



HAL
open science

Modélisation thermo-mécanique de matériaux encapsulants en électronique de puissance

Simon Cailhol, Baptiste Trajin, Paul-Etienne Vidal, Francisco Carrillo

► **To cite this version:**

Simon Cailhol, Baptiste Trajin, Paul-Etienne Vidal, Francisco Carrillo. Modélisation thermo-mécanique de matériaux encapsulants en électronique de puissance. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361684

HAL Id: hal-01361684

<https://hal.science/hal-01361684>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

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 multi-physique et à la simulation en régimes transitoire et permanent des gels encapsulants des modules d'électronique de puissance. Avec l'émergence de semi-conducteurs grand gap tels que le SiC ou le GaN, fonctionnant à température plus élevée que les composants Silicium classique, cet élément passif du packaging apparaît comme un organe peu étudié sensible aux effets thermiques et mécaniques. Les travaux présentés ici proposent une modélisation thermo-mécanique du matériau, basée sur l'analogie des différents domaines de la physique avec le domaine électrique. A partir de cette analogie, une représentation d'état multi-physique est établie, permettant une simulation en régime transitoire du comportement thermo-mécanique du matériau. Cette méthode de simulation du comportement du gel est adaptée pour une étude préliminaire au cours des phases amont de conception des modules d'électronique de puissance afin d'établir rapidement les température et contraintes mécaniques maximum subies par le gel.

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. Ainsi, leur utilisation permet d'atteindre des densités de puissances accrues au sein des modules de puissance avec des structures et des fonctions plus intégrées [1]. Cependant, leur introduction en électronique de puissance entraîne une augmentation des contraintes thermo-mécaniques sur les différents composants du module (brasure, substrat, encapsulant...) et fait ainsi 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 [2] aux contraintes thermiques, mécaniques et diélectriques. Ils font l'objet de modes de défaillance spécifiques [3] au cours du vieillissement des modules de puissance. En effet, un vieillissement thermique par exemple peut entraîner une diminution du caractère hydrophobe de l'encapsulant. L'introduction d'humidité résultante peut provoquer des phénomènes d'oxydation, une diminution des propriétés d'isolation diélectrique et ainsi accélérer le vieillissement du matériau ou encore provoquer une défaillance majeure du module de puissance [4]. Des études préliminaires des gels encapsulants ont permis d'en établir des modèles thermiques simples, rapidement simulables [5] permettant d'obtenir le champ thermique transitoire et permanent au sein du matériau encapsulant. Cependant afin d'appréhender les modes de défaillances sous sollicitation active des modules de puissances, il est nécessaire de considérer les domaines thermiques et mécaniques ainsi que leur couplage.

Dans le cadre des études préliminaires de dimensionnement des modules de puissance, il est utile de disposer d'un modèle thermo-mécanique de ses différents constituants, dont l'encapsulant. Ce modèle doit permettre d'obtenir les champs thermiques et mécaniques du matériau. La modélisation proposée, basée sur l'obtention d'un système d'état à partir de modèles

comportementaux macroscopiques tant thermiques que mécaniques, permet d'obtenir un tel modèle, rapide à simuler et fournissant une précision satisfaisante. Cette modélisation permet de s'affranchir des modèles par éléments finis, trop complexes et lourds à traiter lors des phases de dimensionnement amont.

Cet article traite donc de la modélisation et de la simulation des matériaux encapsulants comme les gels silicones auxquels sont appliquées des sollicitations thermiques générées par des composants d'électronique de puissance. Le composant d'électronique de puissance induit des pertes Joule qui se traduisent par un flux thermique dans les matériaux environnants. Ce flux thermique, en se propageant au sein du matériaux, engendre des déformations du fait de l'expansion thermique. L'analyse de ces phénomènes sous forme macroscopique montre qu'ils peuvent être transposés dans le domaine électrique où les outils d'analyse de circuits permettent d'en établir aisément une représentation d'état. Le modèle proposé s'appuie donc sur une analogie des différents domaines physiques considérés avec le domaine électrique [6], [7]. La représentation d'état finalement obtenue, facilite la manipulation et la simulation du modèle dans les logiciels de calcul numérique usuels.

2. MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUE

La technique de modélisation proposée s'appuie sur une analogie des champs de la physique considérés avec le domaine électrique. Une fois l'analogie établie, un circuit électrique équivalent est construit. Les outils d'analyse de circuits sont ensuite mis en œuvre pour déterminer le modèle de comportement. Cette approche est ici mise en œuvre pour modéliser le comportement thermomécanique d'un gel silicone encapsulant utilisé en électronique de puissance. L'analogie avec le domaine électrique et les outils d'analyse de circuits permettent d'appréhender l'ensemble des conditions aux limites thermomécaniques envisageables. Dans le domaine thermique par exemple, les flux thermiques imposés comme les températures imposées peuvent être traités, de même que les chargement en force ou en vitesse de déplacement imposés dans le domaine mécanique.

2.1. Système d'étude

Le modèle permettant la simulation thermo-mécanique mono-dimensionnelle spatiale en fonction du temps 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 dimension principale. Le système considéré est donc constitué d'un cylindre de longueur $l = 2.10^{-1} m$ et de section circulaire de diamètre $d = 1.10^{-2} m$. Le modèle proposé considère le système échantillonné en $n = 20$ volumes élémentaires de pas $p = 1.10^{-2} m$ dans lesquels les grandeurs physiques sont considérées constantes (figure 1).

Deux configurations de conditions aux limites thermiques ont été simulées. Dans les deux cas, une des bases est définie en convection avec l'air à température ambiante ($18^{\circ}C$). La première sollicitation thermique appliquée est une température T_j

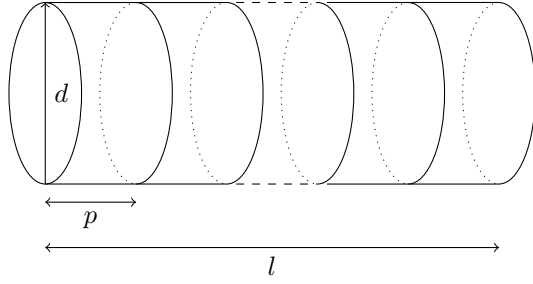


Fig. 1. Système d'étude

de chauffe de 150°C appliquée sur la base circulaire qui n'est pas en convection avec l'air. Cette température correspond à la température de fonctionnement d'un composant grand gap en régime permanent dans un module de puissance. La seconde sollicitation consiste en un flux thermique φ_j imposé sur la base précédemment chauffée. Cette dernière condition est similaire aux conditions d'utilisation d'un composant semi-conducteur induisant des pertes Joule et dont le flux thermique se propage en partie vers le gel encapsulant.

De même, mécaniquement, deux configurations ont été simulées. Dans les deux cas, une des base (celle chauffée) est encastrée et se voit donc imposer un déplacement nul. Dans la première configuration, la seconde base est libre permettant la dilatation sans contrainte du matériau. Cette configuration se rapproche de la mise en œuvre du gel dans un module d'électronique de puissance prévoyant un vide d'expansion pour le gel. Dans la seconde configuration, le seconde base est elle aussi encastrée, faisant ainsi apparaître des contraintes lors de la dilatation du gel. Cette configuration représente la mise en œuvre du gel sans vide d'expansion.

2.2. Modèle thermique

Le modèle thermique proposé s'appuie sur l'analogie électrothermique donnée dans le tableau 1. Cette analogie s'appuie sur les expressions identiques des lois de conduction de Fourier et d'Ohm. Il est par ailleurs possible d'adopter un formalisme unique tel que le Bond Graph pour représenter les deux domaines physiques, ce qui justifie pleinement l'analogie [8], [9].

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 respectivement par R_{th} et C_{th}) permettent d'établir les modèles des volumes élémentaires. Une fois le système complété avec la source T_j ou φ_j selon les conditions aux limites appliquées sur l'une des base du cylindre, et le couple formé par la convection ($R_{th_{cv}}$) et la température ambiante T_a appliqué sur l'autre base, on obtient le circuit modélisant le comportement thermique du matériau comme illustré dans la figure 2 pour le cas de la température imposée.

Ce modèle, grâce au théorème de Millman, permet d'exprimer la température T_i d'un volume élémentaire i en fonction des températures voisines et des impédances qui les connectent (équations (1), (2) et (3)).

