

Substrat céramique intégrant une poche nanocomposite résistive pour la montée en tension des modules de puissance

Marie-Laure LOCATELLI^{1,2}, Driss KENFAUI¹, Lionel LAUDEBAT^{1,2,3}, Zarel VALDEZ-NAVA^{1,2}, Céline COMBETTES¹, Pascal DUFOUR⁴, Christophe TENAILLEAU⁴, Sophie GUILLEMET-FRITSCH⁴

¹ Université de Toulouse ; UPS, INP ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie) ; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse, France. ² CNRS ; LAPLACE ; F-31062 Toulouse, France. ³ Université de Toulouse ; Institut National Universitaire Champollion ; Place de Verdun 81012 Albi Cedex, France. ⁴ CIRIMAT, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 31062 Toulouse cedex 9, France.

RESUME – Les calibres en tension attendus des futurs composants de puissance en carbure de silicium, au-delà de 15 kV, nécessitent d'adapter le système d'isolation électrique des modules de puissance afin de permettre leur utilisation pour les applications Moyenne et Haute Tension. Le papier présente l'étude d'une nouvelle structure de substrat céramique fonctionnalisé pour accompagner cette montée en tension. Ce substrat céramique, intégrant une poche résistive, permet de réduire le renforcement du champ électrique en périphérie des pistes métalliques portant les puces, et d'atténuer ainsi la contrainte électrique limitant la montée en tension de l'ensemble du module. L'intérêt de cette structure est d'abord démontré par une simulation numérique, puis sa faisabilité est prouvée grâce à l'élaboration d'un substrat isolant (en AlN) intégrant une poche nano-composite à matrice AlN incluant des nano-feuillets de graphène. Les résultats de caractérisation sous haute tension des substrats fabriqués, avec et sans poche résistive, sont présentés. Une amélioration significative de la tension de rupture, et le report de la contrainte électrique maximale en bord de poche sont confirmés pour les substrats fonctionnalisés. En revanche, les seuils de tension d'apparition de décharges partielles sont plus bas que ceux mesurés pour les substrats sans poche. La réalisation de ce substrat fonctionnalisé ouvre de nouvelles opportunités pour les problématiques liées à la montée en tension des composants de puissance.

Mots-clés— *Module de puissance, Haute tension, Packaging, Isolant, Substrat céramique, AlN, Graphène, Spark Plasma Sintering, Conductivité électrique, Point triple, Champ de rupture, Décharges partielles,*

1. INTRODUCTION

L'exploitation des sources d'énergie renouvelables diversifiées et éloignées des centres de consommation repose sur le développement du réseau de transport de l'électricité à courant continu à très haute tension, et des convertisseurs de puissance très haute tension qui doivent leur être associés. Disposer, dans les prochaines années, de puces de composants de puissance en carbure de silicium (SiC) avec une tenue en tension dépassant les 15 kV (telles qu'annoncées ou rapportées dans la littérature [1-3]) représente un potentiel considérable de simplification et d'augmentation des performances de ces

convertisseurs électroniques de très forte puissance, à condition cependant de pouvoir assembler ces nouveaux composants, sans affecter le gain apporté en termes de compromis entre tenue en tension et densité de puissance.

Etant un problème déjà pénalisant pour les modules de puissance actuels (de tenue en tension maximale de 6,5 kV), la réduction du champ électrique induit en bordure des pistes métalliques portées par le substrat céramique, sur lesquelles sont attachées les différentes puces et connexions au sein d'un module, a fait l'objet de plusieurs travaux publiés. Il en ressort que les solutions envisagées reposent soit sur la modification des propriétés physiques du milieu d'encapsulation en surface [4-6], soit sur la géométrie de la structure dans la zone du point triple [7-8-9], soit une combinaison de ces techniques [10].

Nous nous sommes intéressés à une voie alternative, qui repose pour la première fois sur une modification de propriétés physiques au sein du substrat céramique isolant. Le concept de substrat céramique intégrant une zone (appelée ici poche) résistive étendue sous la zone du point triple, a pour objectif d'atténuer le champ renforcé au point triple, en reportant sa localisation, et en réduisant son intensité, dans une zone de la structure moins contrainte par ailleurs. Le développement de ce type de substrat céramique avec poche nano-composite résistive et la validation expérimentale de son fonctionnement par la caractérisation de démonstrateurs ont fait l'objet du projet ANR-ASTRID 'Filcera' (2017-2019).

Ce papier débutera par une analyse par simulation numérique du principe et de l'intérêt du concept proposé. Une deuxième partie présentera, après une description succincte de la procédure de fabrication mise en œuvre durant le projet, les propriétés électriques de la matrice céramique et de la poche céramique nano-composite élaborées, et utilisées ensuite pour la fabrication des substrats fonctionnalisés proposés. La troisième partie sera consacrée à la présentation et à la discussion des résultats des essais de détermination de la tension de rupture diélectrique et de la tension du seuil d'apparition de décharges partielles, obtenus pour les substrats avec poche résistive, et pour les substrats sans poche.

