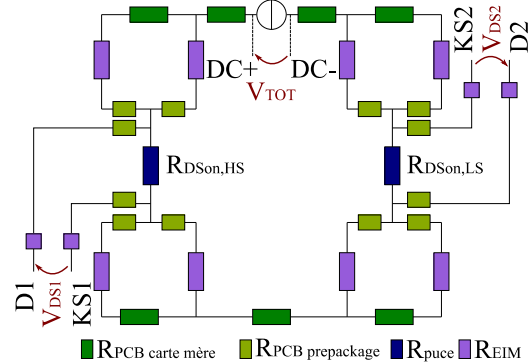


Figure 7 : Simplification 2D du réseau de résistance utilisé pour la caractérisation statique des cellules avec représentation des diverses chutes de tension mesurées.

3.3. Inductance parasite du module de puissance

La caractérisation dynamique du module de puissance vise à évaluer l'inductance parasite de ce dernier afin de comparer ce paramètre aux autres concepts de packaging plus généraux, i.e. une intégration MCM. L'inductance parasite représente l'un des principaux paramètres pouvant affecter les caractéristiques du module de puissance. En effet, les composants WBG étant sensibles aux éléments parasites, cette inductance peut induire des surtensions ou oscillations [10] pouvant être respectivement néfastes pour la puce ou le rendement de conversion du module.

Un circuit de mesure représenté en Figure 8 est utilisé afin de caractériser ce paramètre. En assurant la conduction ($V_{GS}=15V$) du MOSFET *Low-Side* (LS) de la cellule et un contrôle du MOSFET *High-Side* (HS), un circuit résonant peut être créé entre C et L_s lorsque l'étage de découplage est polarisé à basse tension (2V) et l'interrupteur HS fermé. L'utilisation de la résistance R permet de limiter fortement le courant rebouclant par la source d'alimentation. Via la mesure de la fréquence d'oscillation F_{osc} de ce circuit et l'application de (2), l'inductance parasite du module peut ensuite être déterminée. Le facteur d'amortissement du circuit résonant ayant peu d'impact sur le résultat de L_s, il ne sera pas considéré dans le calcul de F_{osc} .

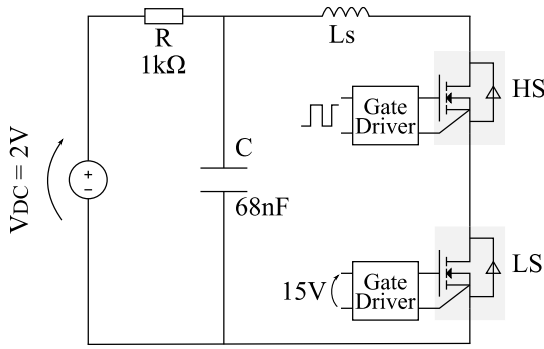


Figure 8 : Schéma électrique du circuit utilisé pour caractériser l'inductance parasite des cellules.

$$F_{osc} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (2)$$

3.4. Étude paramétrique sur l'impact des conditions de mise en pression du module

Dans le cas des modules de puissance assemblés par pression, la répartition de ce dernier paramètre sur la surface totale du module constitue un important aspect à contrôler. En effet, une répartition irrégulière de la pression sur le module peut affecter ses propriétés électriques (résistance et inductance) en raison d'une répartition non-homogène du courant [11]. Cette problématique peut notamment être soulignée pour les interconnexions massives en raison de leurs incapacités à se déformer et des possibles défauts de surface (rugosité, planéité) pouvant affecter les résistances de contact. Dans le cas contraire, les EIM représentées par les mousses bénéficient d'avantages de degrés de libertés de par leurs propriétés déformables. Une pression irrégulièrement répartie lors de l'assemblage pourrait ainsi être corrigée par la déformation de ces mousses et ainsi garantir de meilleures résistances. De plus, ces déformations pourraient également permettre de corriger les possibles différences de niveau lors de l'assemblage. A titre d'exemple, les différents mécanismes résultant d'une pression irrégulière sont illustrés en Figure 9 pour les deux types d'interconnexion.

