



HAL
open science

Etude d'interfaces thermiques pour le management thermique des modules de puissance

Jean Pierre Ousten, Ludovic Menager, Zoubir Khatir, Laurent Dupont

► To cite this version:

Jean Pierre Ousten, Ludovic Menager, Zoubir Khatir, Laurent Dupont. Etude d'interfaces thermiques pour le management thermique des modules de puissance. EPF 2010 - 10th European Power Electronics Conference, Jun 2010, St Nazaire, France. 5p. hal-01704057

HAL Id: hal-01704057

<https://hal.science/hal-01704057>

Submitted on 8 Feb 2018

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.

Etude d'interfaces thermiques pour le management thermique des modules de puissance

Jean-Pierre Ousten, Ludovic Ménager, Zoubir Khatir, Laurent Dupont
INRETS-LTN
25 Allée des Marronniers, 78008 Versailles

Cet article présente des travaux de caractérisations thermiques statiques d'un ensemble d'interfaces thermiques. Ces dernières sont utilisées pour la gestion thermique en électronique de puissance. Ces caractérisations sont basées sur la norme ASTM D5470. L'objectif est d'extraire la conductivité thermique pour caractériser le vieillissement des interfaces. Des caractérisations transitoires complémentaires seront présentées en perspectives afin de voir si une analyse transitoire pourrait permettre de caractériser leur vieillissement à travers la capacité thermique volumique.

I. INTRODUCTION

La tendance actuelle en électronique de puissance est de concevoir des modules dissipant des densités de puissance élevées et supportant des contraintes environnementales sévères dues aux profils de mission (thermiques, mécaniques, hygrométriques, ...). Ces considérations nécessitent une gestion thermique performante des modules pour garantir une bonne fiabilité. Cela passe notamment par une minimisation de la résistance thermique entre les puces semi-conductrices et le dispositif de refroidissement. Le transfert de chaleur entre le module et l'élément refroidisseur est assuré par une interface thermique. Or cette dernière, qui peut être de nature variée (graisse thermique, matériau à changement de phase, feuille de graphite, élastomère, adhésif thermique, ...), est un point délicat du transfert de chaleur car elle peut représenter la part la plus importante de la résistance thermique globale du circuit thermique. Par ailleurs, la modification des caractéristiques physiques de l'interface thermique dans le temps, due à des phénomènes de vieillissement, peut entraîner une dégradation des échanges thermiques et conduire à des élévations de température pouvant mener à la défaillance du module de puissance.

Dans cette optique, nous avons engagé des travaux sur les interfaces thermiques pour des applications de gestion thermique de modules de puissance dans le domaine aéronautique. L'objectif général est l'étude du vieillissement de certaines interfaces, préalablement choisies, lorsqu'elles sont soumises à des cycles thermiques environnementaux entre -50°C et 150°C . Les éventuelles altérations structurelles de ces interfaces devraient se traduire par des évolutions de leur conductivité thermique et/ou de leur capacité thermique spécifique que nous tentons de détecter à l'aide de caractérisations appropriées. Il est à noter que peu de travaux sont menés actuellement sur les interfaces dédiées à l'électronique de puissance puisque celles-ci représentent une très faible part du marché des interfaces.

L'objet du présent article ne concerne que les aspects caractérisations et méthodologies associées mis en œuvre, le volet vieillissement fera l'objet d'une communication ultérieure. A ce sujet, très peu d'études ont été effectuées à ce jour. Dans ce qui suit, nous présentons en premier lieu un état de l'art des interfaces et des méthodes de caractérisation thermique. La méthodologie mise en œuvre

et les résultats de caractérisations thermiques statiques sont ensuite développés et discutés. Enfin, nous traitons de l'apport éventuel de caractérisations transitoires qui doivent pouvoir compléter les informations ou du moins être mises en œuvre afin de voir si elles permettent de révéler un indicateur de vieillissement.

II. ETAT DE L'ART DES INTERFACES THERMIQUES ET DES METHODES DE CARACTERISATION THERMIQUE

A. Interfaces thermiques

Lors de la mise en contact de deux surfaces entre elles, de multiples poches d'air se forment dans la zone d'union à cause d'imperfections surfaciques (marques d'usure, irrégularités d'assemblage, défauts de planéité, ...). Afin de supprimer ces poches d'air et garantir un bon contact thermique entre les deux surfaces, des substances liquides ou solides appelées interfaces thermiques sont utilisées.