2. ANALYSE DU CONCEPT PAR SIMULATION NUMERIQUE

2.1. Présentation de la structure et du concept

Le concept de base repose sur un substrat céramique isolant (à très faible conductivité électrique), comportant localement des zones à conductivité plus élevée. Ces poches peuvent être continues sous la métallisation (de même forme et de dimension plus grande) comme présenté par le schéma en Figure 1, ou uniquement positionnées sous le bord des métallisations.

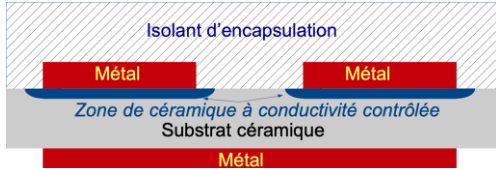


Figure 1 : Schéma d'un substrat céramique métallisé, fonctionnalisé avec des poches à résistivité contrôlée sous les métallisations.

L'étude numérique de ce concept a été menée par simulation par éléments finis avec l'outil COMSOL Multiphysics, afin d'analyser l'impact de différents paramètres (à savoir la conductivité électrique de la poche et la fréquence de la tension appliquée) sur la répartition du champ électrique au sein de la céramique et du milieu environnant en surface du substrat métallisé. La structure présentée en Fig.1, avec une métallisation supérieure, a été considérée, tant pour l'étude en simulation que pour l'étude expérimentale qui sera présentée plus loin.

La structure simulée ici est donc constituée d'un substrat comportant une électrode métallique sur chaque face. La face supérieure est encapsulée par un matériau diélectrique, lui-même surmonté d'une couche d'air. Les épaisseurs, largeurs totales, et propriétés de ces différentes zones sont rassemblées dans le tableau 1. Les propriétés électriques et les épaisseurs sont représentatives des matériaux constituant les modules de forte puissance actuels, à savoir du nitrure d'aluminium (AlN) pour le substrat, du gel silicone pour l'encapsulant, et du cuivre pour les électrodes. (Pour cette étude théorique, les rayons de courbure aux extrémités des électrodes métalliques et de la poche ont été considérés nuls).

Le maillage, constitué de triangles sur l'ensemble de la géométrie, a été affiné dans les zones spécifiquement étudiées, la poche, le substrat et l'encapsulant, avec des mailles de taille maximale de 50 μm là où le champ électrique est renforcé.

Tableau 1 : Paramètres géométriques et propriétés physiques utilisés pour la simulation des substrats céramique métallisé avec et sans poche résistive.

	Largeur L (mm)	Epaisseur e (mm)	Permittivité relative, ϵ_r	Conductivité électrique, σ (S/m)
Substrat isolant	20	1,2	9	10^{-12}
Electrodes	12	0,15	-	-
Encapsulant	30	1	2,8	10^{-14}
Air	60	30	1	0
Poche	14	0,15	9	$[10^{-11} - 10^{-1}]$

Parmi les différentes caractéristiques de la structure simulée (Tableau 1), la conductivité électrique est la seule propriété physique variable de l'étude discutée dans ce papier. Les résultats de simulation rapportés correspondent à l'application d'une tension sinusoïdale d'amplitude 10 kV entre les deux électrodes considérées comme équipotentielles (potentiel haut sur l'électrode supérieure). La fréquence du signal est l'autre variable de l'étude. Les grandeurs simulées présentées correspondent aux valeurs des amplitudes du champ électrique

et du potentiel en régime stationnaire, issues de la résolution couplée de l'équation de Poisson et de la loi d'Ohm intégrant le courant de déplacement, en tout point du maillage.

Le résultat de simulation présenté en Figure 2 illustre l'effet de la présence d'une poche résistive au sein de la céramique, et l'intérêt recherché de suppression du pic de champ dans la zone du point triple au bord de l'électrode du haut. Dans ce cas en effet, la zone de resserrement des équipotentielles n'est plus au pied de la piste métallique (Fig. 2 en haut), mais elle est reportée dans la zone plane en bout de poche (Fig.2 en bas). Cette dernière, de résistivité plus faible que la céramique isolante et le milieu encapsulant, se comporte de fait ici comme le prolongement de l'électrode métallique.

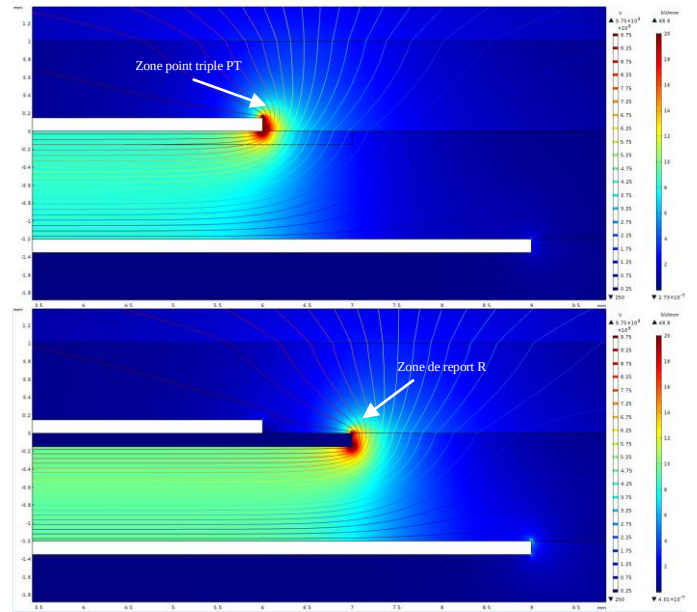


Figure 2 : Simulations représentant les équipotentielles et l'amplitude du champ électrique pour un potentiel sinusoïdal à 50 Hz d'amplitude 10 kV, pour le cas d'un substrat uniforme (en haut) et pour le cas d'un substrat avec poche de conductivité élevée fixée à 10^{-1} S/m (en bas).