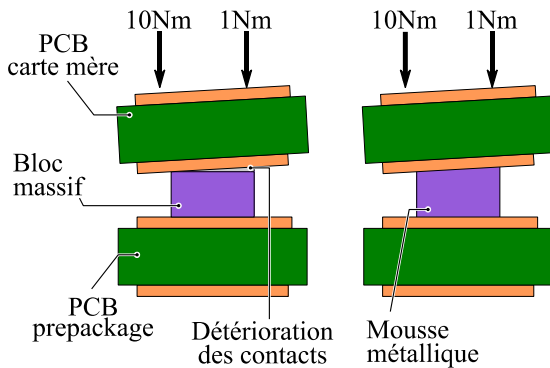


Figure 9 : Représentation des différents contacts mécaniques pour chacune des solutions d'EIM dans le cas d'une pression non-homogène sur les PCBs.

La Figure 10 représente une vue de dessus du module avec la répartition des vis de mise en pression, les plages de connexion des EIMs et les condensateurs de découplage. L'assemblage mécanique de la cellule étant directement impacté par ces vis, une modification des conditions de mise en pression du module peut aisément être obtenue. En effet, en serrant ou non les différentes vis de la Figure 10 pointées d'une étoile,

l'impact d'une pression irrégulière sur les propriétés statiques et dynamiques du module peut être évalué. Les vis liées à cette modification sont volontairement sélectionnées afin de modifier la répartition du courant dans une zone de contrainte pouvant affecter l'inductance de la cellule de commutation, i.e. au niveau de l'étage de découplage.

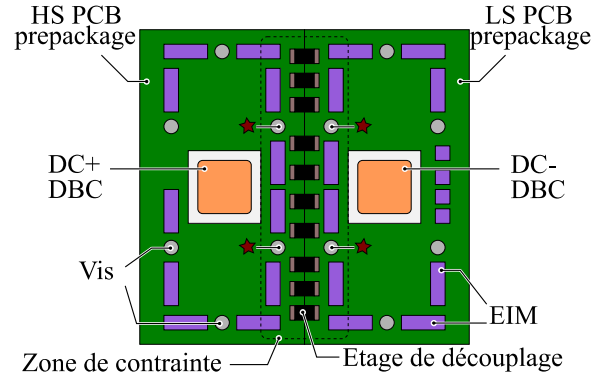


Figure 10 : Schéma synoptique illustrant la répartition des vis de mise en pression pour la cellule (vue de dessus). Une vis pointée d'une étoile indique un degré de liberté pour modifier les conditions de mise en pression.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats de résistance et d'inductance parasite sont dans un premier temps présentés lorsqu'un assemblage total du module est considéré, i.e. avec toutes les vis. L'impact d'une pression irrégulière sur ces deux grandeurs pourra ensuite être présenté lorsque différentes vis ne sont pas considérées pour l'assemblage.

4.1. Résultats avec toutes les vis serrées

Les résultats expérimentaux des deux cellules de commutation sont résumés dans le Tableau 2. Les résistances indiquées représentent la moyenne de huit mesures sur un unique pulse de courant. L'ensemble des résultats du Tableau 2 représentent par conséquent la moyenne μ de ces huit mesures ainsi que l'écart type σ associé.

Une comparaison des résistances permet d'observer des performances statiques équivalentes pour les deux cellules. En effet, avec une résistance R_{TOT} des cellules « mousse » et « massive » respectivement égale à 32,8mΩ et 32,9mΩ, les caractéristiques statiques du module semblent ne pas être impactées par la solution d'EIM. La résistance induite par le packaging de chaque cellule peut ensuite être déduite par (1). Avec R_{pack} pour les cellules « mousse » et « massive » respectivement égale à 2,3mΩ et 2,4mΩ, une très faible différence entre cellules peut être soulignée. Pour terminer, avec un packaging représentant 7% de la résistance totale du module, un impact non négligeable des interconnexions sur les performances du module est à remarquer. Néanmoins, certaines solutions permettant de réduire l'impact de ce packaging peuvent être mises en œuvre. A titre d'exemple, une augmentation de l'épaisseur des métallisations des PCBs pourrait être envisagée, celles-ci n'étant que de 35μm pour le cas présenté.