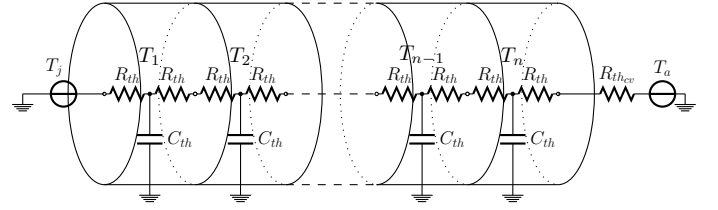


Fig. 2. Modèle thermique avec température imposée.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{\frac{T_j}{R_{th}} + \frac{T_2}{2R_{th}}}{\frac{3}{2R_{th}} + jC_{th}\omega} \quad \text{source de température } T_j \\ T_1 = \frac{\varphi_j + \frac{T_2}{2R_{th}}}{\frac{1}{2R_{th}} + jC_{th}\omega} \quad \text{source de chaleur } \varphi_j \end{array} \right. \quad (1)$$

$$T_i = \frac{\frac{T_{i-1}}{2R_{th}} + \frac{T_{i+1}}{2R_{th}}}{\frac{1}{R_{th}} + jC_{th}\omega} \quad (2)$$

$$T_n = \frac{\frac{T_{n-1}}{2R_{th}} + \frac{T_a}{R_{th} + R_{th_{cv}}}}{\frac{1}{2R_{th}} + \frac{1}{R_{th} + R_{th_{cv}}} + jC_{th}\omega} \quad (3)$$

Quelles que soient les conditions aux limites considérées, ces expressions se traduisent par un jeu d'équations différentielles linéaires qui se synthétisent dans (4) où l'on reconnaît la forme d'une représentation d'état admettant le vecteur T des températures de chaque volume élémentaire comme état.

$$C_{th}\dot{T} = A_{R_{th}} \cdot T + B_{R_{th}} \cdot U_{th} \quad (4)$$

où $A_{R_{th}}$ et $B_{R_{th}}$ sont les matrices des résistances thermiques, C_{th} est la matrice des capacités thermiques élémentaires et U_{th} regroupe les conditions aux limites ($U_{th} = [S_j \ T_a]^T$, S_j vaut T_j ou φ_j selon la condition considérée.).

La matrice des capacités thermiques C_{th} est une matrice diagonale. Pour faciliter la manipulation de la représentation d'état, les matrices des impédances thermiques $A_{Z_{th}}$ et $B_{Z_{th}}$ sont définies telles que $A_{Z_{th}} = C_{th}^{-1} \cdot A_{R_{th}}$ et $B_{Z_{th}} = C_{th}^{-1} \cdot B_{R_{th}}$. On obtient alors le système d'état (5).

$$\dot{T} = A_{Z_{th}} \cdot T + B_{Z_{th}} \cdot U_{th} \quad (5)$$

2.3. Modèle mécanique

Le modèle mécanique développé s'appuie sur les modèles rhéologiques macroscopiques établis à l'aide d'assemblages de ressort et amortisseurs équivalents. Plusieurs modèles sont utilisables tels que le modèle de Burger, de Kelvin-Voigt, de Maxwell ou encore de Maxwell généralisé. Ces modèles étant convertis en réseaux d'impédances électriques, l'approche proposée par analyse de circuits est à même de traiter chacun d'entre eux. Dans le cas des gels encapsulants de l'électronique de puissance, la gamme de température explorée conserve le gel à l'état visco-élastique. Les sollicitations mécaniques et thermomécaniques sont généralement de suffisamment faible amplitude pour que le matériau conserve des propriétés linéaires réversibles. C'est pourquoi, dans cette étude, nous avons choisi de traiter le modèle rhéologique de Kelvin-Voigt [10] donné dans

la figure 3. Il permet de représenter le comportement visco-élastique réversible des gels silicones. Le matériau est représenté par sa rigidité E et sa viscosité η . Ces deux comportements sont modélisés respectivement par un ressort et par un amortisseur associés en parallèle. Ces éléments lient la vitesse de déformation du matériau $\dot{\epsilon}$ à la contrainte σ dans le matériau. En unidimensionnel, la déformation se définit comme le rapport entre la variation de longueur ΔL et la longueur initiale L_0 (6).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

Le signe de la déformation traduit donc un phénomène d'allongement (déformation positive) ou de contraction (déformation négative).

