

Application de Matériaux Composites à Gradient de Permittivité pour l'Encapsulation de Composants de Puissance Intégrés en Technologie PCB

Arnaud Escrivá^{1,2}, Sombel Diaham¹, Vincent Bley¹, Zarel Valdez-Nava¹, Toni Youssef², Rabih Khazaka², Stéphane Azzopardi²

¹ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, F-31062 Toulouse cedex 9, France.

² SAFRAN TECH, EES Research Group, F-78114 Magny-Les-Hameaux, France.

RESUME – Cet article présente l'étude du développement d'un matériau composite encapsulant à gradient de permittivité (en anglais, Field Grading Materials - FGM) que l'on souhaite appliquer à l'isolation de composants de puissance intégrés dans un circuit imprimé (PCB, en anglais). Cet encapsulant se compose d'une résine époxy ainsi que de particules à haute permittivité (titanate de baryum : BaTiO₃). Le gradient de permittivité s'obtient grâce à un gradient de concentration de particules qui est réalisé par un procédé d'électrophorèse (i.e. application d'un champ électrique pour déplacer les particules autour de l'électrode de haut potentiel). Les caractérisations effectuées sont des observations au microscope numérique ainsi qu'au microscope électronique à balayage (MEB) afin de déterminer la morphologie des couches FGM et leur densité en particules. Le champ de rupture pour les différents gradients de concentrations obtenus est également caractérisé et comparé à des structures de test de référence (e.g. Preg FR4, résine époxy pur).

Mots-clés— *PCB, Intégration de puissance 3D, Isolation électrique, Matériaux composites, Gradation de potentiel, FGM, Electrophorèse, Rupture diélectrique, Décharges partielles.*

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la tension de fonctionnement et de la densité de puissance des modules de puissance qui intègrent des composants à semi-conducteurs grand gap (SiC ou GaN) nécessitent de nouveaux besoins en termes de matériaux isolants pour l'assemblage (e.g. encapsulation polymère) [1]. Dans ce contexte, le champ électrique dans les régions sous fortes contraintes électriques (i.e. point triple) peut atteindre une valeur locale de l'ordre de 100 kV/mm ou supérieure [2]. Ces valeurs de champ peuvent être proche du seuil d'apparition des décharges partielles voire proche de la valeur de la rupture diélectrique de l'encapsulant. Ainsi, durant ces dernières années, plusieurs études ont été menées dans le but de trouver de nouvelles solutions pour réduire le champ électrique au niveau du point triple en créant un gradient de permittivité dans l'encapsulant. L'une de ces solutions a consisté à créer un gradient de permittivité diélectrique au sein du matériau encapsulant en ajoutant des particules ayant une haute

permittivité (high-*k*), comme le titanate de baryum (BaTiO₃) ou le titanate de strontium (SrTiO₃), et en les concentrant dans les zones de forts champs des module de puissance à substrats céramiques grâce au principe de l'électrophorèse [3,4,5]. Cet article a pour but d'étudier l'impact du gradient de concentration en particules BaTiO₃ (contenues dans une résine époxy), cette fois-ci dans un environnement beaucoup plus intégré, autour des électrodes dans un environnement PCB pour l'intégration de composants à semi-conducteur de puissance en 3D. Les principales caractéristiques électriques étudiées dans cet article vont être le champ de rupture et les décharges partielles en présence d'un gradient de permittivité dû à un gradient de concentration de particules BaTiO₃.

2. PARTIE EXPÉRIMENTALE

2.1. Matériaux

Dans cette étude, des particules commerciales de BaTiO₃ ont été approvisionnées de source commerciale (660 nm de diamètre) et mélangées à une résine époxy commerciale de type DGEBF spécialement utilisée pour l'encapsulation de composants électroniques. La densité des particules de BaTiO₃ est de 6,08 g/cm³ et les densités pour l'époxy sont de 1,29 g/cm³ et 1,17 g/cm³ pour les parties A et B, respectivement. Les feuilles de pré-imprégnés (prépreg) utilisées sont de types FR4.