Les valeurs des champs maximaux dans la zone dite « zone de report » (appelée « zone R ») sont respectivement de 48,8 kV/mm dans la céramique et 30,2 kV/mm dans l'encapsulant, à comparer aux valeurs dans le cas de la structure sans poche dans la zone du point triple (appelée « zone PT »), correspondant respectivement à 68,8 kV/mm dans le substrat AlN et 60,0 kV/mm dans le gel. Dans cet exemple, les champs maximaux sont donc réduits respectivement de 30% et 50% dans la céramique et dans le gel. Ils sont en outre reportés dans une zone plane, où les risques de présence d'imperfections liées aux étapes de métallisation (protubérances) et d'encapsulation (présence de bulles en bord de pistes ...), n'existent pas.

2.2. Influence de la conductivité de la poche résistive et de la fréquence de la tension sinusoïdale appliquée

Pour une fréquence donnée de la tension sinusoïdale appliquée à la structure, la valeur de la conductivité de la poche a une influence sur la valeur et la localisation des maxima du champ électrique dans la céramique et dans le gel. L'étude par simulation montre que lorsque la conductivité de la poche augmente, les pics de champ dans la zone PT décroissent tandis qu'ils croissent dans la zone R. Et il existe une valeur de conductivité de la poche pour laquelle on peut observer un équilibre et une réduction des contraintes en champ dans les deux régions. Pour l'exemple considéré précédemment d'une polarisation sinusoïdale à fréquence de 50 Hz, cette gamme de

transition se situe pour des valeurs de conductivité comprises entre 10^{-7} et 10^{-6} S/m, et la valeur particulière de la conductivité correspondant aux plus faibles valeurs de champ dans la structure est dans ce cas égale à $\sigma_E = 2,5 \cdot 10^{-7}$ S/m. La simulation correspondante est illustrée en Figure 3.

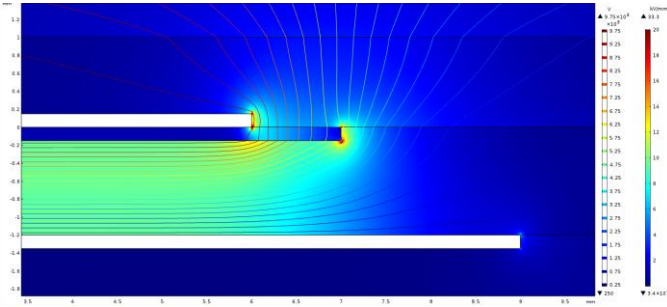


Figure 3 : Répartition du champ électrique et des équipotentielles sous polarisation sinusoïdale d'amplitude 10 kV et de fréquence 50 Hz, avec poche de conductivité $\sigma_E = 2,5 \times 10^{-7}$ S/m, pour laquelle la contrainte maximale en champ est équilibrée entre les zones PT et R.

Cependant, cette gamme de conductivité de transition (et donc σ_E), déterminante pour le contrôle de la répartition du champ en périphérie de la piste métallique, dépend de la fréquence de la tension de polarisation appliquée. Pour exemple, la figure 4 montre que, pour une poche avec conductivité égale la valeur particulière σ_E identifiée à 50 Hz, les pics de champs sont effectivement reportés en zone R à fréquences plus faibles (exemple en Fig. 4a pour 0,1 Hz), alors qu'ils redeviennent présents et plus élevés en zone PT pour les fréquences suffisamment élevées (exemple en Fig. 4b pour 20 kHz).

