



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of some Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/22940>

Official URL:

To cite this version:

Baffreau, Stéphane and Vidal, Paul-Etienne Méthode de détection de défauts dans des modules l'électronique de puissance par analyse électromagnétique. (2018) In: CEM 2018: 19ème colloque international & exposition sur la compatibilité électromagnétique, 9 July 2018 - 11 July 2018 (Paris, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:

tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

METHODE DE DETECTION DE DEFAUTS DANS DES MODULES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE PAR ANALYSE ELECTROMAGNETIQUE

S. Baffreau¹, P.-E. Vidal²

¹ Laboratoire Génie de Production (LGP), UFT, IUT de Tarbes, 1 Rue Lautréamont, 65000 Tarbes, France.
stephane.baffreau@iut-tarbes.fr

² Laboratoire Génie de Production (LGP), UFT, INPT/ENIT, 47 avenue d'Azereix, 65000 Tarbes, France.

Résumé. Cet article présente une méthodologie originale afin de détecter certains défauts au sein de structures d'électronique de puissance. Cette approche repose sur l'analyse électromagnétique et topologique de la structure de puissance. Elle est appliquée en vue de caractériser des mécanismes de défaillance clairement identifiés. La mise en œuvre de cette méthodologie est décrite en détails, de la mise en place des modèles utilisés pour réaliser des simulations prédictives, jusqu'à la comparaison à l'expérimentation. De plus, la validation de la démarche est étayée par son application à un démonstrateur test représentatif des modules de puissance. Enfin, les perspectives que laissent augurer cette méthodologie sont décrites.

I. INTRODUCTION

L'intégration de nouvelles technologies, au sein de composants ou modules à plus haut ratio puissance/masse ou puissance/volume, entraîne une remise en cause des connaissances pour l'évaluation de la fiabilité et de la durée de vie de ces nouveaux systèmes. Dans la démarche actuelle d'évaluation de la fiabilité, des tests de vieillissement sont mis en place pour tenter de reproduire les modes et mécanismes de défaillance identifiés et, ainsi, caractériser leur probabilité d'occurrence et les combinaisons et cycles de sollicitations critiques. Cette démarche consiste à la mise en œuvre de tests de vieillissement accéléré, couplée à des méthodes destructives et non destructives pour la caractérisation des mécanismes de défaillance [1]. Ces études sont réalisées en amont d'une mise en œuvre applicative, et ne donnent pas d'information sur l'état de santé de l'objet en cours de fonctionnement. Cependant, lors de son fonctionnement en environnement applicatif, il est intéressant d'avoir une information de l'état de santé des composants du système, en vue de leurs maintenances prédictives. A cette fin, des méthodes de Contrôle Non Destructif (CND) pourraient être employées [2]. Parmi celles-ci les méthodes liées aux phénomènes d'interactions électromagnétiques présentent un intérêt pour l'électronique de puissance. Par exemple, ces dernières peuvent permettre l'extraction des paramètres internes à un composant de puissance [3]. Dans [4], une démarche expérimentale est proposée pour caractériser l'apparition de défauts au sein de structures d'interconnexion de type *ball grid array*, suite à des

cycles thermiques au sein d'assemblage pour la radiofréquence. Elle consiste à obtenir expérimentalement les tracés des paramètres S. L'analyse des courbes établit que la modification des structures due au vieillissement, modifie les réponses en réflexion. L'étude décrite ici s'appuie sur une démarche expérimentale semblable, mais est complétée par l'expression d'un modèle. L'approche de modélisation est inspirée de celle utilisée pour simuler des défauts de cartes électroniques comprenant des vias traversants [5]. Cette modélisation par circuit électrique équivalent présente essentiellement l'intérêt d'être simple d'utilisation et manipulable par nombre de logiciels. Elle est aussi directement associée à la structure géométrique de l'assemblage à caractériser.

Relativement aux mécanismes de défaillance des modules de puissance, l'état de l'art a permis d'identifier les principaux phénomènes de dégradation et/ou défaillance des assemblages de puissance [6]. Parmi eux, la fatigue thermomécanique engendrée par les cycles de puissance, entraîne souvent des mécanismes de défaillance des fils de connexion [7]. La caractérisation de ce mécanisme de défaillance associé à des structures géométriques représentatives de l'électronique de puissance, constituera l'objectif de ce travail.