2.2. Elaboration des échantillons

2.2.1. Fabrication des cores du PCB

Le PCB est constitué d'un stratifié (*core*, en anglais) sur lequel va être assemblé quatre feuilles de pré-imprégnés lors d'un pressage. Le core est fabriqué grâce à un pressage de trois feuilles de pré-imprégnés FR4 de 80 µm chacune ainsi que d'une feuille de cuivre d'une épaisseur de 35 µm. Une fois le pressage effectué, une gravure chimique est réalisée afin d'obtenir les pistes de cuivre aux motifs et dimensions désirés. Cette gravure chimique se décompose en plusieurs étapes. La première va être de poser un film photosensible sur le core qui va être insolé selon les motifs du masque qui est fixé contre le core. Ensuite une étape de révélation est nécessaire pour enlever le film qui n'a pas été insolé afin de pouvoir graver le cuivre avec du perchlorure

de fer. Une dernière étape de révélation est réalisée afin d'enlever le film insolé.

Ensuite, quatre feuilles de pré-imprégnés d'une épaisseur totale de 320 µm sont détournés par une fraiseuse à commande numérique afin d'avoir des motifs reproductibles. Ces feuilles sont assemblées sur le core fabriqué. Cet assemblage permet de créer la cavité où le matériau composite sera déposé pour être étudié (voir figure 1 ci-dessous).

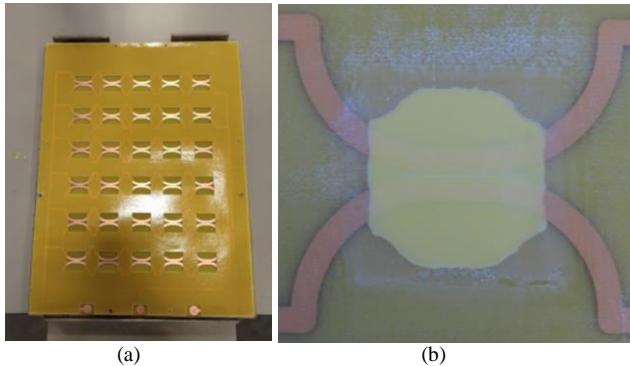


Figure 1 : Image du core avant le pressage des laminés pour créer les cavités (a) et image finale d'une cavité remplie par un matériau composite (b).

2.2.2. Elaboration des composites époxy/ $BaTiO_3$ à gradient de permittivité

Pour étudier l'influence du matériau à gradient de permittivité, un protocole a été mis en place afin de créer des échantillons reproductibles avec le même procédé. Dans un premier temps, il est important d'obtenir un mélange composite homogène de particules de $BaTiO_3$ et d'époxy à l'aide d'un mélangeur planétaire sans qu'il n'y ait présence d'agglomérats de particules. Les particules sont mélangées à la résine sous un vide primaire pendant 3 min à 800 rpm et 1 min à 1800 rpm. La concentration des particules choisie varie de 0% à 10% en volume.

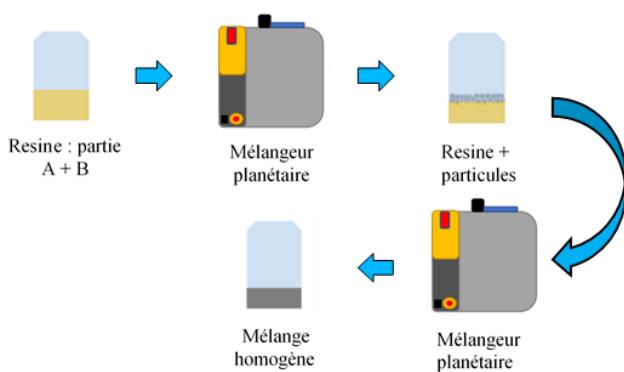


Figure 2 : Procédé pour obtenir un mélange composite homogène en deux étapes: mélange des deux parties d'époxy, puis mélange de la résine époxy et des particules.

Ensuite, le mélange obtenu est versé dans les cavités des PCB fabriqués précédemment avant d'être pressé à température ambiante. Par la suite, une étape d'électrophorèse sous une tension DC (entre 50 V et 200 V) est appliquée entre les pistes de cuivre par l'intermédiaire de connexions électriques. Les particules de $BaTiO_3$ étant sensibles au champ électrique, celles-

ci vont se déplacer dans la résine époxy liquide pour s'amasser sous forme de couche avec une concentration de particules très élevée autour des pistes portées à la haute tension durant le procédé d'élaboration. Une fois le gradient de concentration obtenu, le matériau composite à gradient de concentration est réticulé à 100 °C pendant 1 h afin de figer les particules.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Rupture électrique

Une analyse des différentes couches de matériau à gradient de permittivité (FGM) a été réalisée. Pour cela différents paramètres tels que la concentration en particules de la solution homogène initiale, la durée d'application de la tension sur les pistes et la distance entre les pistes ont été étudiés.