Les résultats d'inductance parasite sont également résumés dans le Tableau 2. Pour chacune des cellules, deux mesures de L_s sont réalisées afin d'obtenir un résultat moyen pour ce paramètre. Avec une inductance parasite pour les cellules « mousse » et « massive » respectivement égale à 2,7nH et 2,6nH, les caractéristiques dynamiques du module semblent une nouvelle fois peu sensibles à la solution d'EIM avec une

différence d'environ 5%. Avec des inductances inférieures à 3nH, le concept de packaging développé peut être comparé à une intégration MCM.

Tableau 2 : Résultats expérimentaux des résistances et inductances parasites de chacune des cellules pour des conditions d'assemblage totales.

	Cellule « Mousse »		Cellule « Massive »	
	μ	σ	μ	σ
R_{TOT}	32,8m Ω	28,6 $\mu\Omega$	32,9m Ω	18,8 $\mu\Omega$
$R_{DSon,HS}$	15,0m Ω	36,3 $\mu\Omega$	15,0m Ω	31,5 $\mu\Omega$
$R_{DSon,LS}$	15,4m Ω	27,9 $\mu\Omega$	15,4m Ω	34,2 $\mu\Omega$
R_{pack}	2,3m Ω		2,4m Ω	
L_S	2,7nH	63,6pH	2,6nH	233pH

Au vu des résultats présentés, une faible sensibilité des caractéristiques du module à la solution d'EIM peut être remarquée lorsque les conditions d'assemblage sont totales. La déformation du PCB sous ces conditions, pour le cas des EIMs massives, constitue certainement l'une des principales explications.

L'impact de la répartition de pression, telle qu'envisagé dans le paragraphe 3.4, sur les caractéristiques du module va maintenant pouvoir être étudié dans la sous-partie suivante.

4.2. Conditions d'assemblage partiel

Des caractérisations identiques à celles développées précédemment sont mises en œuvre dans le cas d'un assemblage partiel des cellules. Les résultats sont résumés dans le Tableau 3 où N représentent le nombre de vis considéré pour l'assemblage selon la Figure 10.

Tableau 3 : Résultats expérimentaux des résistances et inductances parasites de chacune des cellules pour des conditions d'assemblage partielles. N représente le nombre de vis considéré pour l'assemblage.

		N	12	11	10	9	8
Cellule « Mousse »	R_{pack} (m Ω)		2,4	2,4	2,5	2,8	2,7
	L_S (nH)		2,7	2,7	2,8	2,9	3,2
Cellule « Massive »	R_{pack} (m Ω)		2,5	3,0	2,9	3,8	4,0
	L_S (nH)		2,6	3,1	3,3	4,2	5,2

Les évolutions de la résistance du packaging et de l'inductance parasite des différentes cellules en fonction de N sont respectivement représentées en Figure 11 et Figure 12. Pour chaque cellule, une augmentation des résistances peut être relevée lorsque N diminue. Une détérioration des résistances de contact des interconnexions explique notamment cette augmentation. Pour la cellule « mousse », une différence de 17% peut par exemple être observée entre les résistances maximum (N=8) et minimum (N=12). Pour la cellule « massive », une différence plus importante de 60% peut être soulignée. Pour les inductances parasites, des différences de 19% et 100% entre les résultats extrêmes apparaissent respectivement pour les cellules « mousse » et « massive ». Un impact des conditions de mise en pression sur les caractéristiques du module apparaît alors ici clairement.

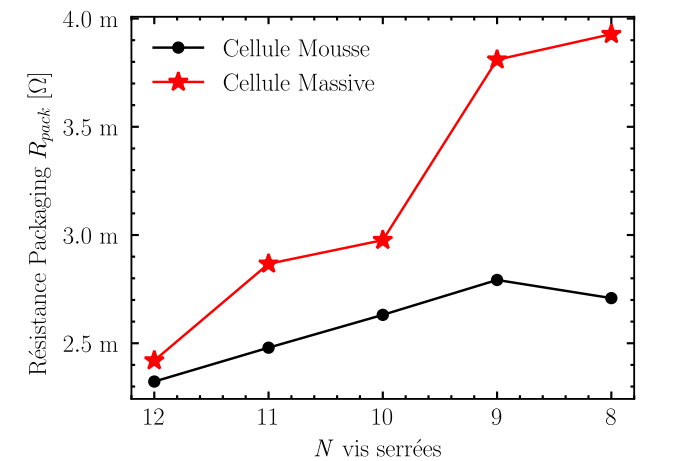


Figure 11 : Évolution de la résistance de packaging des cellules en fonction du nombre de vis N considéré pour l'assemblage.