Les travaux présentés ici, détaillent la démarche entreprise pour démontrer la faisabilité d'un CND original, à travers des simulations électriques et des mesures expérimentales. A terme, les travaux visent à la mise à jour dans le contenu harmonique des signaux conduits ou rayonnés d'un module de puissance, des informations liées à son état de santé. Plus précisément dans cette étude, la méthode de CND consiste, en une caractérisation expérimentale de défauts physiques dans les composants d'électronique de puissance, au moyen d'analyses des signaux électromagnétiques conduits. Afin d'éprouver et compléter la méthode et pouvoir identifier objectivement la présence d'un défaut, voire sa future occurrence, un exemple d'application simple est étudié.

II. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE ET ARGUMENTATION ASSOCIÉE

La méthode de CND décrite, permet de quantifier l'état d'intégrité d'un signal, qui consiste à la mesure de la transmission et de la réflexion d'une puissance injectée, dans des prototypes sains et défaillants, représentatifs des

assemblages de l'électronique de puissance. Ces mesures, et leurs analyses, découlent de la détermination et de l'expression des paramètres S. La modification de la réponse caractéristique en transmission ou en réflexion, permettra ainsi de constater un changement, éventuellement une altération dans le cas d'une défaillance, du comportement électrique, et donc du circuit électrique sollicité.

La démarche entreprise est réalisée en six étapes successives : analyse préliminaire, conception du schéma électrique du prototype, extraction des valeurs des paramètres physiques associés au prototype, simulations du prototype, mesures expérimentales, comparaison des résultats expérimentaux avec ceux préalablement simulés. La comparaison des résultats consiste à réaliser une analyse fréquentielle des réponses mesurées et simulées pour les prototypes sain et défaillant.

A l'issue de la première étape, les chemins de courant susceptibles d'être modifiés du fait de l'apparition d'un mécanisme de défaillance sont identifiés. Pour chaque constituant de ce chemin, piste de conduction, fil de bonding, etc, un modèle électrique est établi. Il s'appuie sur les représentations des lignes de transmission par association de quadripôles élémentaires.

A partir du modèle numérique tridimensionnel, l'extraction paramétrique des éléments, R résistance, L inductance, C capacité, G conductance, pour chacun des constituants identifiés, permet de compléter le modèle électrique précédent. La simulation de ce schéma électrique équivalent est réalisée par la sollicitation en tension, notée V2, variable en fréquence, de deux ports du quadripôle, selon la figure Fig. 1, dont l'impédance de sortie est maîtrisée sur la bande de fréquence d'intérêt.

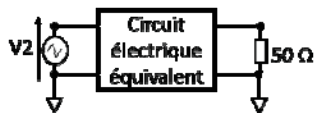


Fig. 1. Principe de simulation.

Dans cette simulation deux ports sont référencés au même potentiel. Les résultats de simulation sont les tracés caractéristiques en réflexion vus en entrée du quadripôle, S_{11} . Les résultats expérimentaux, obtenus par des mesures à l'analyseur de réseau du paramètre, seront comparés avec ceux préalablement simulés. L'analyse fréquentielle et la comparaison des résultats obtenus permet ainsi d'une part de valider l'approche méthodologique, et d'autre part de mettre en évidence la signature d'un mécanisme de défaillance particulier.

III. APPLICATION DE LA MÉTHODE À UN CAS SIMPLE

Afin d'éprouver la méthode, nous avons conçu et développé un prototype spécifique en nous focalisant principalement sur les défaillances les plus communément observées : le soulèvement, ou la rupture d'un fil de bonding. En première approximation, ces deux phénomènes vont électriquement se traduire de façon

similaire par la modification importante des impédances initiales du module sous test.

La structure de ce prototype repose sur un substrat epoxy double face de 9.25 cm de large par 8.50 cm de haut (voir Fig. 2). La face inférieure forme un plan de masse uniforme, et la face supérieure est constituée de 3 pistes : une piste de masse (Masse) qui réalise la liaison entre les masses des deux connecteurs SMA. Les deux autres pistes (Piste 1 et Piste 2) ont des dimensions identiques et permettent l'accroche des deux fils de bonding d'aluminium de 200 μ m de diamètre. La description que nous venons d'effectuer est celle d'un prototype sain, c'est-à-dire que les deux fils de bonding sont intègres. Dans le cas d'un prototype défaillant, indifféremment, l'un des deux fils de bonding ne remplira plus son rôle de conducteur, entraînant inévitablement une modification des impédances internes du prototype sous test.