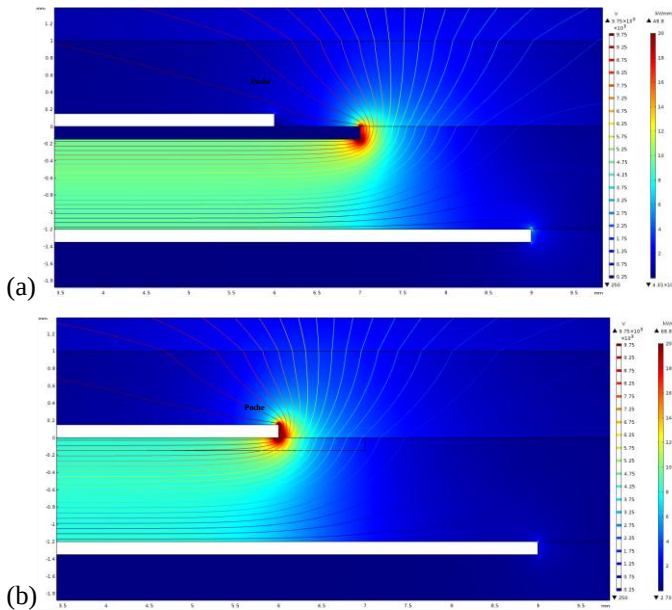


Figure 4 : Répartition du champ électrique et des équipotentielles en périphérie de piste métallique d'un substrat céramique avec poche résistive, sous polarisation sinusoïdale d'amplitude 10 kV. Effet de la fréquence de polarisation sur la localisation du renforcement de champ, avec une conductivité de la poche $\sigma_E = 2,5 \times 10^{-7}$ S/m, pour (a) $f = 0,1$ Hz, (b) $f = 20$ kHz.

2.3. Stratégie de dimensionnement pour la protection des modules de puissance Moyenne Tension

Au sein d'un convertisseur d'énergie électrique, les modules de puissance ne fonctionnent pas en régime sinusoïdal, mais en régime d'impulsions dans la très grande majorité des cas. Les fréquences des sollicitations électriques peuvent aller jusqu'à quelques 10 kHz pour les applications

adressées ici, reposant sur l'emploi de puces telles que les actuels transistors MOSFETs et diodes, ou futurs IGBTs en SiC de tenue en tension égale ou supérieure à 10 kV. Le système d'isolation de ces modules est par ailleurs aussi soumis à des variations de tension très rapides lors des fronts de montée et de descente de la tension aux bornes de ces puces. Il est donc nécessaire dans ces conditions de dimensionner les caractéristiques de la poche en fonction de la vitesse de variation maximale de la tension vue par le système d'isolation, de façon à ce que la contrainte de champ maximal engendrée se situe dans la zone R, quelle que soit la phase de fonctionnement. Une estimation de la valeur de conductivité (à épaisseur donnée) de la poche, pour une application donnée, peut alors être faite par simulation en régime sinusoïdal, en considérant la fréquence la plus élevée représentative des plus grandes vitesses de variation en tension attendues. La littérature fait état des vitesses de commutation que peuvent atteindre les transistors MOSFET SiC 10 kV, actuellement disponibles et utilisés pour la démonstration de convertisseurs d'énergie performants pour les applications Moyenne Tension (MV) et Haute Tension (HV) [11]). Ces composants présentant des vitesses de commutation pouvant atteindre jusqu'à 100 kV/ μ s [12], l'effet d'un temps de montée à 10 kV en 100 ns peut être approché par une simulation en régime sinusoïdal, en considérant une fréquence de 2,5 MHz (100 ns correspondant alors à un quart de période). Une telle simulation permet d'estimer une conductivité de la poche devant être de l'ordre de 1 S/m afin d'assurer la fonction de report souhaitée, quelle que soit la phase de fonctionnement. Nous verrons au paragraphe suivant que le procédé d'élaboration mis au point dans le cadre du projet ANR-ASTRID 'Filcera' permet l'obtention de substrats en AlN avec poche résistive, de conductivité contrôlée pouvant être de cet ordre de grandeur.

3. PROPRIETES DES MATERIAUX ET DU SUBSTRAT COMPOSITE

L'un des objectifs principaux du projet 'Filcera' était de démontrer la faisabilité d'un substrat fonctionnalisé à base d'AlN tel que présenté en Figure 1, ainsi que son intérêt en termes de gain sur la tenue en tension de substrats métallisés dédiés aux modules de forte puissance. Une grande partie des travaux a d'abord dû être consacrée à l'identification des matériaux et du procédé d'élaboration, permettant d'obtenir les caractéristiques visées. Ces travaux ont abouti à un dépôt de brevet [13].

3.1. Fabrication et propriétés du matériau isolant AlN_Filcera

Le nitrure d'aluminium (AlN) est le matériau actuellement utilisé comme substrats dans les applications à haute tension et forte puissance, du fait de ses propriétés électriques, thermiques et mécaniques adaptées au besoin de fonctions d'isolation électrique, de conduction thermique et de support mécanique. Le procédé de mise en forme par frittage flash SPS (Spark Plasma Sintering) [14] a été choisi pour la fabrication des substrats utilisés dans cette étude. Favorable aux conditions d'élaboration de céramiques AlN hautement densifiées (≥ 99 %) dans des temps de frittage très courts, le SPS offre également l'avantage de permettre le cofrittage de matériaux différents au sein d'une même pièce remplissant plusieurs fonctions.

La figure 5 montre un exemple des substrats en AlN_Filcera réalisés *in fine* pour les essais du projet. Ils présentent un diamètre de 20 mm (correspondant au diamètre du moule utilisé pour le frittage au SPS), et une épaisseur ajustée par polissage de 1,27 mm (épaisseur choisie égale à

celle de substrats en AlN commerciaux approvisionnés, pour comparaison).