La plupart d'entre elles sont composées d'une matrice polymère, comme les résines silicones ou époxy, et de garnitures thermiquement conductrices comme le nitrure de bore, l'aluminium, l'alumine, l'oxyde de zinc ou l'argent. Ces interfaces ont une conductivité thermique généralement comprise entre $0,5\text{W/m.K}$ et une dizaine de W/m.K , et donc toujours supérieure à celle de l'air ($0,026\text{W/m.K}$). Par ailleurs, la réduction de l'épaisseur de ces interfaces par application d'une pression (par fixation des composants électroniques) permet d'en abaisser la résistance thermique.

Il existe essentiellement cinq catégories d'interfaces thermiques, en l'occurrence les graisses, les élastomères, les bandes thermiques, les adhésifs conducteurs thermiques et les matériaux à changement de phase [1]. La haute viscosité des graisses et des matériaux à changement de phase permet de faciliter le remplissage des aspérités. Pour ces deux types d'interface, il existe des phénomènes de pompage et de séchage qui peuvent entraîner une augmentation de leurs résistances thermiques.

Au delà de leurs performances, les interfaces thermiques peuvent être choisies sur d'autres critères (facilité d'utilisation dans les assemblages, stabilité à long terme dans la gamme de température utilisée, propriétés diélectriques, ...).

B. Méthodes de caractérisation thermique

Il existe principalement trois types de méthodes de caractérisation thermique, à savoir la méthode laser flash (norme E1461 [2]), la méthode calorimétrique (norme ASTM D5470 [3]) et l'analyse thermique à travers des assemblages électroniques [4-5].

La première est basée sur une approche de caractérisation thermique transitoire, permettant de déterminer la diffusivité thermique d'une interface. Celle-ci, combinée à des mesures complémentaires de capacités thermiques volumiques, permet d'obtenir la conductivité thermique de l'interface.

Cette dernière propriété peut être aussi déterminée par la seconde méthode (calorimétrique) qui est une caractérisation statique. Le principe de cette approche est détaillé dans la section III. Contrairement à la méthode laser flash, une pression est exercée sur une interface comme dans le cas d'un module de puissance. Cette particularité justifie le choix de la méthode calorimétrique pour la caractérisation d'interfaces thermiques, puisque les conductivités thermiques dépendent de la pression exercée.

Enfin, l'analyse thermique à travers des assemblages électroniques offre la possibilité de caractériser en statique ou en transitoire une interface pressée dans son environnement électronique. La mise en œuvre de cette méthode est relativement complexe. Toutefois, cette approche permet de déterminer à la fois la capacité thermique massique ou volumique et la conductivité thermique de l'interface. Ce dernier point est abordé en section IV.

III. CARACTERISATION STATIQUE D'INTERFACES THERMIQUES

A. Principe de caractérisation statique

Le principe de caractérisation thermique des interfaces reposant sur la norme ASTM D5470 se base sur une propagation de la chaleur idéale entre deux surfaces parallèles et isothermes entre lesquelles est insérée l'interface étudiée d'épaisseur uniforme (fig. 1). L'une des surfaces est en contact avec une source froide (refroidisseur) dont le rôle est d'évacuer le flux thermique traversant l'interface. L'autre surface est en contact avec une source chaude de manière à produire un gradient thermique uniforme perpendiculaire aux surfaces. En considérant le système adiabatique, l'interface est traversée par la totalité du flux de chaleur de manière uniforme. La discontinuité de température ΔT (fig. 1) à l'interface est due à la résistance thermique apparente de l'interface constituée de celle de l'interface elle-même mais également des deux résistances thermiques de contacts :

$$R_{th} = R_{th_{int}} + R_{th_{c1}} + R_{th_{c2}} \quad (1)$$

Certaines interfaces disponibles en différentes épaisseurs permettent de déduire les résistances de contact les concernant. Pour les autres, cela reste une difficulté qui peut néanmoins être minimisée par des états de surface appropriés et/ou en utilisant une conductivité thermique apparente de l'interface estimée par :

$$\lambda_{int} = \frac{Q.e}{\Delta T.S} \quad (2)$$

Où e est l'épaisseur de l'interface thermique (sous pression), S la section de l'interface et Q le flux thermique à travers l'interface.

Il est à noter que l'évaluation de cette dernière grandeur nécessite une évaluation des pertes latérales entre la source et l'interface.

