



**HAL**  
open science

## Vieillessement des connexions dans les modules de puissance : approche expérimentale et numérique

Guillaume Pellecuer, François Forest, Jean-Jacques Huselstein, André Chrysochoos, Tarik Madani

### ► To cite this version:

Guillaume Pellecuer, François Forest, Jean-Jacques Huselstein, André Chrysochoos, Tarik Madani. Vieillessement des connexions dans les modules de puissance : approche expérimentale et numérique. 3ème Symposium de Génie Electrique, Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. pp.3 - 5. hal-02958017v1

**HAL Id: hal-02958017**

**<https://hal.science/hal-02958017v1>**

Submitted on 5 Oct 2020 (v1), last revised 15 Nov 2021 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Vieillessement des connexions dans les modules de puissance : approche expérimentale et numérique

Guillaume PELLECUER, François FOREST, Jean-Jacques HUSELSTEIN,  
IES-GEM/Université de Montpellier  
André CHRYSOCHOOS, Tarik MADANI  
LMGC/Université de Montpellier

**RESUME** – Cet article propose une approche expérimentale et numérique du vieillissement des wire-bonds au sein des modules de puissance à semi-conducteurs. Des essais de vieillissement en cyclage thermique sont effectués sur des modules types pour récolter des données en fonction de l'amplitude et de la fréquence de ce cyclage. L'amplitude est limitée à des valeurs inférieure à 50°C, domaine dans lequel les dégradations observées se résument au décollement des wire-bonds. Ces tests permettent d'alimenter le volet numérique de l'étude dont l'objectif est de construire une méthodologie de modélisation thermo-mécanique visant à établir la distribution des contraintes puis des éventuels endommagements dans ces wire-bonds, de comportement thermo-élasto-plastique. Une approche expérimentale complémentaire est également présentée. Elle est basée sur des éprouvettes de test spécifiques, beaucoup plus simples à mettre en œuvre et à instrumenter que des modules de puissance.

**MOTS-CLES** – Fiabilité, Modules de puissance, Cyclage thermique, Fatigue thermo-mécanique, Wire-bonds.

## 1. INTRODUCTION

Composants clés de l'électronique de puissance, les modules à semi-conducteurs (IGBT-diodes ou MOSFETs) sont utilisés pour assurer la conversion de l'énergie électrique dans la plupart des applications industrielles ainsi que dans les transports et les réseaux électriques. La fiabilité de ces composants est donc un enjeu significatif. Dans les applications citées plus haut, les composants subissent des variations permanentes de leur régime de charge qui induisent un cyclage thermique (dit actif) des puces par auto-échauffement. La construction de ces modules est composée d'un empilement de différentes couches traversées par le flux thermique généré par les puces, ce qui conduit à l'existence, dans cet empilement, d'un gradient de température qui peut être important. Cette situation, combinée au cyclage thermique et à la dispersion des coefficients de dilatation des matériaux constituant les différentes couches, va créer les conditions d'un vieillissement thermo-mécanique qui touche principalement la partie supérieure des puces, à savoir la soudure entre la métallisation d'émetteur et les wire-bonds.

Au fil du temps, l'IES a développé des bancs de tests, afin de placer les modules de puissance dans des conditions de cyclage thermique actif, avec des paramètres très largement ajustables. De nombreux résultats ont été obtenus sur différents types de modules et avec des régimes de contraintes très divers. Ils ont permis de mettre en évidence des tendances intéressantes, en particulier sur la dépendance du vieillissement avec la fréquence du cyclage. Pour aller plus loin dans la compréhension des mécanismes de vieillissement et dans la prévision de la durée de vie des composants, il est indispensable d'aborder la construction de modèles physiques à même de représenter correctement les mécanismes irréversibles. C'est l'objectif de la démarche présentée dans ce papier, menée dans un cadre "électro-thermo-mécanique" qui utilisera les résultats expérimentaux obtenus pour procéder à l'identification des modèles.

## 2. TEST DE VIEILLISSEMENT

### 2.1. Banc de test

Dans le cadre du vieillissement des wire-bonds, l'IES a développé des bancs de tests qui ont été présentés dans des publications antérieures [1][2][3]. La structure repose sur la mise en opposition de deux bras d'onduleur PWM correspondant chacun à un module en test. Le principe d'opposition permet d'appliquer des conditions électriques semblables à celles rencontrées dans les applications industrielles tout en n'absorbant sur l'alimentation que l'équivalent des pertes des composants. Son fonctionnement sera rapidement rappelé dans ce papier.