La figure 6 présente l'évolution de la conductivité électrique à 20 °C du substrat AlN_Filcera. La mesure a été faite au moyen d'un spectromètre Alpha A de Novocontrol. Le résultat montre un comportement de matériau diélectrique isolant, avec une conductivité électrique peu élevée et croissante dans toute la gamme de fréquence explorée (de l'ordre de 10^{-10} S/m à 50 Hz, et 10^{-7} S/m à 10^5 Hz). Ces premiers résultats très satisfaisants ont validé la voie retenue dans le projet pour l'élaboration de la matrice céramique isolante.



Figure 5 : Substrat AlN_Filcera de diamètre 20 mm, et d'épaisseur 1,27 mm, après amincissement par polissage.

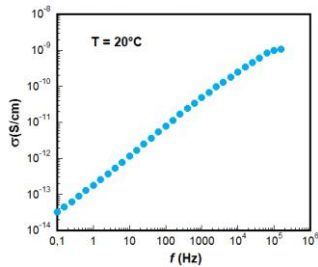


Figure 6 : Conductivité électrique en fonction de la fréquence mesurée à 20°C pour le substrat AlN_Filcera.

3.2. Propriétés du matériau AlN_MCG

L'analyse de l'état de l'art très récent a montré que l'incorporation de graphène multi-couches (MCG) dans la matrice d'AlN, en vue de contrôler sa conductivité électrique, présentait plusieurs atouts, tant du point de vue de sa compatibilité avec l'étape de frittage (cofrittage) envisagée, que du point de vue des propriétés physiques du matériau nanocomposite résultant (électriques [15], mais aussi mécaniques).

Les propriétés diélectriques de nanocomposites AlN_MCG avec un taux volumique de MCG respectivement de 1,25 % et de 2,5 % ont été également déterminées par spectroscopie diélectrique. Les résultats indiquent que la conductivité électrique horizontale est constante en fonction de la fréquence dans toute la gamme d'étude (de 0,1 Hz à 1 MHz), et de valeurs respectivement égales à 2×10^{-4} S/m et 3 S/m. Ils démontrent donc la faisabilité de contrôler la conductivité de la matrice en AlN par l'ajout de faibles taux de MCG, et d'atteindre les ordres de grandeur de σ nécessaires pour les applications visées, selon l'étude par simulation présentée ci-dessus.

3.3. Caractéristiques du démonstrateur de substrat fonctionnalisé pour la montée en tension.

Afin d'étudier expérimentalement l'intérêt du concept de substrat céramique isolant fonctionnalisé proposé pour contribuer à la montée en tension dans les modules de puissance, le démonstrateur retenu dans le cadre du projet Filcera est un substrat composite sous la forme d'un disque intégrant une poche.

Les caractéristiques dimensionnelles de ce démonstrateur sont données en Figure 7a. Les diamètres et épaisseurs respectifs du substrat isolant et de la poche intégrée sont : $L_s = 20$ mm ; $e_s = 1,27$ mm et $L_p = 14$ mm et $e_p = 150$ μ m. La figure 7b présente une photographie de l'un des substrats fonctionnalisés, réalisés en vue des essais de tenue en tension.

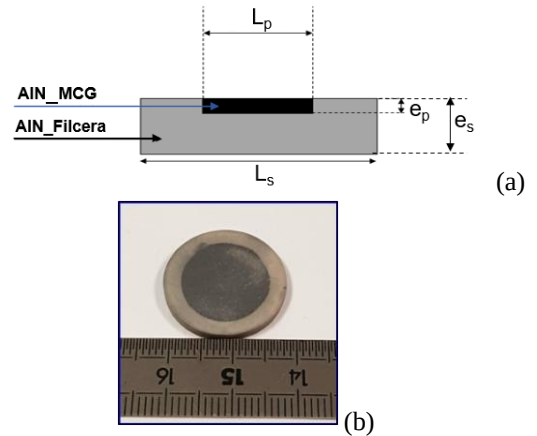


Figure 7 : Démonstrateur de substrat fonctionnalisé réalisé : (a) dimensions de la pièce composite, (b) photographie.

4. CARACTERISATIONS SOUS HAUTE TENSION ET DISCUSSION

Des substrats composites (tels que celui présenté en Fig. 7), avec poche en AlN_MCG à 1,25 % vol., ont été soumis à des tests de rupture diélectrique et de détection de décharges partielles (DP). Ils ont été comparés aux substrats AlN_Filcera, tels que celui présenté en Fig.5, soumis aux mêmes essais.

Afin de pouvoir effectuer les tests électriques, des électrodes concentriques en or ont été déposées sur la face avant et sur la face arrière de chaque substrat, par pulvérisation cathodique. L'épaisseur de ces électrodes est de l'ordre 150 nm. Les diamètres des électrodes supérieure et inférieure sont respectivement 10 mm et 18 mm. Chaque lot comporte respectivement 7 et 6 pièces similaires, afin de permettre une première étude statistique de la tension de rupture (V_{BR}) et de la tension de seuil d'apparition des DP (TADP).

Après coulage d'une résine pour enrober l'ensemble [substrat+plots de contact], puis réticulation de la résine et démoulage, le bloc cylindrique obtenu, est découpé comme présenté en Fig. 8, afin de permettre la prise de contact électrique.