La détermination de cette conductivité thermique apparente passe par une mesure d'épaisseur de celle-ci. Dans l'idéal, cette mesure devrait s'effectuer lors de l'injection de puissance. Toutefois pour des raisons de faisabilité, la mesure de l'épaisseur est réalisée après injection de puissance à température ambiante. Par ailleurs, l'obtention de la conductivité thermique se fait pour une pression donnée représentative de celle obtenue au niveau d'un module de puissance. Pour cela, il est nécessaire de contrôler la stabilité de la pression durant la phase de caractérisation (avant et après injection de puissance). En effet, on peut s'attendre à ce qu'une variation de pression impacte sur la mesure de l'épaisseur et de la distribution de température, et donc sur la conductivité thermique de l'interface.

Enfin, afin de réduire les erreurs sur la valeur de la discontinuité de température au niveau de l'interface, il est préférable d'avoir un nombre suffisant de mesures sur la distribution de température le long des blocs conducteurs.

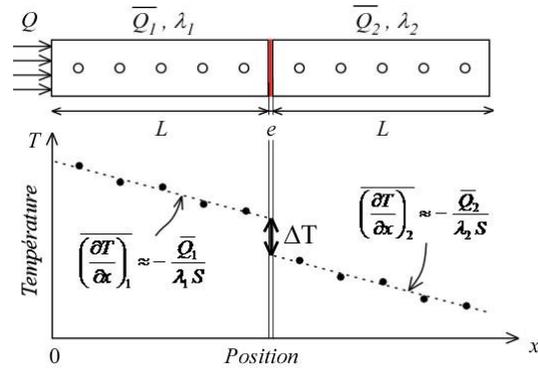


Figure 1 : Principe de la caractérisation de l'interface thermique.

B. Dispositif expérimental

Comme évoqué en introduction, le dispositif expérimental a été conçu pour supporter des cycles thermiques entre -50°C et 150°C en enceinte climatique, en vue d'une étude de vieillissement des interfaces. Ce montage est composé de deux blocs parallélépipédiques en aluminium (fig. 2) entre lesquels est insérée l'interface thermique étudiée, de deux sources de chaleur (principale et compensatrice) dans sa partie supérieure et d'un refroidisseur en aluminium dans sa partie inférieure. La source de chaleur principale est réalisée par une plaque de cuivre (épaisseur de 20mm et section de 80mm×80mm) munie de quatre cartouches chauffantes. Une source de chaleur compensatrice est placée au-dessus de la source de chaleur principale afin de compenser toutes pertes de chaleur éventuelles vers le haut. Comme la source de

chaleur principale, la source de chaleur compensatrice est faite d'une plaque de cuivre (épaisseur de 20 mm et section 92mm×92mm) munie de trois cartouches chauffantes. La régulation en température des deux sources chaudes se fait par rapport à une même température de consigne. Cela permet une régulation rapide et évite une élévation en température trop importante des cartouches chauffantes pouvant entraîner leur dégradation. Afin de limiter les déperditions de chaleur vers la partie supérieure et les faces latérales, un isolement thermique est effectué par une double couche de plaques téflon (PTFE) de 6mm d'épaisseur chacune. Pour assurer le passage du flux thermique, des interfaces thermiques (feuille de graphite type Keratherm S900) sont insérées sur les faces des blocs d'aluminium en contact avec la source de chaleur principale et le refroidisseur. Le montage est maintenu mécaniquement et sous pression contrôlée. Les différents éléments du dispositif sont empilés les uns sur les autres puis pris en sandwich entre une plaque de serrage et le refroidisseur. Le serrage de la plaque sur le refroidisseur se fait à l'aide de tiges filetées (Ø 6mm) en acier faiblement allié chrome - molybdène (fig. 3). L'application de la pression sur l'interface thermique se fait par application d'un couple de serrage identique sur chacune des tiges filetées. Sur chacune des extrémités de celles-ci sont disposées un empilement en opposition de 12 rondelles ressorts en acier allié chrome - nickel (fig. 3). Cet empilement a pour rôle d'absorber l'allongement des tiges induit par la dilatation des différents matériaux du montage lors de son échauffement. En vue d'une étude du vieillissement des interfaces thermiques, les matériaux retenus pour les tiges filetées et les ressorts ont des caractéristiques mécaniques variant peu dans la plage de température -50°C/+150°C.