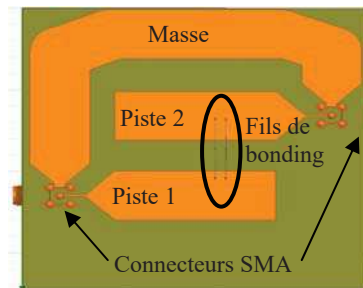


Fig. 2. Description de la face supérieure du prototype.

Afin d'extraire les impédances nécessaires à la modélisation électrique (voir Fig. 3), les dimensions géométriques des différents matériaux constituant le prototype sont intégrées dans un solveur électromagnétique. Les impédances ainsi obtenues sont regroupées sous la forme de lignes de transmission représentatives des constituants physiques du prototype, à savoir, les deux connecteurs SMA, les deux pistes et les deux fils de bonding (partie de droite de la Fig. 3). Ces lignes de transmissions seront indifféremment représentées sous forme de modèles en T ou en π . Les deux ports de l'analyseur de réseau (source et charge adaptées 50 Ω) et leur connectique (lignes de transmission sans perte) associée sont représentés sur la partie gauche de la Fig. 3.

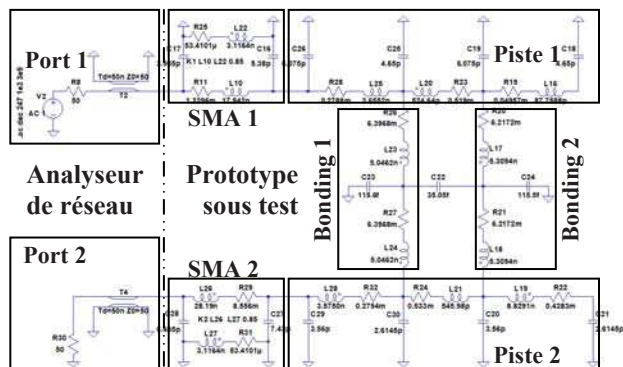


Fig. 3. Modélisation électrique du prototype sain dans les conditions d'expérimentations.

Quant à la modélisation électrique du prototype défaillant, elle est obtenue en supprimant tous les éléments de la branche du bonding générateur du défaut. Les résultats de simulation dans les mêmes conditions expérimentales pour les prototypes sain et défaillant sont comparés à la Fig. 4. Pour les fréquences inférieures à 10 kHz, nous observons une augmentation de 5 dB du module du coefficient de réflexion S11, ce qui confirme bien une augmentation de l'impédance pour cette bande de fréquence du prototype sous test du fait de la rupture du fil de bonding. De plus, le prototype sain présente deux fréquences de résonance, respectivement à 470 MHz (f_1) et 735 MHz (f_2) contre une unique pour le prototype défaillant située à 330 MHz (f_3). Enfin, à cette dernière fréquence spécifique, nous notons un écart d'amplitude entre les prototypes sain et défaillant d'une quinzaine de décibels.

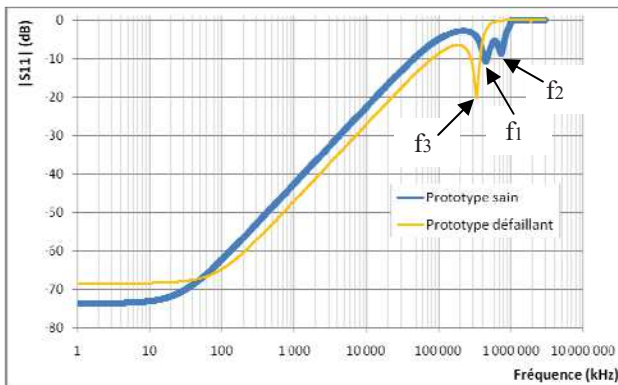


Fig. 4. Comparaison des simulations des modèles sain et défaillant du prototype sous test.

Dans le cadre de notre problématique de détection de défauts, ces informations s'avèrent essentielles. A ce stade, ces données doivent être confirmées par l'expérimentation. Dans cette optique, nous avons réalisé le prototype à tester conformément aux caractéristiques précédemment décrites (voir Fig. 5).