Figure 8 : Échantillon encapsulé, après démoulage et découpe de l'excédent de résine, permettant la prise de contact électrique. (Vue de dessus dans la direction verticale du coulage de la résine).

4.1. Résultats des mesures de tension de rupture AC

La tension de rupture est la valeur ultime au-delà de laquelle il y a perte irréversible de la fonction d'isolation du dispositif. Les mesures ont été effectuées à 24°C en plaçant l'échantillon, connecté et immergé dans un bain de liquide isolant (Galden HT55), dans une cellule conçue pour des essais à température ambiante. La tension sinusoïdale à fréquence de

50 Hz, est fournie par une source composée d'un transformateur haute tension (France Transfo, $V_{\max} = 100$ kV) et d'un pupitre de commande. Elle est appliquée en croissant avec une rampe de 1,5 kV/s (afin d'être dans les conditions de mesure de la rigidité diélectrique à court terme, pour laquelle la norme ASTM D149 préconise un délai d'apparition de la rupture entre 10 et 20 s). La détection de la valeur V_{Br} s'effectue par la détection de la montée en courant dans le circuit. Le seuil de détection pour la rupture diélectrique des échantillons est de 5 mA, avec un délai à la coupure du courant d'environ 20 ms.

Les résultats des mesures présentées au Tableau 2 et les valeurs déduites de leur exploitation selon la statistique de Weibull au Tableau 3, montrent une distribution de la tension de rupture avec une valeur moyenne et un facteur d'échelle α plus élevés pour le lot des substrats fonctionnalisés, comparés à ceux obtenus pour le lot des substrats AIN_Filcera uniformes. La présence d'une poche résistive permet d'élever la valeur efficace moyenne de la tension de rupture de 20,5 kV à 23,3 kV, et la valeur efficace du paramètre α de 21,4 kV à 24,6 kV. Ces premiers résultats montrent donc qu'un gain de l'ordre de 15 %, est apporté par la présence d'une poche résistive (de conductivité horizontale égale à 10^{-4} S/m) sur la tension de rupture efficace à 50 Hz.

Tableau 2 Valeurs efficaces de la tension de rupture V_{Br} , mesurées sur le lot de substrats composites et le lot de substrats uniformes.

Substrat composite avec poche en AIN_MCG à 1,25% en vol.	Substrat AIN_Filcera
25,80	19,80
22,00	20,60
28,97	20,30
19,07	25,00
20,17	19,88
24,00	17,57
23,07	

Tableau 3 Valeurs efficaces de la tension moyenne, du facteur d'échelle α et valeurs du paramètre de forme β , issus de l'analyse statistique des mesures de tension de rupture diélectrique.

	Substrat composite avec poche en AIN_MCG à 1,25% en vol.	Substrat AIN_Filcera
V_{Br-moy}	23,30	20,53
α	24,66	21,42
β	7,35	8,25

Outre les valeurs de la tension de rupture, la localisation de la zone dégradée par la rupture est un autre résultat attendu. La différence est clairement observée après claquage, entre les substrats sans poche et les substrats avec poche, comme on peut le voir sur les photographies présentées en Fig.9 : une marque noire se situe en bord de l'électrode supérieure en or pour les substrats homogènes (Fig.9a), alors qu'une marque noire radiale allant du bord externe de la poche au bord de la métallisation est observée pour les substrats composites (Fig. 11b). (Sur la Fig.9b, cette trace est bordée de zones blanches qui traduisent le décollement de la résine).

Ces observations permettent de déduire un claquage survenu en bord d'électrode supérieure pour le substrat sans poche, dû à un renforcement du champ électrique à cet endroit. Pour le substrat fonctionnalisé, elles semblent de même en accord avec l'hypothèse d'un claquage lié à un pic de champ électrique en périphérie de la zone résistive. Ce dernier produit

alors un chemin de courant rejoignant l'électrode métallique à travers la poche. Ce report du renforcement du champ en périphérie de la poche serait alors à l'origine de l'augmentation de la valeur de la tension de rupture mesurée. Un examen plus poussé, après retrait de la résine et coupe dans la zone dégradée permettra de fournir plus d'informations.

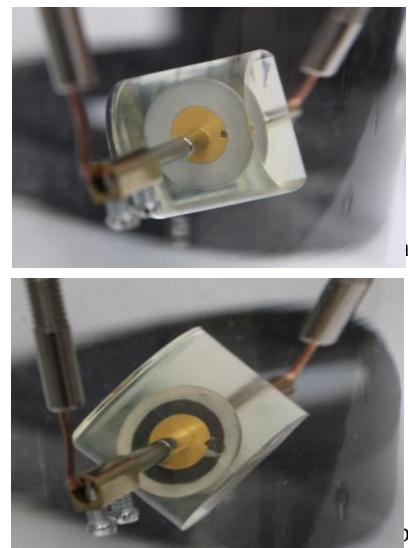


Fig. 9 : Exemples d'échantillons de substrats métallisés (a) AIN_Filcera et (b) composites avec poche en AIN_MCG (1,25% en vol.), photographiés après claquage, permettant d'observer les traces apparues en face supérieure.