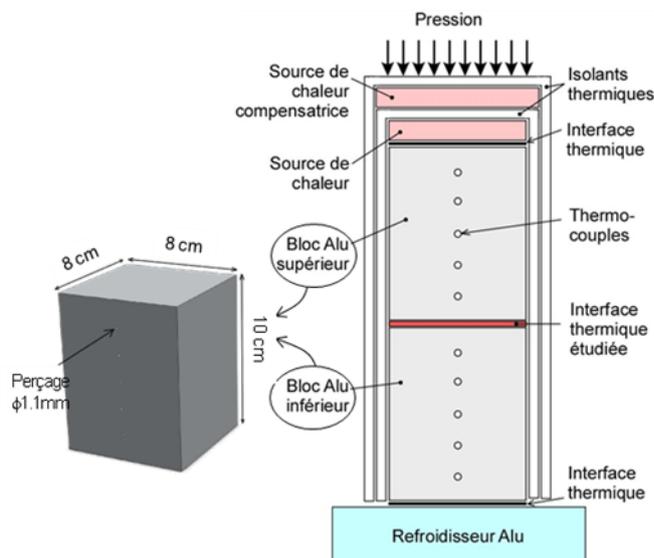


Figure 2 : Montage pour la caractérisation des interfaces thermiques.

En termes d'instrumentation, chaque bloc d'aluminium est percé de cinq trous (Ø 1,1mm) sur une longueur de 4cm régulièrement espacés dans le sens vertical afin d'y insérer des thermocouples de type K - classe 1 (Ø 1mm). Deux thermocouples de type K sont aussi utilisés pour réguler la température des deux sources chaudes. Les températures d'entrée et de sortie d'eau de la boîte à eau sont mesurées à

l'aide de sondes PT100. Ces dernières permettent d'estimer la puissance évacuée et donc les pertes thermiques.

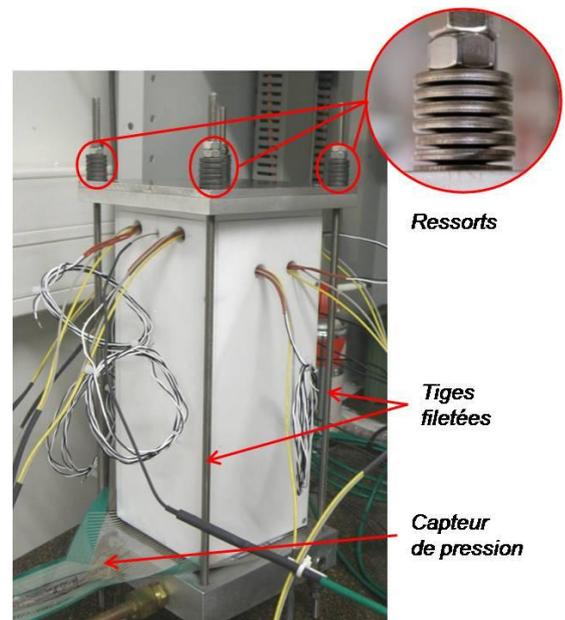


Figure 3 : Banc expérimental de caractérisation.

La distribution de la pression de serrage au niveau de l'interface thermique étudiée est mesurée à l'aide d'une feuille constituée d'une matrice de capteurs piézo-électriques. Ce capteur de pression est positionné, d'un côté sur le refroidisseur, d'un autre côté sur la face arrière du bloc aluminium inférieur grâce à une feuille de graphite type Keratherm S900. Le placement du capteur a été choisi pour des raisons pratiques et non destructives vis-à-vis de l'interface. La puissance électrique moyenne dissipée par les cartouches chauffantes est déterminée à partir d'une méthode voltampèremétrique. La mesure du courant et de la tension est effectuée respectivement par une sonde de courant A622 Tektronix (calibre de 100mV/A) et une sonde de tension DP25 Chauvin Arnoux (atténuation de la tension mesurée de 1/200). L'acquisition des signaux de courant et tension est faite sur un Graphtec WR1000. A partir des données issues du Graphtec, la puissance électrique moyenne Q est ainsi calculée sur plusieurs périodes.

C. Résultats expérimentaux

Afin de comparer la conductivité thermique de différentes interfaces, les mesures sont bien entendu réalisées sous les mêmes conditions expérimentales. La caractérisation thermique s'effectue pour deux températures de consigne, à savoir 140°C et 200°C, pour un débit d'eau fixé à 2,5l/min et pour un couple de serrage de 2N.m. Ce couple de serrage permet l'obtention d'une pression représentative de celle obtenue pour un module de puissance IGBT/diode serré à 3N.m (fig. 4).