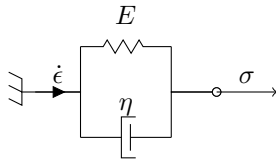


Fig. 3. Modèle rhéologique de Kelvin-Voigt

Comme le domaine thermique, le domaine mécanique est traité à travers une analogie avec le domaine électrique (tableau 2). Cependant, dans ce cas, l'analogie ne se limite pas à une correspondance des grandeurs, mais implique aussi une restructuration des modèles. En effet, alors que l'effort (σ) est partagé par des composants mécaniques montés en parallèle qui voient le même flux (ϵ), c'est le montage série des composants électrique qui permet d'obtenir la même exposition aux variables énergétiques. La transformation du montage mécanique en assemblage électrique passe donc par la mise en parallèle (resp. série) des composants électriques représentant les éléments mécaniques montés en série (resp. parallèle). On obtient alors, pour le modèle de Kelvin-Voigt, le schéma électrique donnée en figure 4.

Tableau 2. Analogie électro-mécanique.

Mécanique			Électrique		
Grandeur	Unité	Notation	Grandeur	Unité	Notation
Déformation	\emptyset	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}	$\frac{1}{C}$

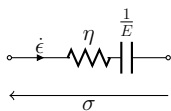


Fig. 4. Circuit électrique équivalent au modèle rhéologique de Kelvin-Voigt

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 (source de courant nulle) permet de modéliser une condition de non déplacement, et un court-circuit (source de tension nulle) celle de déplacements libres.

Le circuit électrique obtenu permettant de modéliser le comportement mécanique de notre système est donné dans la figure 5.

Une fois les différentes conditions aux limites intégrées, le théorème de superposition des circuits électriques permet de définir le système d'état donné dans (7).

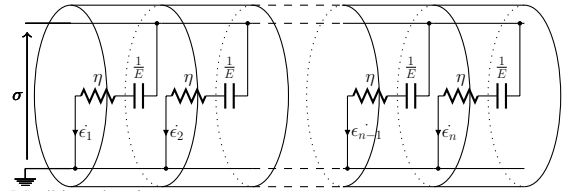


Fig. 5. Modèle mécanique

$$\dot{\epsilon} = A_m \cdot \epsilon + B_m \cdot U_m \quad (7)$$

où ϵ rassemble les déformations des volumes élémentaires, U_m le vecteur des contraintes imposées en limite, et A_m et B_m sont les matrices des impédances construites à partir du modèle obtenu grâce à l'analogie électro-mécanique.

Une fois les déformations obtenues, le déplacement q_i du volume i peut être obtenu (8).

$$q_i = \sum_{j=1}^i \epsilon_j p \quad (8)$$

2.4. Modèle thermo-mécanique

Nous ne considérons dans cette étude que les effets des variations thermiques sur la géométrie du système. En effet, nous négligerons les variations des paramètres thermiques en fonction des distances et volumes. De plus, nous considérerons les propriétés thermo-mécaniques du matériau constantes.

Ainsi, le couplage des modèles thermiques et mécaniques est réalisé à travers le coefficient d'expansion thermique α qui lie l'élévation de température du matériau à sa déformation comme indiqué dans (9).

$$\epsilon = \alpha(T - T_0) \quad (9)$$

Des sources de vitesses de déformations ϵ_{th_i} sont associées en parallèle du modèle rhéologique comme illustré dans la figure 6. Ces sources de vitesses de déformation modélisant l'expansion thermique (10) sont obtenue par dérivation de (9).

$$\dot{\epsilon} = \alpha \dot{T} \quad (10)$$

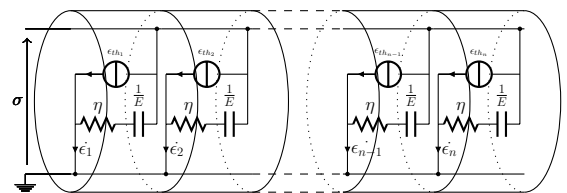


Fig. 6. Modèle mécanique excité thermiquement.