4.2. Résultats des mesures de tensions d'apparition de DP

La mesure de la tension de seuil d'apparition de DP est une caractérisation importante pour déterminer la limite en tension maximale d'utilisation fiable d'un système donné. Elle peut en effet notamment permettre de détecter la présence de DP déclenchées à l'intérieur de cavités insérées dans l'assemblage, pouvant conduire à la dégradation de l'isolation au cours du temps. L'occurrence de DP sous polarisation a des conséquences sur les performances en fonctionnement et sur la fiabilité du système. Ce phénomène est très fréquent, voire inévitable en pratique dès lors qu'un système est soumis à des tensions élevées (> 1 kV). Le phénomène de DP se manifestant notamment par des impulsions de courant, sa détection par mesure électrique est possible et classiquement utilisée pour qualifier les modules de puissance. Cette technique repose donc sur une mesure de quantité de charges mises en mouvement à chaque impulsion de courant.

Les tests sur les deux séries de substrats composites et uniformes ont été effectués à l'aide d'une baie dédiée à ce type de mesures, dont les caractéristiques principales sont : une tension d'essai AC 50 Hz, ajustable entre 0 – 15 kV_{rms}, un courant maximal de 1 A. La sensibilité de détection est inférieure à 1pC (typiquement égale à 0,2 pC). « ICM System » de la société Power Diagnostix Systems GmbH est le système de détection utilisé. La figure 10 montre la configuration de la cellule de test (lors de l'étape de calibration), ainsi que les conditions de test de l'échantillon, connecté et placé dans un bain de liquide diélectrique comme lors des essais de rupture. Lors des mesures de DP, l'échantillon sous test est relié à la terre.

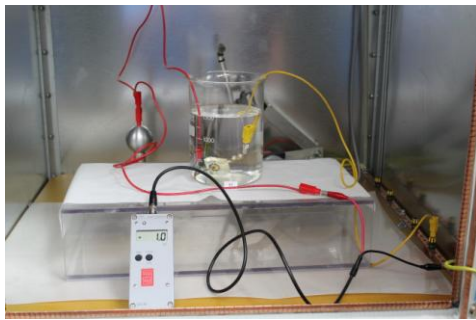


Fig. 10 : Vue de la cellule de mesures de DP, de la connectique et de l'échantillon à tester placé dans un bain liquide isolant. (Etape de calibration).

Alors que la tension appliquée est augmentée manuellement par paliers (partant d'une tension nulle), la tension pour laquelle la quantité de charge détectée atteint 1 pC et se maintient à cette valeur sous polarisation constante (environ 20 s) est relevée comme la valeur TDAP. La figure 11 permet de comparer les résultats des mesures de TADP obtenus. On observe que la quasi-totalité des substrats AlN_Filcera n'a pas permis de détecter l'apparition de DP pour des tensions allant jusqu'à la tension maximale de mesure de 12 kV_{rms}. En revanche, la série de substrats composites avec poche à conductivité contrôlée a conduit à un seuil de tension compris entre 3 et 6 kV_{rms}.



Fig. 11 : Tensions de seuil d'apparition de DP correspond à une quantité de charge mesurée égale à 1pC pour les substrats composites (série B) et les substrats uniformes (série C).

Les observations faites pour les substrats AlN_Filcera indiquent que la nature et la géométrie de l'électrode d'une part, et la qualité de l'encapsulation d'autre part, n'induisent aucune impulsion de courant détectable (relativement au critère retenu). Les valeurs plus basses de TADP obtenues pour les substrats composites seraient alors produites par un mécanisme inhérent à la poche en AlN_MCG ou à ses interfaces avec les autres matériaux. L'hypothèse de la présence de vacuoles au sein du matériau AlN_MCG ou aux interfaces, pouvant être le lieu de déploiement des DP, ne paraît pas plausible, au vu des observations faites par MEB-FEG, montrant l'absence de porosité et une densité élevée de la céramique. Des mécanismes physiques, impliquant d'autres facteurs pouvant conduire à la génération d'impulsions de courant sous l'effet d'un champ seuil, doivent être envisagés. En particulier, une analyse de l'impact de la présence des nanoparticules de graphène en volume et en surface de la poche, sur le comportement électrique sous fort champ du matériau nanocomposite AlN_MCG, doit être menée.

5. CONCLUSION

Cette première étude a montré que la structure originale de substrat céramique isolant avec poche nano-composite résistive, et le procédé d'élaboration proposés, offrent des potentialités d'amélioration de la tension de rupture des modules de puissance. Les résultats ont montré la faisabilité de contrôler la conductivité électrique de la céramique AlN avec

un très faible taux de nano-feuillets de graphène d'une part, et la compatibilité de ce matériau AlN_MCG pour la réalisation de pièces composites à matrice AlN, par frittage SPS, d'autre part. Les structures élémentaires de substrats fonctionnalisés métallisés, enrobées de résine, qui ont été réalisées, ont permis de montrer un gain de 15 % sur la valeur de la tension de rupture et un report de la zone de claquage en périphérie de la poche résistive. Ce gain pourrait d'ailleurs être plus significatif encore pour des structures de substrats métallisés réalistes, susceptibles de présenter plus de défauts au point triple (du fait de métallisations plus épaisses, de protubérances importantes, de bulles dans l'encapsulant en pied de métallisation, ...). Ce concept ne sera cependant pleinement validé que si les mécanismes à l'origine des faibles valeurs de tension de seuil d'apparition de DP observées peuvent être identifiés. Il s'agira d'étudier en particulier l'impact de la nature des particules conductrices employées.