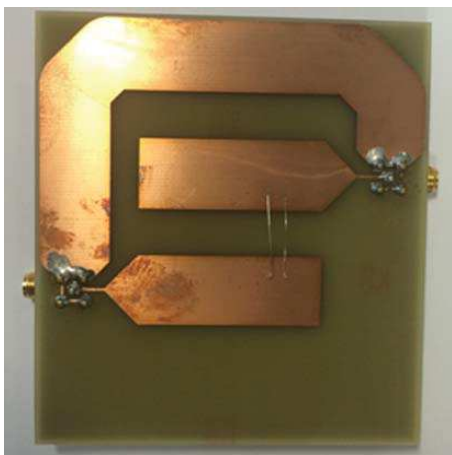


Fig. 5. Prototype de test réalisé.

De même, nous avons mis en place un banc de test en accord avec le protocole de mesure utilisé lors des modélisations prédictives. Ce banc d'expérimentation est

constitué d'un analyseur de réseau vectoriel, dont chacun des ports est connecté aux SMA du prototype sous test à l'aide de câble adaptés 50 Ω (voir Fig. 6). La bande de fréquence retenue pour les mesures est identique à celle utilisée pour les simulations à savoir de 1 kHz jusqu'à 3 GHz.

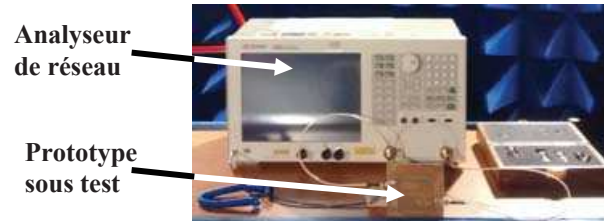


Fig. 6. Expérimentation mise en œuvre.

Les résultats de mesures effectuées sur les deux prototypes sain et défaillant sont présentés à la Fig. 7. Globalement, nous retrouvons des courbes similaires aux simulations : modification de la résistance en basse fréquence, deux fréquences de résonance pour le prototype sain et une unique pour le défaillant.

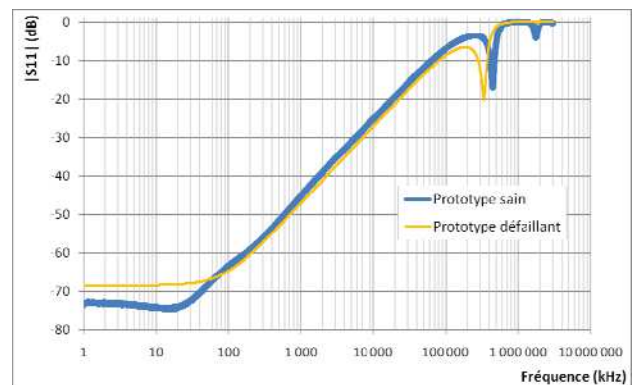


Fig. 7. Comparaison des mesures des prototypes sous test sain et défaillant.

Afin de valider les modélisations des deux prototypes, nous avons comparé les résultats de simulations avec ceux expérimentaux aussi bien pour le prototype sain (voir Fig. 8) que pour le prototype défaillant (voir Fig. 9).

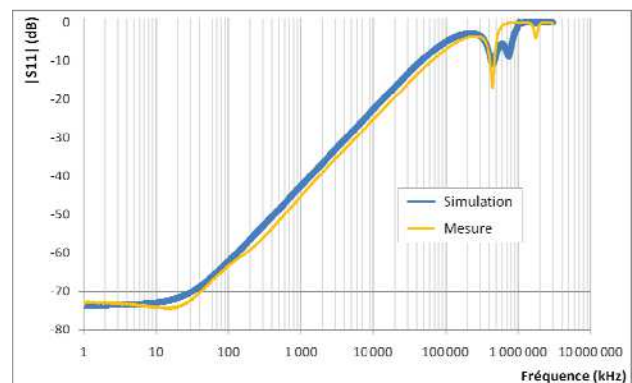


Fig. 8. Comparaison de la simulation et de la mesure du prototype sous test sain.

Pour le prototype sain, nous retrouvons bien la première fréquence de résonance avec un écart d'amplitude d'environ 6 dB. En revanche, la seconde fréquence de résonance, mesurée à 1,75 GHz, n'est pas retrouvée en simulation à la même valeur de fréquence. Par conséquent, dans le cadre de notre problématique de détection de défauts, la première fréquence de résonance présente des caractéristiques avantageuses certaines.