Ce nouveau modèle répond à l'équation différentielle (11) décrivant la réponse mécanique du matériau soumis à une dilatation due à l'évolution de son champ des températures.

$$\dot{\epsilon} = A_m \cdot \epsilon + B_m \cdot U_m + \alpha \dot{T} \quad (11)$$

En injectant le modèle de comportement thermique (5) dans (11), on obtient le modèle de comportement décrivant la réponse mécanique du matériau en réponse à une sollicitation thermique (12).

$$\dot{\epsilon} = \alpha A_{Z_{th}} T + A_m \cdot \epsilon + B_m \cdot U_m + \alpha B_{Z_{th}} U_{th} \quad (12)$$

Cette dernière expression est agrégée à la représentation d'état thermique (5) afin de former un système d'état multi-physique (13).

$$\begin{pmatrix} \dot{T} \\ \dot{\epsilon} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{Z_{th}} & 0 \\ \alpha A_{Z_{th}} & A_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T \\ \epsilon \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{Z_{th}} & 0 \\ \alpha B_{th} & B_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{th} \\ U_m \end{pmatrix} \quad (13)$$

Considérant le schéma électrique équivalent donné dans la figure 6, la contrainte σ dans le matériau est évaluée selon l'équation (14).

$$\sigma = \eta (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}_{th_i}) + E (\epsilon_i - \epsilon_{th_i}) \quad (14)$$

Le couplage thermo-mécanique induit les phénomènes suivants. En cas de déformation libre, il est évident que la contrainte au sein du matériau devra être nulle. De plus, avec un coefficient thermique positif, la déformation des volumes élémentaires sera positive et l'allongement global positif. En cas de déformation contrainte, l'allongement global sera nul, ce qui implique des déformations positives et négatives au sein du matériau selon le volume élémentaire considéré.

3. SIMULATION

Le modèle ainsi constitué est utilisé pour simuler le comportement thermo-mécanique du gel encapsulant Silgel 616. Les propriétés du matériau ont été extraites de sa documentation fournie par le fabricant ou déterminées expérimentalement. Ces propriétés sont donc caractéristiques d'un gel silicone employé comme encapsulant :

Propriétés thermiques :

- conductivité : $\lambda = 0,2 \text{ W.m.K}^{-1}$,
- chaleur spécifique : $C_p = 1600 \text{ W.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$,
- masse volumique : $\rho = 970 \text{ kg.m}^{-3}$,
- coefficient de convection : $h = 20 \text{ W.m}^{-2}$.

Propriétés mécaniques :

- module élastique : $E = 8120 \text{ Pa}$,
- module visqueux : $\eta = 4350 \text{ Pa}$,
- coefficient de poisson : $\nu = 0,45$,
- coefficient d'expansion thermique : $\alpha = 3.10^{-4}$.

3.1. Réponse thermique

Le couplage unilatéral retenu, de la thermique vers la mécanique rend la réponse thermique du matériau indépendante de son chargement mécanique. La figure 7 donne l'évolution de la température du matériau dans la première configuration de conditions aux limites décrite dans la section 2.1 (température de chauffe imposée). Cette évolution de la température est donnée pour différentes distance de la base chauffée.

De même, la figure 8 donne l'évolution de la température aux mêmes distances dans la seconde configuration de conditions aux limites (flux thermique imposé) permettant d'atteindre un régime permanent similaire à la celui de la première configuration.

Ces deux simulations montrent bien la différence de dynamique de chauffe du matériaux selon le type de sollicitation. Elles permettent aussi de constater que l'encapsulant limite avec son caractère isolant thermique la capacité à évacuer les calories par un des coté du composant semi-conducteur. En effet pour maintenir le gel dans des gammes de températures qui ne le détériore pas, il convient de limiter le flux thermique qui le traverse à quelques dizaines de mW , en réduisant au mieux la résistance thermique sur l'autre face du composant. Pour cela, des matériaux disposant d'une bonne conductivité thermique drainent le flux thermique vers un dissipateur/échangeur efficace.

