

Modélisation thermo-mécanique de matériaux encapsulants en électronique de puissance

Simon CAILHOL, Baptiste TRAJIN, Paul-Etienne VIDAL, Francisco CARRILLO

Laboratoire Génie de Production – Université Fédérale de Toulouse – INPT – ENIT

RESUME – Cette étude s’intéresse à la modélisation et à la simulation des gels encapsulants des modules d’électronique de puissance. Avec l’émergence de semi-conducteurs grand gap, fonctionnant à haute température, ce composant passif du packaging apparaît comme un organe sensible peu étudié. Les travaux présentés ici proposent une modélisation du matériau basée sur l’analogie des différents domaines de la physique avec le domaine électrique et sur une représentation d’état multi-physique. Cette méthode permet une simulation du comportement du gel pour une étude préliminaire au cours des phases amont de conception des modules d’électronique de puissance.

Mots-clés – Matériaux encapsulants, modules de puissance, modélisation thermo-mécanique, représentation d’état, simulation.

1. INTRODUCTION

Les matériaux semi-conducteurs grand gap (SiC, GaN,...) sont capables de fonctionner dans des gammes de températures plus élevées que les puces traditionnelles en Silicium. Leur introduction en électronique de puissance entraîne une augmentation des contraintes thermo-mécaniques et fait apparaître de nouveaux besoins pour les éléments passifs du packaging des modules de puissance dans lesquels ils sont mis en œuvre. Dans ce packaging, les gels encapsulants constituent un composant particulièrement sensible [1]. Ils font l’objet de modes de défaillance spécifiques [2] au cours du vieillissement des modules de puissance. Des études préliminaires des gels encapsulants ont permis d’en établir des modèles thermiques simples rapidement simulables [3]. Cependant afin de mieux appréhender les contraintes entraînant les défaillances, il est nécessaire de considérer les domaines thermiques, mécaniques et leur couplage.

Cet article traite de la modélisation et la simulation des matériaux encapsulants comme les gels silicones auxquels sont appliquées des contraintes thermiques générées par des composants d’électronique de puissance. Le modèle proposé s’appuie sur une analogie des différents domaines physiques considérés avec le domaine électrique. Il est construit comme une représentation d’état, ce qui en facilite la manipulation et la simulation dans les logiciels de calcul numérique usuels.

2. MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUE

2.1. Système d’étude

Le modèle permettant la simulation thermo-mécanique mono-dimensionnelle (spatiale) d’un matériau encapsulant est développé à partir des équations comportementales des matériaux. La nature mono-dimensionnelle du modèle proposé traduit l’hypothèse que l’essentiel des transferts d’énergie se fait le long de la longueur l . Le système considéré est donc constitué d’un cylindre de longueur l et de section circulaire de diamètre $d \ll l$. Le modèle proposé considère le système échantillonné en n volumes élémentaires de pas p dans lesquels les grandeurs physiques sont considérées constantes (figure 1).

La sollicitation thermique appliquée est une température T_j de chauffe de 150°C appliquée sur une des bases circulaires. Cette température correspond à la température de fonctionne-

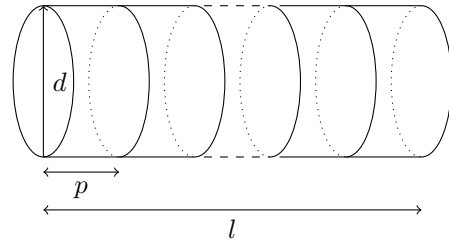


Fig. 1. Système d’étude

ment d’un composant grand gap en régime permanent dans un module de puissance. Dans cette étude, l’autre base circulaire est elle en convection naturelle avec l’air à température ambiante (18°C).

De plus, mécaniquement, le système considéré est contraint en non-déplacement sur ses deux faces circulaires.

Le modèle proposé s’appuie sur des analogies entre les domaines thermique et mécanique d’une part et le domaine électrique d’autre part. Une fois les modèles électriques équivalents définis, les outils de l’étude de circuits sont utilisés pour définir un système d’état modélisant le comportement thermo-mécanique du système.