Dans un premier temps, la distance inter-piste des supports PCB est fixée à 280 µm et la tension appliquée pour réaliser les FGM est fixée à 100 V afin d'étudier l'influence de la concentration initiale de particules ainsi que la durée d'application de la tension sur la formation de la couche FGM. Les concentrations de particules testées sont de 2%, 7% et 10% et les temps de polarisation sont de 0, 30 et 60min. Pour caractériser ces échantillons électriquement, le choix a été d'étudier le champ de rupture sous champ AC (50 Hz). Les essais de claquage en champ alternatif sont réalisés avec une source de haute tension limitée à 75 kV_{rms}. Les échantillons sont placés dans un réservoir rempli d'un liquide isolant fluoré pour éviter tout risque de court-circuit. L'amplitude de la tension alternative a été augmentée avec une rampe entre 1 kV_{rms}/s et 2 kV_{rms}/s afin d'obtenir la rupture entre 10 s et 20 s et ainsi d'être conforme à la norme internationale ASTM D149. Pour analyser la rupture, les données ont été traitées en supposant une distribution de Weibull afin d'en extraire les paramètres caractéristiques de la probabilité cumulative de défaillance tels que « α » le facteur d'échelle à 63,2% et « β » le facteur de forme. De plus, des échantillons de référence où l'enrobage se compose de feuilles de pré-imprégnés uniquement ou d'époxy pure ont été fabriqués et caractérisés à titre comparatif.

Tableau 1. Tension de rupture α (en kV_{rms}) des structures de test pour les différentes conditions d'électrophorèse.

	0 min	30 min	60 min
Pré-imprégnés FR4	25,6		
Epoxy pure	27,3		
Epoxy/$BaTiO_3$ @2%	33,5	32,6	33,8
Epoxy/$BaTiO_3$ @7%	21	14,2	13,8
Epoxy/$BaTiO_3$ @10%	26,4	22	18

La tension de rupture de l'époxy utilisée est plus élevée que celle des pré-imprégnés utilisés (27,3 kV_{rms} contre 25,6 kV_{rms}). Par la suite, pour étudier l'impact des FGM, la tension de rupture de l'époxy servira de référence.

Pour un ajout de 2% en volume de particules, la tension de rupture est plus élevée que ce soit avec ou sans création de FGM. Même sans l'application de la tension nécessaire pour créer les FGM, il y a un gradient de concentration dû à la sédimentation lors de la réticulation des échantillons (cf. Figure 4). Cependant ce gradient de concentration est vertical contrairement aux FGM où le gradient va être horizontal entre les pistes de cuivre (le gradient vertical est aussi présent dans les échantillons contenant les FGM).

Pour les concentrations plus élevées (7% et 10%), la tension de rupture diminue lorsqu'un gradient de concentration a été créé via le procédé de l'électrophorèse. Pour une électrophorèse de 60 min, la tension de rupture des échantillons diminue par rapport à ceux qui ont subi une électrophorèse de 30 min. Cet aspect sera étudié par des simulations par éléments finis (cf. Partie 4).

Pour quelques conditions, l'impact de la distance inter-piste a été également étudié. Pour cela, de nouveaux échantillons ont été réalisés avec une distance de 220 μm afin de comparer les tensions de rupture avec ceux qui ont une distance de 280 μm . Lorsque la distance inter-piste diminue la tension de rupture diminue également bien que la diminution soit plus importante pour les matériaux composites que pour les pré-imprégnés ou l'époxy. Cela peut s'expliquer par la présence potentielle de quelques agglomérats entre les pistes. Cela va créer localement des renforcements de champ qui auront un impact plus important lorsque la distance inter-piste se réduit. Ces valeurs sont obtenus grâce aux lois de Weibull représentées sur la Figure 3. De plus, les courbes obtenues ont une dispersion assez faible (et donc un β assez élevé).