3.2. Réponse mécanique

Deux configurations ont été considérées pour étudier la réponse mécanique du modèle. Dans chacune de ces configurations, la base chauffée est contrainte en déplacement. Dans la

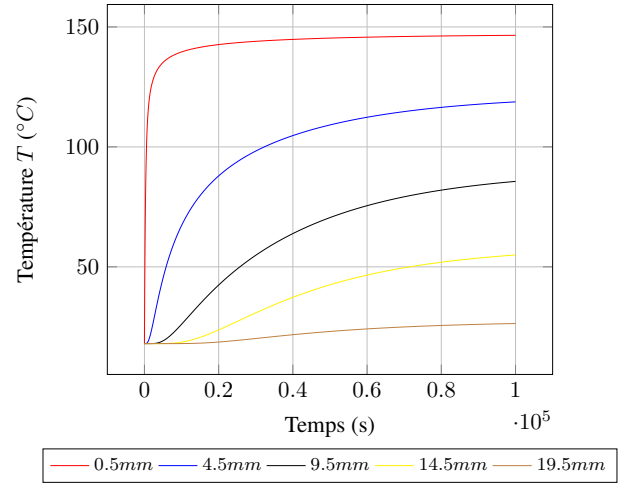


Fig. 7. Évolution de la température avec température imposée à différentes distances de la base chauffée.

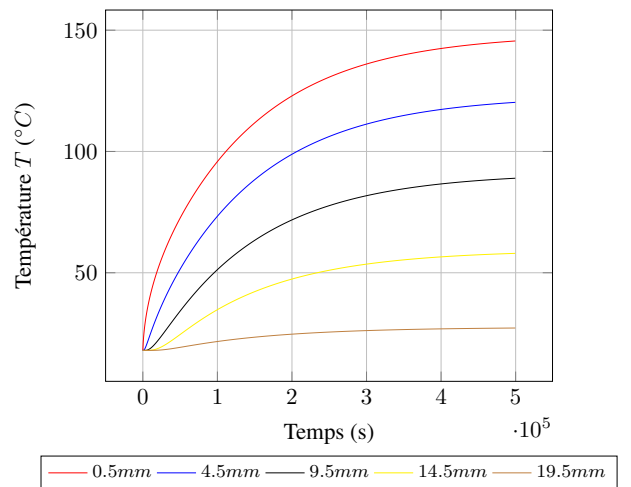


Fig. 8. Évolution de la température avec flux thermique imposé à différentes distances de la base chauffée.

première configuration, la dilatation s'effectue librement, la seconde base est donc libre. Dans la seconde configuration, la dilatation est contrainte en interdisant les déplacements de la seconde base. Si toutes les configurations de conditions aux limites sont envisageables, les résultats présentés ici sont ceux obtenus avec une sollicitation thermique par température imposée (première configuration thermique).

3.2.1. Dilatation libre

L'observation de la dilatation libre du matériau en réponse à une sollicitation thermique nous permet de valider le comportement du modèle. On observe une déformation des volumes élémentaires proportionnelle à leurs élévations de température (figure 9). Ces déformations se traduisent par un déplacement du matériau (figure 10). Ces déformation et déplacements sont obtenus uniquement du fait de l'expansion thermique et ne font apparaître aucune contrainte mécanique dans le matériau (hypothèse de déplacement libre).

3.2.2. Dilatation contrainte

La simulation du comportement du matériau contraint en déplacement permet de valider le modèle par l'apparition d'une contrainte liée à la compression du matériau lorsque celui-ci se dilate en réponse à la sollicitation thermique (figure 11). L'apparition de cette contrainte se traduit aussi sur l'évolution des déformations (figure 12) et des déplacements (figure 13) qui sont

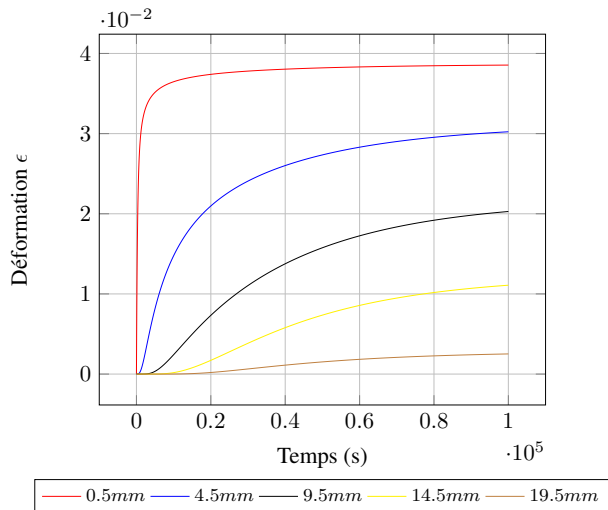


Fig. 9. Évolution de la déformation à différentes distances de la base chauffée pour le matériau non contraint mécaniquement.