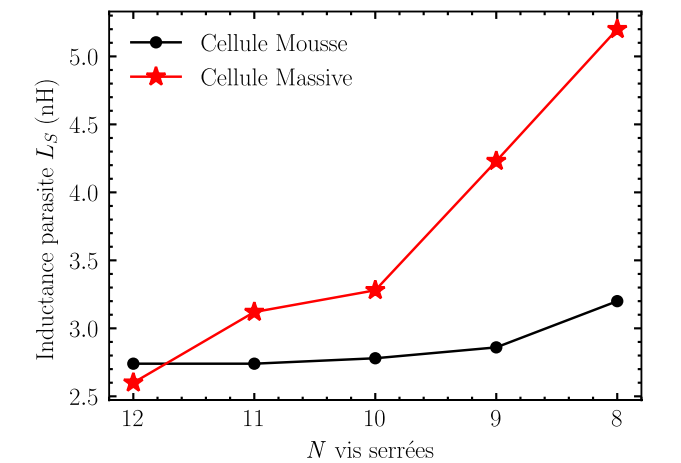


Figure 12 : Évolution de l'inductance parasite des cellules en fonction du nombre de vis N considéré pour l'assemblage.

Les résultats des Figure 11 et Figure 12 permettent également d'observer une plus faible sensibilité de la cellule « mousse » aux conditions d'assemblage. Cette dernière étant représentée par des EIMs déformables, une meilleure absorption des différences de hauteur résultant d'une pression irrégulière est possible. Pour le cas de la résistance du packaging, malgré des résultats proches lorsque N=12, une différence de 48% apparaît entre les cellules lorsque N=8. De la même manière pour les inductances parasites, une différence de 63% entre cellules est à souligner dans le cas des pires conditions d'assemblage, i.e. N=8. Au contraire des performances proches entre cellule dans le cas d'un assemblage total, des résultats très différents apparaissent ici pour la cellule « massive ».

5. CONCLUSIONS

Ce papier présente un nouveau concept de packaging modulaire 3D basé sur une intégration *Single Chip Module* (SCM). Un module de puissance basé sur ce concept peut être obtenu via l'assemblage de deux prépackages identiques, contenant chacun une puce SiC 1,2kV, basé sur les technologies DBC et PCB. Une isolation et un refroidissement double-face à l'échelle d'une puce sont notamment possibles avec ce prépackage. L'assemblage mécanique et électrique du module est respectivement effectué à faible pression grâce à des vis et un ensemble de cartes mères et interfaces électriques représentées par des mousses métalliques. Cet assemblage permet ainsi de favoriser des critères de modularité via le

développement d'un unique composant, i.e. le prépackaging, pouvant être destiné à un panel de structures de conversion. De plus, grâce aux interconnexions électriques sans maintien mécanique et un assemblage simplifié par pression, des critères de démontabilité sont également considérés.

Ce nouveau concept d'intégration étant basé sur un nouveau type d'interconnexion électrique, i.e. les mousses métalliques, son impact sur les performances du module nécessite d'être évalué. Deux cellules différentes, i.e. une cellule « mousse » et une cellule « massive », sont pour cela comparées. Avec des différences entre cellules d'environ 4% pour les résistances et inductances parasites, les performances du module ne semblent pas être impactées par la solution d'interconnexion électrique. Ces résultats identiques s'expliquent notamment par une déformation des cartes mères (pour les interconnexions massives) lorsque la pression est régulièrement répartie lors de l'assemblage.