Tableau 2. Tension de rupture α (en kV) des différentes conditions

Matériaux	Tension de rupture 220 μm	Tension de rupture 280 μm
Pré-imprégnés FR4	22,1	25,6
Epoxy pure	24,6	27,3
Epoxy/BaTiO ₃ @2%	25,5	33,5

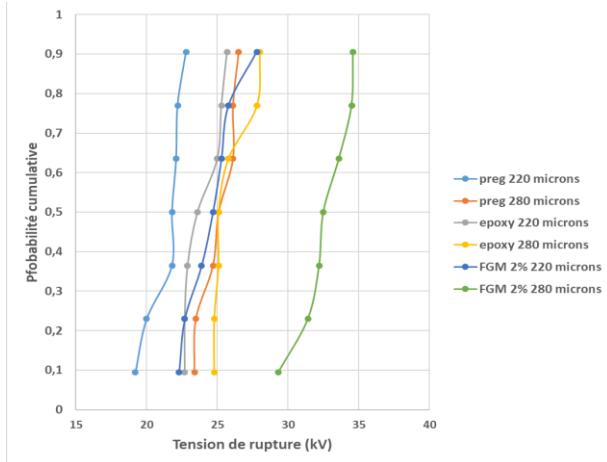


Figure 3 : Représentation de la loi de Weibull pour différentes conditions de matériaux composites et de distances interpistes.

3.2 Densité de particules dans la couche FGM

Dans cette partie, des échantillons avec 10% de particules initiales sont testés. Des coupes transversales des échantillons ont été effectuées afin d'être observées au microscope numérique (Fig. 4) où deux conditions sont représentées : (a) échantillon sans FGM et (b) échantillon avec FGM qui ont été obtenus par électrophorèse en appliquant une tension continue de 100 V pendant 45 min. Sur les deux images une sédimentation est visible. Cette sédimentation a lieu lors de la réticulation du matériau composite. Cependant, bien qu'elle ait un impact sur la concentration de la partie homogène des échantillons celle-ci n'affecte pas la couche déposée lors de l'électrophorèse.

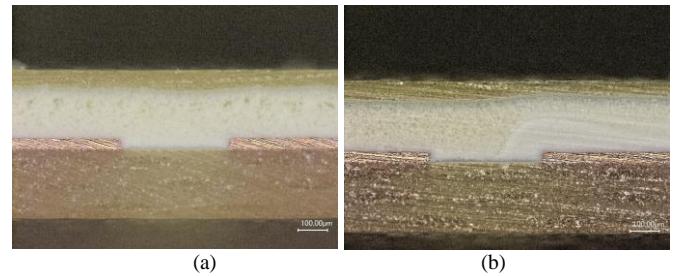


Figure 4 : Image comparant un échantillon sans électrophorèse après réticulation (a) et un échantillon avec application d'une électrophorèse avec une tension de 100V pendant 45min (b).

Dans la caractérisation de ces différentes couches, il est nécessaire d'observer ces échantillons au microscope électronique à balayage (MEB). Afin de pouvoir étudier ces échantillons une méthode d'analyse d'image MEB a été mise au point. La première étape est d'analyser le niveau de gris d'échantillons homogènes dont la concentration est connue afin d'établir une référence (voir figure 5).

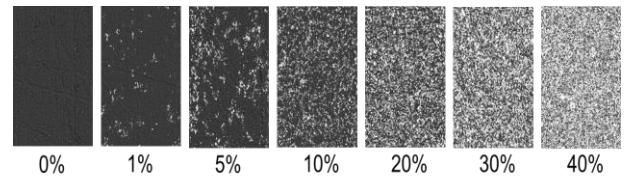


Figure 5 : images MEB des différentes concentrations des matériaux homogènes qui vont servir de références pour déterminer la concentration dans les composites FGM.

Ensuite, les échantillons FGM sont analysés au MEB afin d'obtenir l'image avec les gradients de concentrations. Afin de pouvoir déterminer ce gradient, un logiciel de traitement d'image a été utilisé. En se basant sur les échantillons homogènes, une échelle de niveau de gris a été créée afin de pouvoir déterminer la concentration des couches déposées autour de l'électrode HV. Pour que ces résultats soient exploitables les images MEB des échantillons homogènes et des échantillons contenant les FGM ont été réalisés en même temps sur le même support afin d'avoir la même intensité d'électrons rétrodiffusés, la même brillance et le même grossissement. De plus, un filtre est utilisé afin de moyenner les pixels afin de réduire les pixels chauds.

Pour les échantillons avec 2% de particules, la couche de particules pour une électrophorèse de 30 min possède une concentration d'environ 35%vol à 40%vol pour une épaisseur de 70 μm entre les électrodes.