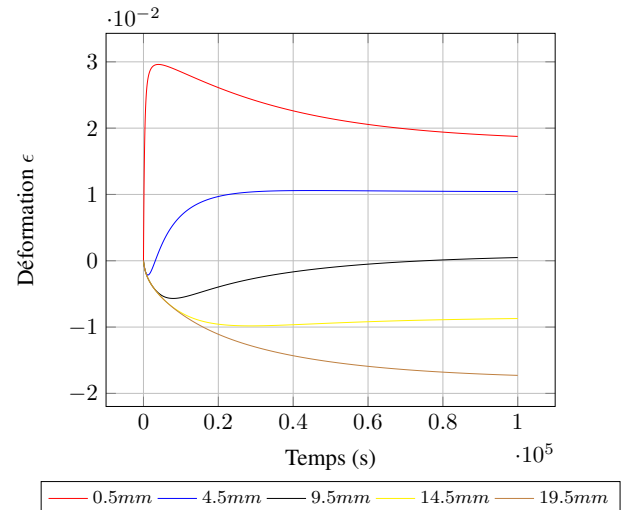


Fig. 12. Évolution de la déformation à différentes distances de la base chauffée pour le matériau contraint mécaniquement.

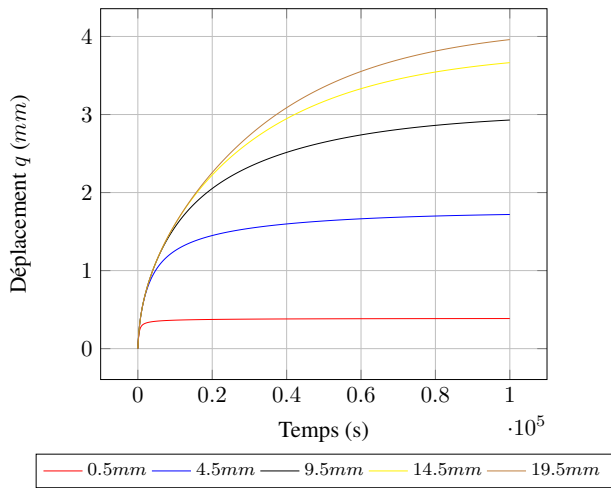


Fig. 10. Évolution du déplacement à différentes distances de la base chauffée pour le matériau non contraint mécaniquement.

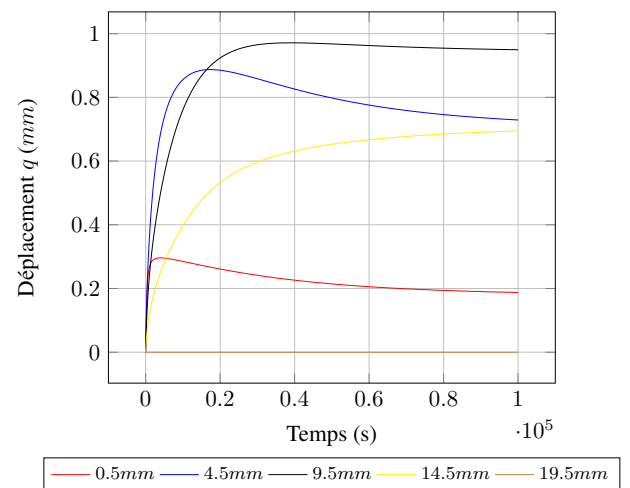


Fig. 13. Évolution du déplacement à différentes distances de la base chauffée pour le matériau contraint mécaniquement.

atténués (déplacement maximal divisé par 4).