2.2. Modèle thermique

Le modèle thermique proposé s’appuie sur l’analogie électro-thermique donnée dans la table 1.

Tableau 1. Analogie électro-thermique

Thermique			Électrique		
Grandeur	Unité	Notation	Grandeur	Unité	Notation
Flux	W	φ	Courant	A	I
Température	$^\circ\text{C}$ ou K	T	Potentiel	V	U
Conductivité	W/m/K	λ	Conductivité	S/m	σ
Résistance	K/W	R_{th}	Résistance	Ω	R
Capacité	J/K	C_{th}	Capacité	F	C

Les phénomènes de conduction et de stockage de l’énergie (modélisés par R_{th} et C_{th} respectivement) permettent d’établir les modèles des volumes élémentaires. Une fois le système complété avec la source thermique T_j , la convection (R_{thcv}) et la température ambiante T_a , on obtient le modèle donné dans la figure 2.

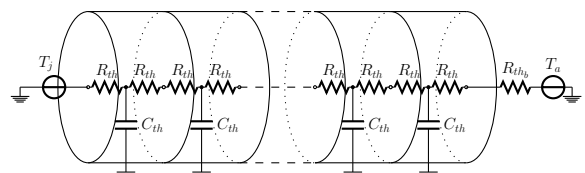


Fig. 2. Modèle thermique

Ce modèle, grâce au théorème de Millman, permet d’exprimer la température d’un volume élémentaire en fonction des

températures voisines et des impédances qui les connectent. L'ensemble de ces expressions peut alors être agrégé dans une représentation d'état comme celle donnée dans l'équation 1.

$$\dot{T} = A_{th} \cdot T + B_{th} \cdot U_{th} \quad (1)$$

où T est le vecteur d'état rassemblant les températures des différents volumes élémentaires, A_{th} et B_{th} sont les matrices des impédances thermiques et U_{th} regroupe les conditions aux limites ($U_{th} = [T_j \quad T_a]^T$).

2.3. Modèle mécanique

Le modèle mécanique retenu est le modèle rhéologique de Kelvin-Voigt [4] permettant de représenter le comportement visco-élastique réversible des gels silicones. Le matériau est alors représenté par sa rigidité E et sa viscosité η . Le modèle est constitué d'un ressort et d'un amortisseur en parallèle.

Tableau 2. Analogie électro-mécanique.

Mécanique			Électrique		
Grandeur	Unité	Notation	Grandeur	Unité	Notation
Déformation	\varnothing	ϵ	Charge	C	Q
Vitesse de déformation	s^{-1}	$\dot{\epsilon}$	Courant	A	I
Contrainte	Pa	σ	Potentiel	V	U
Viscosité	$Pa.s$	η	Résistance	Ω	R
Rigidité	Pa	E	Inverse capacité	F^{-1}	$\frac{1}{C}$

Pour compléter le modèle, les conditions aux limites sont représentées par des sources de vitesses de déformations ou des sources de contraintes selon le besoin. Un circuit ouvert permet de modéliser une condition de non déplacement, et un court-circuit celle de déplacements libres.

Le circuit électrique obtenu permettant de modéliser le comportement mécanique de notre système est donné dans la figure 3.

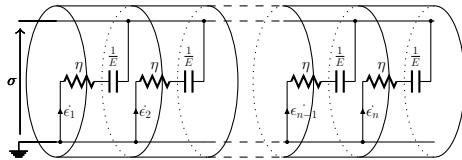


Fig. 3. Modèle mécanique

Une fois les différentes sources prises en compte (vitesse de déformation et contrainte), le théorème de superposition des circuits électriques permet de définir le système d'état donné dans l'équation 2.

$$\dot{\epsilon} = A_m \cdot \epsilon + B_m \cdot U_m \quad (2)$$

2.4. Modèle thermo-mécanique

Le couplage des modèles thermiques et mécaniques est réalisé à travers le coefficient d'expansion thermique α qui lie l'évolution de température du matériau à sa déformation comme indiqué dans l'équation 3.