Pour les échantillons où l'électrophorèse a duré 60 min la couche est plus fine (environ 10 μm entre les électrodes) mais la concentration est plus élevée (environ 40 à 45%vol).

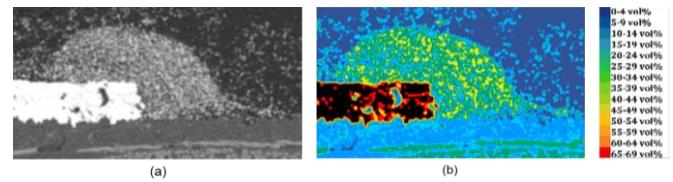


Figure 6 : Image MEB d'un échantillon de matériau composite contenant 2%vol de particules initialement (a) et cartographie de concentration en particules après le traitement d'image (b) pour une électrophorèse de 30 min.

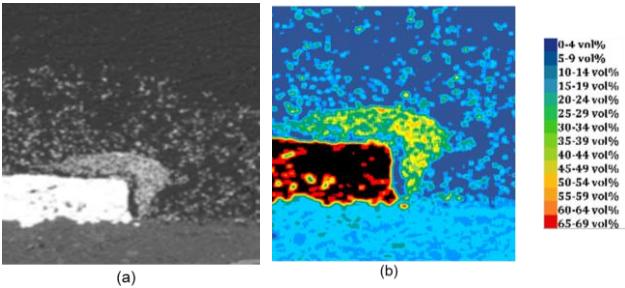


Figure 7 : Image MEB d'un échantillon de matériau composite contenant 2% vol de particules initialement (a) et cartographie de concentration en particules après le traitement d'image (b) pour une électrophorèse de 60 min.

Pour les échantillons avec 10% vol de particules initialement, plusieurs temps d'électrophorèse ont été étudiés entre 10 min et 60 min. Dans cette partie, seules les conditions de 10 min, 30 min et 45 min sont présentées (cf. Figures 8, 9 et 10). Pour un temps de 10 min, une couche de particules d'une quarantaine de μm commence à se former avec une concentration de 40% vol en moyenne. Si l'électrophorèse dure 30 min, l'épaisseur de la couche augmente fortement jusqu'à 140 μm environ avec une concentration de 45% vol en moyenne. Pour une durée de 45 min l'épaisseur de la couche s'agrandit encore pour atteindre 220 microns entre les deux pistes de cuivre avec une concentration moyenne de 50% vol, représentant une fraction significative de l'espace inter-electrode.

Globalement pour une concentration initiale de 10% vol, la couche déposée autour de l'électrode va augmenter au cours du temps et voir sa concentration augmenter par la même. Cependant, pour les échantillons avec 2% vol de particules dans la solution homogène initialement, la couche déposée autour de l'électrode positive va se comporter différemment. Dans un premier temps elle va s'agrandir avec une concentration de 35 à 45% vol puis au cours du temps celle-ci va se réduire tout en voyant sa concentration augmenter. Cela va réduire la zone à forte permittivité tout en augmentant la permittivité de celle-ci. Pour étudier l'impact sur les échantillons des simulations FEM ont été réalisées par la suite.

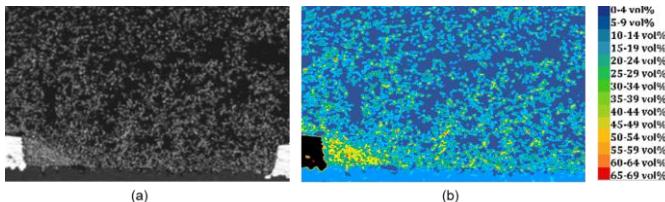


Figure 8 : Image MEB d'un échantillon de matériau composite contenant 10% vol de particules initialement (a) et cartographie de concentration en particules après le traitement d'image (b) pour une électrophorèse de 10 min.

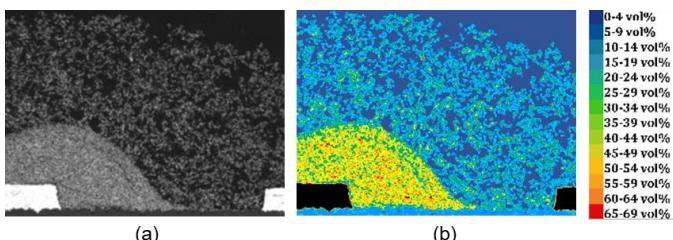


Figure 9 : Image MEB d'un échantillon de matériau composite contenant 10% vol de particules initialement (a) et cartographie de concentration en particules après le traitement d'image (b) pour une électrophorèse de 30 min.