6. REFERENCES

- [1] J. Milan, P. Godignon, X. Perpina, Amador Pérez-Tomás, J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, N° 5, May 2014.
- [2] A. V. Bilbao, J. A. Schrock, W. B. Ray, M. D. Kelley and S. B. Bayne, "Analysis of advanced 20 KV/20 a silicon carbide power insulated gate bipolar transistor in resistive and inductive switching tests," 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC), Austin, TX, 2015, pp. 1-3
- [3] Y. Yonezawa, Tomonori Mizushima, Kensuke Takenaka, et al., "Low Vf and highly reliable 16 kV ultrahigh voltage SiC flip-type n-channel implantation and epitaxial IGBT," 2013 IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, DC, 2013, pp. 6.6.1-6.6.4.
- [4] J. Zhou, S. Ang, A. Mantooth, J. C. Balda, "A nano-composite polyamide imide passivation for 10 kV power electronics modules. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE," 2012.
- [5] L. Donzel, J. Schuderer, "Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, vol. 19, no 3, p. 955-959. 2012.
- [6] S. Diaham, Z. Valdez Nava, L. Lévêque, G. Belijar, L. Laudebat and T. Lebey, "Method for processing an electrically insulating material providing same with self-adjusting electric field grading properties for electrical components", International Patent application, N° PCT/EP2017/063740, CNRS/UPS/INUC, 6 June 2017- French Patent application, N° FR 16 55173, CNRS/UPS/INUC, 6 June 2016.
- [7] H. Hourdequin, L. Laudebat, M-L. Locatelli, Z. Valdez-Nava, P. Bidan, Metallized ceramic substrate with mesa structure for voltage ramp-up of power modules, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 87, 20903 (2019)
- [8] H. Reynes, C. Buttay, H. Morel, "Protruding Ceramic Substrates for High Voltage Packaging of Wide Bandgap Semiconductors", IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA 2017), Oct. 30-Nov.01 2017, Santa Ana Pueblo, NM, USA.
- [9] F. Yan, L. Yu, L. Wang, K. Wang, B. Zhang, T. Yang, "Geometrical Design of Ceramic Substrate for High Voltage Power Modules", Int. Conf. High Voltage Engineering and Application (ICHVEA 2020), Sep.6-10 2020, Beijing, China.
- [10] M.Mesgarpour Tousi, M. Ghassemi, "Combined Geometrical techniques and Applying Nonlinear Field Dependent Conductivity Layers to Address the High Electric Field Stress Issue in High Voltage High-Density Wide Bandgap power Modules", IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 27, N° 1, February 2020.
- [11] S. Ji, Z. Zhang, F. Wang, "Overview of High Voltage SiC Power Semiconductor Devices: Development and Application", CES Trans. Electrical Machines and Systems, Vol. 1, N° 3, Sep. 2017.
- [12] Mrinal K. Das, Craig Capell, David E. Grider, Scott Leslie and John Ostap et al., 10 kV, "120 A SiC Half H-Bridge Power MOSFET Modules Suitable for High Frequency, Medium Voltage Applications", <http://www.pwr.com/pwr/app/H-Bridge%20Pwr%20MOSFET%20for%20High%20Freq%20Apps%20.pdf>.
- [13] D. Kenfaui, M-L. Locatelli, Z. Valdez Nava, L. Laudebat, V. Bley, P. Dufour, C.Tenailleau, S. Guillemet "Procédé de fabrication d'une pièce composite à matrice céramique, pièce composite, et composant électrique correspondant, à laquelle l'INPI a attribué le numéro FR1900583 CNRS/UPS/INUC 23 janvier 2019.

- [14] Z. Valdez-Nava, S. Guillemet-Fritsch, M. Ferrato, M. Kozako, T. Lebey. Co-fired AlN-TiN assembly as a new substrate technology for high temperature Power Electronics packaging. *Ceramics International*, 39 (2013) 8743-8749N
- [15] I. N. G. Simsek, A. Nistal, E. García, D. Pérez-Coll, P. Miranzo, M. I. Osendi,* » The effect of graphene nanoplatelets on the thermal and electrical ». *Journal of the European Ceramic Society*, 37 (2017) 3721–3729

7. REMERCIEMENTS

Les remerciements sincères des auteurs vont à l'A.N.R. et à la D.G.A. pour leur soutien financier et leur accompagnement dans le cadre du projet ANR ASTRID 'Filcera'. Les auteurs remercient vivement également Vincent Bley et Sorin Dinculescu du Laplace pour leur contribution aux essais électriques.