$$\epsilon = \alpha(T - T_0) \quad (3)$$

La dérivation de l'équation 3 nous permet de définir des sources de vitesses de déformations qui y sont associées en parallèle à l'équivalent électrique des modèles rhéologiques des volumes élémentaires. Elles complètent alors le modèle mécanique proposé pour obtenir un modèle de simulation thermo-mécanique au travers d'une représentation d'état fusionnée (4).

$$\begin{pmatrix} \dot{T} \\ \dot{\epsilon} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{th} & 0 \\ \alpha B_m \cdot A_{th} & A_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T \\ \epsilon \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{th} \\ \alpha B_m \cdot B_{th} \end{pmatrix} \cdot U_{th} \quad (4)$$

3. SIMULATION

Le modèle ainsi constitué, auquel sont appliquées les propriétés du matériau définies par le fournisseur ou déterminées expérimentalement, est utilisé pour simuler le comportement thermo-mécanique du gel encapsulant. Il permet ainsi d'étudier la réponse thermique du gel, l'évolution de la contrainte dans le gel, de sa déformation et du déplacement induit (figure 4).

La connaissance de la température au sein du matériau est une aide au choix de ce dernier afin d'en éviter les détériorations physico-chimiques. L'estimation des contraintes peut permettre d'évaluer la détérioration du gel en les comparant à sa limite de rupture élastique. Enfin, en connaissant les déplacements du matériau et ses propriétés d'adhérence aux différentes surfaces, il devient possible d'évaluer les contraintes que peuvent subir des éléments de l'assemblage tels que les fils de bonding par exemple.

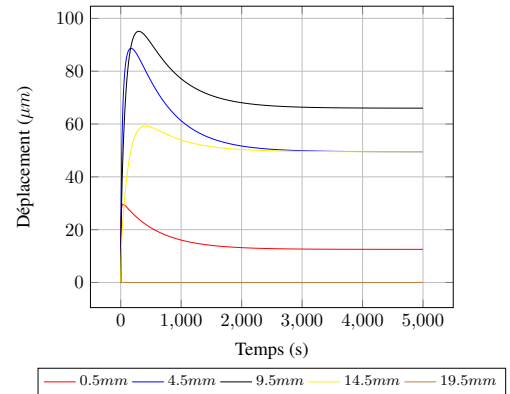


Fig. 4. Évolution du déplacement à différentes distances du composant

Davantage de résultats de simulations, notamment mécaniques, ainsi que leur analyse et leur confrontation à des résultats de simulations effectuées à l'aide d'outils commerciaux seront fournis dans la version finale de l'étude.

4. CONCLUSION

Ces premiers travaux nous ont permis d'établir un modèle mono-dimensionnel d'un gel silicone encapsulant. Ce modèle est exploitable par les logiciels de calcul numérique et fournit des résultats de simulation dynamique avec un faible coût calculatoire, ce qui permet une évaluation préliminaire et rapide du design de modules de puissance.

Cependant, la prise en compte d'une seule dimension spatiale limite pour l'heure les possibilités d'analyse. Les travaux en cours s'attachent donc à définir, avec une méthodologie similaire, un modèle tridimensionnel.

5. REMERCIEMENTS

Cette étude bénéficie du soutien du programme national GENOME (Gestion OptiMisée de l'Énergie) et de la société partenaire Labinal Power System.

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. Ciappa, « Selected failure mechanisms of modern power modules », Microelectronics reliability, vol. 42, no. 4, pp. 653-667, Elsevier, 2002.
- [2] H. Ye, M. Lin, C. Basaran, « Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging », Finite Elements in Analysis and Design, vol. 38, no. 7, pp. 601-612, Elsevier, 2002.
- [3] M. Haussener, S. Cailhol, B. Trajin, P.E. Vidal, F. Carrillo, « Thermomechanical modeling and simulation of a silicone gel for power electronic devices », Microelectronics reliability, vol. 55, no. 9-10, pp. 2045-2049, Elsevier, 2015.
- [4] A. Malkin, A. Isayev, « Rheology. Concepts, Methods, and Applications », ChemTec Publishing : Toronto, 2012.