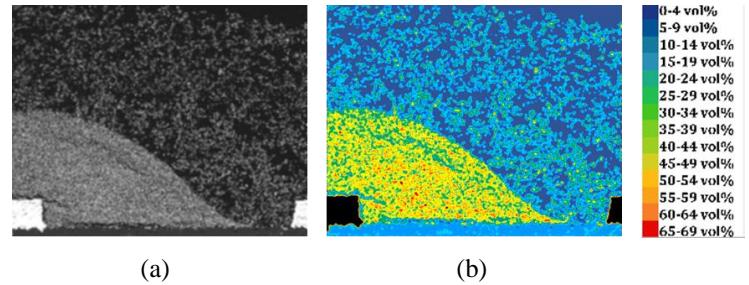


Figure 10 : Image MEB d'un échantillon de matériau composite contenant 10% vol de particules initialement (a) et cartographie de concentration en particules après le traitement d'image (b) pour une électrophorèse de 45 min.

4. MODELISATION FEM DE LA REPARTITION DU CHAMP

La modélisation par la méthode des éléments finis permet de déterminer la distribution du champ électrique à l'intérieur des échantillons fabriqués. Pour cela le logiciel ANSYS Maxwell a été utilisé. Tous les paramètres utilisés dans les simulations proviennent des résultats expérimentaux. Les principaux paramètres sont la géométrie des échantillons fabriqués et la permittivité des différents matériaux qui les composent. Pour ce faire, des géométries 2D présentant deux pistes assemblées sur un pré-imprégné et isolées par du pré-imprégné, de l'époxy ou un FGM sont étudiées. De plus, un maillage adaptatif a été utilisé afin d'accentuer la précision de la simulation dans les zones critiques telles que les points triples. Pour les différentes valeurs de permittivité une étude a déjà été réalisée au laboratoire Laplace [6] et les résultats ont été repris ici.

Les principales permittivités utilisées sont :

- Pré-imprégnés FR4 : $\epsilon = 4,5$
- Epoxy : $\epsilon = 5$
- Epoxy + 10% BaTiO₃ : $\epsilon = 8,8$

Les conditions électriques aux limites pour les simulations sont une tension de 1200V (cible applicative) sur la piste de droite et 0V sur la piste de gauche avec une distance inter-pistes de 220 μm .

Dans un premier temps, une simulation où les pistes de cuivre ont été enfouies dans des pré-imprégnés a été réalisée (cf. Figure 11). Le champ électrique est maximal dans les angles des pistes de cuivre avec une valeur maximale de 27 kV/mm.



Figure 11 : Simulation du champ électrique dans un échantillon de pré-imprégné avec une permittivité de 4,5.

A la suite des tests électriques, il est apparu que la tension de rupture des échantillons avait tendance à diminuer lorsque la couche de FGM augmente. À travers les deux simulations ci-

dessous (cf. Figure 12), qui représentent les échantillons avec 2% vol de particules initiale (et une électrophorèse de 30 min et 60 min) obtenus de manière expérimentale précédemment, la valeur maximale du champ électrique est de 25,9 kV/mm pour une électrophorèse de 30 min et de 21,7 kV/mm pour une électrophorèse de 60 min. La permittivité choisie pour les couches FGM est de 40. Les zones à fort champ varient par rapport à l'échantillon de pré-imprégné. Une zone à fort champ apparaît dans le support (dans le laminé) et se situe à l'interface de la couche FGM, de la zone homogène et du laminé du support. La présence de cette zone à fort champ va avoir un impact sur la rigidité diélectrique de l'échantillon. En effet la position de cette contrainte électrique vis-à-vis des pistes va accélérer le vieillissement du PCB. L'impact de la couche FGM va être important en réduisant les contraintes électriques au niveau du point triple (sur la piste HV) mais va en créer d'autres dans l'échantillon plus proche de la piste reliée à la masse. Bien que ces contraintes électriques soient plus faibles leurs positions par rapport aux pistes de cuivre expliquent la chute du champ de rupture observée expérimentalement.