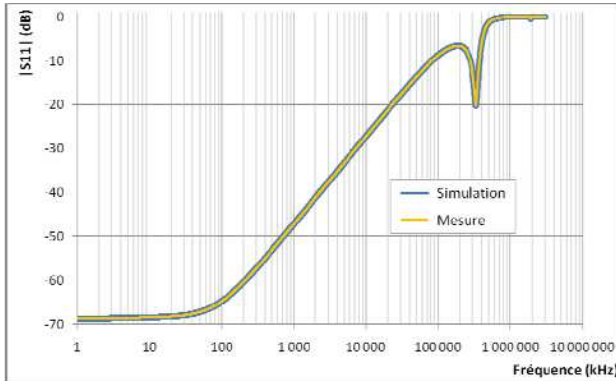


Fig. 9. Comparaison de la simulation et de la mesure du prototype sous test défaillant.

En ce qui concerne le modèle pour le prototype défaillant, la simulation et la mesure corrélaient parfaitement. Ceci confirme donc tout l'intérêt de notre méthode. Ainsi, les phénomènes de résonance détectés après la première résonance disparaissent. Ils semblent donc être liés à la présence de plusieurs fils de bonding dans le cas de structures saines.

IV. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES.

Cette première expérimentation a permis de valider en partie les modèles prédictifs de détection par analyse électromagnétique de défauts liés à une rupture de fil de bonding dans une structure se rapprochant de celle d'un module de puissance. De plus, dans la perspective de mise en œuvre d'une méthode de détection de défauts d'un module de puissance en cours de fonctionnement certaines informations primordiales ont été mis au jour : l'apparition de la première fréquence de résonance du module défaillant se retrouvant décalée vers des fréquences inférieures toute en ayant une différence d'amplitude non négligeable en comparaison de l'amplitude du prototype sain, est plutôt de bonne augure quant à la faisabilité de détecter ce type de défaut.

Dans le but d'éprouver cette méthodologie et d'améliorer la modélisation prédictive des modules de puissance, un nouveau prototype de test va prochainement être développé. Les principales améliorations auxquelles il devra répondre portent aussi bien sur les dimensions géométriques et les matériaux mis en œuvre que sur une complexification de la structuration interne du module. Cette étape incontournable à la mise en place d'une détection de défauts devrait à terme permettre de développer un outil pour réaliser des opérations de maintenance prédictive.

V. CONCLUSIONS

Cet article a présenté la problématique de l'intégration des structures de puissance de dernière génération en termes de fiabilité et de vieillissement. De plus, la détection de défauts dans ces assemblages par des contrôles de type non destructif a été abordée. Une méthodologie originale de contrôle non destructif par analyse des interactions électromagnétiques a été proposée. Sa mise en œuvre a été illustrée à l'aide d'un premier prototype relativement proche des structures de puissance actuelles. Sa modélisation prédictive et sa validation par l'expérimentation ont été développées. Les perspectives concernant ces travaux de recherches ont été affirmées dans l'optique d'une maintenance prédictive des modules de puissance de dernière génération.

REFERENCES

- [1] M. Bouarroudj-Berkani, L. Dupont, "Fatigue des composants électroniques de puissance - Physique de défaillance", Techniques de l'ingénieur, D3126.
- [2] The International Committee for Non-Destructive Testing, <http://www.icndt.org/>
- [3] T. Liu, T. T. Y. Wong, and Z. J. Shen "A New Characterization Technique for Extracting Parasitic Inductances of SiC Power MOSFETs in Discrete and Module Packages Based on Two-Port S-Parameters Measurement", IEEE Transactions on Power Electronics DOI 10.1109/TPEL.2017.2789240, 2018
- [4] J. Putaala, T. Kangasvieri, O. Nousiainen, H. Jantunen, and M. Moilanen. "Detection of thermal cycling-induced failures in rf/microwave bga assemblies" IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, vol. 31, n°3, doi : 10.1109/TEPM.2008.926289 :240-247, July 2008.
- [5] D.H. Jung, Y. Kim, J.J. Kim, H. Kim, S. Choi, Y.-H. Song, H.-C. Bae, K.-S. Choi, S. Piersanti, F. de Paulis, A. Orlandi, and J Kim. "Through silicon via (tsv) defect modeling, measurement, and analysis" IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, vol. 7, n°1, doi : 10.1109/TCPMT.2016.2631731 :138-152, January 2017.
- [6] M. Ciappa "Selected failure mechanisms of modern power modules", Microelectronics Reliability 42 (2002) 653-667, PII S0026-2714(02)0042-2
- [7] V. Smet, F. Forest, J.-J. Huselstein, F. Richardeau, Z. Khatir, S. Lefebvre, and M. Berkani "Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 58, n°10, october 2011 doi 10.1109/TIE.2011.2114313