Les conditions d'assemblage du module sont également évaluées pour ces deux cellules. Pour les deux cas, lorsque le nombre de vis pour l'assemblage diminue, les résistances et inductances parasites augmentent en raison d'une détérioration des résistances de contact entre prépackages et cartes mères et d'une moins bonne homogénéité du courant dans les contacts électriques. Cette augmentation est cependant moins prononcée pour les interconnexions par mousse métallique grâce à la déformation possible de ces contacts. Cette conclusion encourage alors l'utilisation d'interconnexions déformables pour des modules assemblés par pression. De plus, avec une inductance parasite inférieure à 3nH en particulier, des caractéristiques électriques proches des modules de puissance génériques peuvent être obtenues tout en favorisant des critères de modularité et démontabilité.

De futurs travaux relatifs à ce concept de packaging visent à envisager un nouveau système de mise en pression pour le module. Des vis étant ici utilisées par simplicité, un système de mise en pression externe pourrait par exemple être imaginé afin de garantir une pression homogène sur la surface du module et simplifier la mise en œuvre. Cet assemblage pourrait également être envisagé au travers des différentes solutions de refroidissement disposées de part et d'autre du module. Enfin, une modification du design électrique du module permettant d'améliorer les critères de densité de puissance ou les résistances et inductances parasites pourrait également être intéressant.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la région Auvergne-Rhône-Alpes (projet TAPIR – Pack Ambition Recherche 2021) et l'agence ANR (ANR-21-CE05-0037) pour le support financier apporté à ces travaux.

7. REFERENCES

- [1] D. Cittanti, E. Vico, et I. R. Bojoi, « New FOM-Based Performance Evaluation of 600/650 V SiC and GaN Semiconductors for Next-Generation EV Drives », *IEEE Access*, vol. 10, p. 51693-51707, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174777.
- [2] Z. Huang, C. Chen, Y. Xie, Y. Yan, Y. Kang, et F. Luo, « A High-Performance Embedded SiC Power Module Based on a DBC-Stacked Hybrid Packaging Structure », *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, n° 1, p. 351-366, mars 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2943635.
- [3] J. Morand, R. Perrin, J. Le Lesle, et G. Lefevre, « Design and Evaluation of a Building Block for a 100kW DC/DC Converter Based on PCB

- Process », in *CIPS 2022; 12th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, mars 2022, p. 1-6.
- [4] B. Baudais, H. B. Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne, et S. Lefebvre, « Environmental Impact of Modular Power Electronics Systems Considering Diagnostic-Driven Unit Replacement. », in *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juin 2024, p. 3182-3191. doi: 10.30420/566262451.
- [5] Z. Zhu, R. Yao, H. Li, J. Li, et Z. Chen, « Comparative Analysis on Switching Characteristics of Discrete SiC MOSFET in Press-pack Package and Wire-bonded Package », in *2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, nov. 2022, p. 66-71. doi: 10.1109/PEAC56338.2022.9959610.
- [6] L. Wang, W. Wang, K. Zeng, J. Deng, G. Rietveld, et R. J. E. Hueting, « Opportunities and Challenges of Pressure Contact Packaging for Wide Bandgap Power Modules », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 39, n° 2, p. 2401-2419, févr. 2024, doi: 10.1109/TPEL.2023.3332050.
- [7] 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 Letters*, vol. 38, n° 10, p. 1453-1456, oct. 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2748223.
- [8] R. Yao *et al.*, « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package », *IEEE Open Journal of Power Electronics*, p. 1-11, 2024, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3479293.
- [9] G. Janod, Y. Avenas, D. Bouvard, et R. Khazaka, « Evaluation of the thermal contact resistance between bulk copper and metal foam using transient measurements », in *CIPS 2022; 12th International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, mars 2022, p. 1-6. Consulté le: 29 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9862003/?arnumber=9862003&tag=1>
- [10] M. Meisser, M. Schmenger, et T. Blank, « Parasitics in Power Electronic Modules: How parasitic inductance influences switching and how it can be minimized », in *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, mai 2015, p. 1-8.
- [11] Y. Yang, L. Dorn-Gomba, R. Rodriguez, C. Mak, et A. Emadi, « Automotive Power Module Packaging: Current Status and Future Trends », *IEEE Access*, vol. 8, p. 160126-160144, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019775.