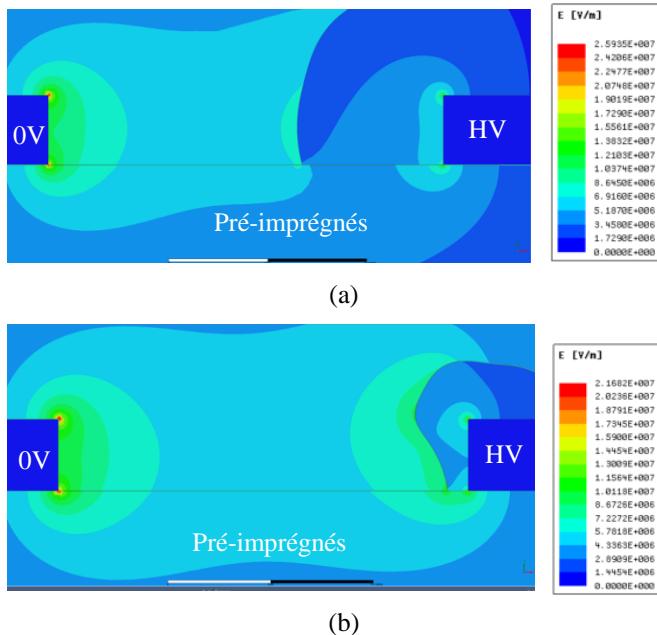


Figure 12 : Simulation du champ électrique dans un échantillon FGM avec 2% vol de particules initiale ainsi qu'une durée d'électrophorèse à 100V de 30 min (a) et de 60 min d'électrophorèse (b).

5. CONCLUSION

Cette étude montre que les matériaux composites comportant des FGM peuvent avoir un impact significatif sur la tenue en tension des PCB à condition de bien choisir les paramètres tels que la concentration de particules initiale ainsi que la tension et la durée d'application de la tension pour créer ces FGM. Ces matériaux FGM vont permettre d'alléger les contraintes au niveau des points triples. Cependant, ils peuvent aussi créer de nouvelles contraintes qui peuvent fragiliser le PCB et diminuer sa tenue en tension si la couche FGM n'est pas bien optimisée. En effet, le FGM va déplacer les contraintes électriques dans le PCB grâce au gradient de permittivité mais cela peut réduire sa tension de rupture si les paramètres optimaux du procédé ne sont pas maîtrisés. Cette étude montre le potentiel significatif de la présence des couches FGM au sein des assemblages PCB sur l'augmentation de la tenue en tension entre pistes de cuivre. Elle ouvre la voie à une nouvelle façon d'améliorer leur fiabilité électrique à haute tension.

6. REFERENCES

- [1] Kyung-Wook Paik; Jin-Gul Hyun; Sangyong Lee; Kyung-Woon Jang, "Epoxy/BaTiO₃ (SrTiO₃) Composite Films and Pastes For High Dielectric Constant and Low Tolerance Embedded Capacitors in Organic Substrates," Electronics System integration Technology Conference, 2006. 1st, Vol. 2, pp.794-801, 2006.
- [2] A. Can-Ortiz, L. Laudebat, Z. Valdez-Nava, S. Diahiam, "Nonlinear Electrical Conduction in Polymer Composites for Field Grading in High-Voltage Applications: A Review", Polymers, Vol. 13, No. 9, 1370, 2021.
- [3] S. Diahiam, Z. Valdez Nava, L. Lévéque, T. T. Le, L. Laudebat and T. Lebey, "Field Grading Composites Tailored by Electrophoresis – Part 2: Permittivity Gradient in Non-Uniform Electric Field", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28, No. 2, pp. 341-347, 2021.
- [4] T. T. Le, Z. Valdez Nava, G. Belijar, S. Diahiam, L. Laudebat, L. Fetouhi and R. Khazaka, "Original Design of Field Grading Materials for High Voltage Power Module Applications", Proc. 3rd IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 5-9 July, pp. 313-316, 2020.
- [5] S. Diahiam, Z. Valdez Nava, L. Lévéque, T. T. Le, L. Laudebat and T. Lebey, "Field Grading Composites Tailored by Electrophoresis – Part 3: Application to Encapsulation of Power Electronics Modules", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 28, No. 2, pp. 348-354, 2021.
- [6] L. Lévéque, "Nouveaux matériaux composites à gradient de permittivité structurés par un champ électrique et leur application pour la gradation de potentiel," PhD dissertation, University of Toulouse, 2017 (in French).