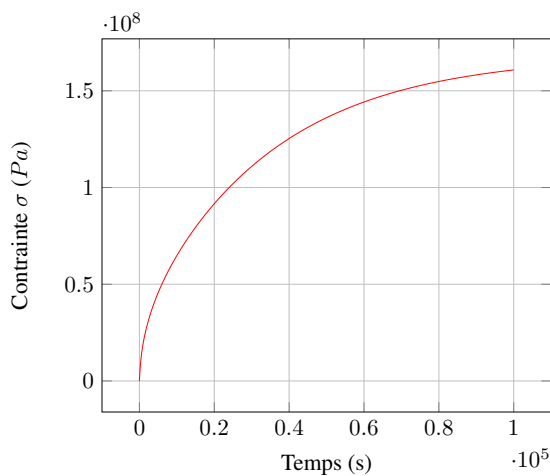


Fig. 11. Évolution de la contrainte pour le matériau contraint mécaniquement.

3.3. Discussion

On constate que les déplacements du gel proche de la base chauffante (proche de la puce lorsqu'il est mis en œuvre dans

un module de puissance) sont de l'ordre de grandeur des dimensions des fils de bonding. Ces déplacements pourraient donc en fonction de l'adhérence du gel aux fils de bonding, engendrer des contraintes contribuant au décollement de ce dernier.

Lors de la phase de dimensionnement amont des modules de puissance, la connaissance de la température au sein du matériau est une aide au choix de ce dernier afin d'éviter les détériorations physico-chimiques prématurées. 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 immergés dans le gel tels que les fils de bonding par exemple.

4. CONCLUSION

Ces premiers travaux nous ont permis d'établir un modèle mono-dimensionnel d'un gel silicone encapsulant. Ce modèle, construit à partir d'une analogie établie entre chaque domaine physique considéré et le domaine électrique, est exploitable par les logiciels de calcul numérique. Il fournit des résultats de simulation dynamique avec un faible coût calculatoire et permet ainsi une évaluation préliminaire et rapide du dimensionnement de l'encapsulant mis en œuvre dans les 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. Toutefois, le problème mécanique tridimensionnel nécessite de considérer des contraintes et déformations selon 6 dimensions pour chaque volume élémentaire (3 traction/compression et 3 cisaillement).

Enfin, la représentation des modèles sous forme d'état permet d'ouvrir la voie aux outils de l'automatique tels que les estimateurs et les observateurs. De plus la mise en œuvre d'outil de réduction de modèle permettra de diminuer la complexité algorithmique liée à la simulation du modèle. Ainsi, les modèles obtenus pourraient être mis en œuvre dans des schémas d'observation temps-réel. Ces derniers constitueraient le socle de dispositifs de health-monitoring et diagnostic en ligne.

5. REMERCIEMENTS

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

6. RÉFÉRENCES

- [1] M. Haussener, N. Viviès, B. Trajin, P.E. Vidal, H. Weleman, « Etude et caractérisation d'une fonction hacheur intégrée par thermographie infrarouge », Symposium de Génie Electrique (SGE'14) - EF-EPF-MGE 2014, Juillet 2014.
- [2] M. Ciappa, « Selected failure mechanisms of modern power modules », *Microelectronics reliability*, vol. 42, no. 4, pp. 653-667, Elsevier, 2002.
- [3] 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.
- [4] T. Ebke, A. Khaddour, D. Peier, « Degradation of silicone gel by partial discharges due to different defects », *Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications*, , pp. 202-207, 2000.
- [5] 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.
- [6] D. Roye, R. Perret, « Définitions des règles de modélisation thermique des machines électriques tournantes », *Revue de Physique Appliquée*, vol. 20, no.3, pp. 191-202, 1985.
- [7] Ch. Chillet, A.W. Hadi, R. Perret, R. Isnard, « Identification du modèle thermique d'une machine à induction de puissance moyenne », *Revue de Physique Appliquée*, vol. 24, no. 9, pp. 923-931, 1989.
- [8] G. Dauphin-Tanguy, « Les bond graphs et leur application en mécatronique », *Techniques de l'Ingénieur*, ref. S 7 222, Septembre 1999.
- [9] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, R. C. Rosenberg, « System dynamics : modeling and simulation of mechatronic systems », Wiley, New-York, 4th ed., 2006.
- [10] A. Malkin, A. Isayev, « Rheology. Concepts, Methods, and Applications », ChemTec Publishing : Toronto, 2012.