Fig. 1. Bancs de tests comportant chacun 2 modules (bras d'onduleur)

### 2.2. Vieillessement accéléré

Dans les applications considérées, les fréquences de cyclage thermique sont basses, de l'ordre de 0,1Hz. Si l'on utilise de telles fréquences au cours des tests, pour des amplitudes de cyclage inférieures ou égales à 50°C, leur durée se compte en mois ou en années[4]. L'objectif de cette partie est de montrer comment on peut utiliser la modulation PWM pour générer des cycles thermiques représentatifs de la réalité tout en réduisant la durée des tests de manière significative (jusqu'à 50 fois plus faible). Ceci reste possible si on montre la non-dépendance du vieillissement vis à vis de la fréquence de fonctionnement. C'est dans cette optique que nous menons une campagne de vieillissement avec trois fréquences de cyclage (0,1Hz, 1Hz, 5Hz) pour une température de puce ondulant toujours entre 80°C et 130°C. Les premiers résultats portent à croire que la fréquence de cyclage n'a que peu d'influence dans le processus de vieillissement des wire-bonds. L'ensemble des résultats correspondant sera présenté dans l'article final.

## 3. MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUE - SIMULATIONS

Cette partie mettra en avant le travail de simulation par éléments finis réalisé avec comsol. Une première étape consiste à calculer le champ complet de température au sein du module pour un cyclage thermique donné. Cette "base" thermique, supposée découplée des effets mécaniques (i.e. échauffement plastique et couplage thermoélastique négligés) est ensuite utilisée pour focaliser les simulations thermo-mécaniques sur une zone entourant les wire-bonds .

### 3.1. Simulation thermique

Une phase préliminaire consiste à déterminer les pertes dans les modules de puissance à conditions de cyclage données. On peut alors réaliser une simulation thermique reproduisant fidèlement les conditions de fonctionnement obtenues dans le banc d'essai complet. L'intérêt est double. Tout d'abord, cela permet de déterminer les paramètres (forme et amplitude du courant, fréquence de découpage...) à appliquer pour avoir le profil thermique souhaité. Le second et principal intérêt est l'utilisation des données thermiques de l'assemblage complet (module et refroidisseur) dans les simulations thermo-mécaniques ciblées sur la connectique des modules. Sur la figure 2 ci-dessous, la partie gauche correspond à la géométrie implantée dans comsol et celle de droite montre un exemple de résultat (températures de jonction des 2 IGBT d'un module).

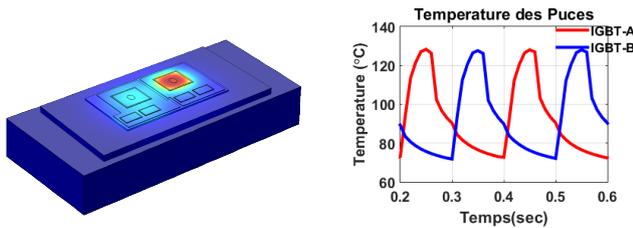


Fig. 2. Simulation thermique

### 3.2. Simulation thermo-mécanique

Ces simulations ont pour objectif de comprendre les mécanismes thermomécaniques qui sont à l'origine de la défaillance de modules et d'essayer de quantifier l'impact du chargement thermique sur leur dynamique et donc leur durée de vie. Le modèle numérique développé se concentre sur les soudures bonding-métallisation d'émetteur. Nous avons, en conséquence, limité la géométrie du système à la brasure, la puce et un seul wire bond (figure 4). Cela peut se faire en récupérant le champ de température dynamique de notre puce (face supérieure) et en calculant un coefficient d'échange thermique équivalent que l'on ramène à la brasure à partir de la simulation thermique de l'assemblage complet. Le couplage thermomécanique dans ces simulations est basé sur l'équation suivante (1).

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}_p + \frac{1 + \nu}{E} \underline{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{E} tr(\underline{\underline{\sigma}}) \underline{\underline{1}} + \alpha \theta \underline{\underline{1}} \quad (1)$$

où  $\underline{\underline{\sigma}}$ ,  $\underline{\underline{\epsilon}}$ ,  $\underline{\underline{\epsilon}}_p$ ,  $\theta$  sont respectivement les tenseurs des contraintes, des déformations, des déformations plastiques et la variation de température. Le modèle plastique est celui d'un écrouissage isotrope (Prager) utilisant une fonction seuil de type von Mises identifiée à partir de la courbe de traction de l'aluminium utilisé pour les bonding et la métallisation (cf. Fig.3) [5].

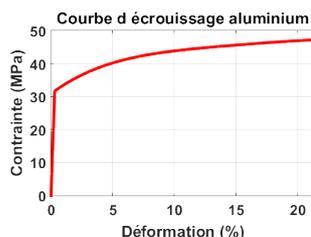


Fig. 3. Caractéristique élasto-plastique de l'aluminium

Les premiers résultats de ces simulations confirment plusieurs hypothèses comme l'influence de la puce sur les contraintes au

niveau de la soudure du bonding. On observe des efforts en dilatation et compression importants dans le pied de bonding à l'origine du vieillissement (forte plastification) de ces wire-bonds. Sur la figure 4 ci-dessous, nous pouvons voir la géométrie simulée et le cycle d'hystérésis "contraintes-déformations" dans une direction principale aux cours de plusieurs périodes de cyclage.

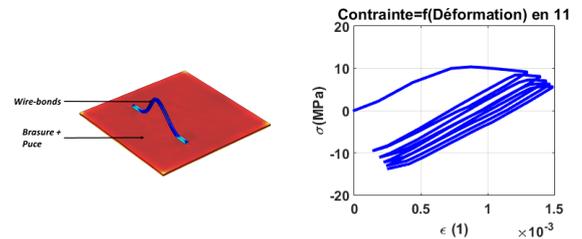


Fig. 4. Simulation thermomécanique

Pour la suite, le cœur du travail de modélisation s'appuiera sur la technique dite des "zones cohésives" [6], permettant de gérer numériquement l'endommagement progressif des wire-bonds et représenter la naissance de micro-fissures et leur propagation qui doit se conclure par le "décollement" du fil.

## 4. ÉPROUVETTES DE TEST

Les bancs de tests actuellement utilisés permettent le vieillissement de modules commerciaux standards dans des conditions réalistes mais la maîtrise des conditions de cyclage au niveau des pieds de bonding est imparfaite. L'instrumentation des modules (mesures températures...) est délicate et les analyses qui doivent être effectuées après les tests sont fastidieuses. Afin de simplifier la mise en œuvre de ces essais et en support de l'étude théorique, la réalisation d'échantillons spécifiques de wire-bonds est programmée. Ils devront être représentatifs des modules en ce qui concerne les attaches de bonding sur la puce tout en permettant des observations et mesures locales "on-line" avec des durées de test encore raccourcies. La maîtrise des contraintes d'origine thermique sur la zone concernée devrait également être grandement améliorée. Le papier final décrira la conception de ces éprouvettes et donnera éventuellement quelques résultats.

## 5. RÉFÉRENCES

- [1] F. Forest, J. J. Huselstein, S. Faucher, M. Elghazouani, P. Ladoux, T. A. Meynard, F. Richardeau, and C. Turpin. "Use of opposition method in the test of high-power electronic converters". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53(2) :530-541, April 2006.
- [2] Francois Forest, Amgad Rashed, Jean Jacques Huselstein, Philippe Enrici, and Thierry Martiré. "Banc de test dédié au vieillissement accéléré de modules IGBT en cyclage thermique : Méthode, instrumentation, résultats". In Symposium de Génie Electrique 2014, Cachan, France, July 2014.
- [3] Vanessa Smet, Francois Forest, Member, IEEE, Jean-Jacques Huselstein, Frédéric Richardeau, Zoubir Khatir, Stéphane Lefebvre, and Mounira Berkani. "Ageing and Failure Modes of IGBT Modules in High-Temperature Power Cycling". IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume : 58, Issue : 10, Oct. 2011).
- [4] F. Forest, J. J. Huselstein, G. Pellecier, and S. Bontemps. "A power cycling test bench dedicated to the test of power modules in a large range of cycling frequency. In PCIM Europe 2017"; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, pages 1-7, May 2017.
- [5] L. Merkle, M. Sonner, and M. Petzold. "Lifetime prediction of thick aluminium wire bonds for mechanical cyclic loads". Microelectronics Reliability, 54(2) :417-424, 2014.
- [6] V. Richefeu, A. Chrysochoos, V. Huon, Y. Monerie, R. Peyroux, and B. Wattrisse. "Toward local identification of cohesive zone models using digital image correlation". European Journal of Mechanics - A/Solids, 34(Supplement C) :38-51, 2012.