Le tableau 1 récapitule les résultats expérimentaux de caractérisation sur un panel d'interfaces thermiques. Au vu des conductivités thermiques obtenues, les interfaces Compelma semblent être de bons candidats pour établir le transfert thermique entre un module et son refroidisseur. Toutefois, on remarque une différence entre la valeur de la conductivité thermique obtenue expérimentalement et celle annoncée par les constructeurs. Ceci peut s'expliquer par le

fait que les caractérisations des constructeurs sont réalisées dans des conditions expérimentales différentes.

Par ailleurs, il est important de noter que les valeurs des conductivités thermiques présentées dans le tableau 1 dépendent aussi de la précision des chaînes de mesure (électrique et thermique). Dans notre application, le remplacement des thermocouples de type K (précision de $\pm 1,5^\circ\text{C}$) par des thermocouples de type T (précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$) permettrait d'améliorer la précision sur les valeurs des conductivités thermiques. Enfin, ces dernières doivent être confirmées par de nouvelles campagnes de mesure.

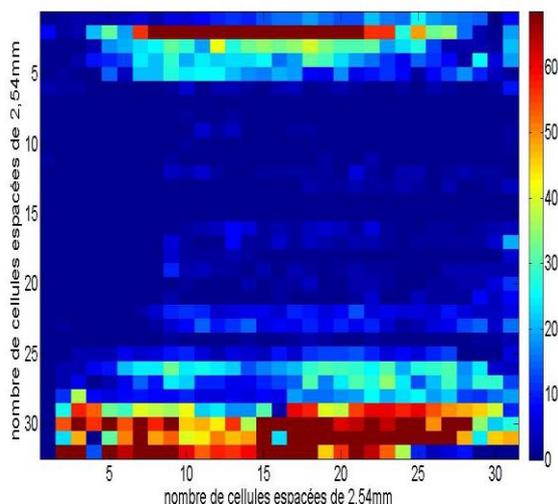


Figure 4 : Répartition de la pression au niveau d'une interface Keratherm S900 (pression moyenne de 11,9bar).

	Elastomères					Feuille de graphite	Bande adhésive	Matériau à changement de phase
Température de régulation 140°C / 200°C	SP1500ST	Q-Pad II	Q-Pad III	Compelma T006	Compelma T014	Keratherm S900	Bond-Ply100	Hi-Flow 300P
Température d'utilisation (°C)	-60/+180	-60/+180	-60/+180	-60/+200	-60/+200	-40/+400	-30/+120	+150
Epaisseur (µm)	220	145	117	433	430	266	210	115
Q (W)	375 / 578	384 / 587	361 / 552	371 / 573	396 / 604	352 / 549	303 /	352 / 552
Pertes latérales du bloc supérieur (W)	13,7 / 20,4	13,9 / 20,7	14 / 20,6	13,8 / 20,5	14,1 / 20,8	13,4 / 20	13,7	13,4 / 20,5
ΔT (°C)	11 / 13	3,5 / 6,1	8,5 / 11,6	5,7 / 7,4	3,5 / 5,6	11,7 / 15,4	27,9 /	8,8 / 12,9
λ_{int} mesuré (W/m.K)	1,1 / 1,5	2,4 / 2,1	0,7 / 0,8	4,2 / 5	7,4 / 7	1,2 / 1,5	0,3 /	0,7 / 0,74
λ_{int} constructeur (W/m.K)	1,8	2,5	2	6	14	7,5	0,8	1,6

Tableau 1 : Synthèse des interfaces thermiques caractérisées.

IV. APPORTS DES CARACTERISATIONS THERMIQUES TRANSITOIRES

Comme nous avons pu le voir, la caractérisation thermique statique permet de déterminer uniquement la conductivité thermique de l'interface. La capacité thermique spécifique de l'interface pourrait se révéler être un indicateur pertinent pour détecter le vieillissement. C'est l'apport espéré d'analyses thermiques complémentaires à l'aide de caractérisations transitoires. Par exemple, l'approche menée par Székely [6-7] permet de générer un modèle thermique transitoire d'un assemblage de puissance (réseau RC type Cauer) à partir de la réponse indicelle d'un composant à un échelon de flux de chaleur calibré. A partir de ce modèle, une représentation de l'assemblage par la fonction de structure définie dans [6-7].

La fig. 5 montre un exemple d'une telle représentation pour un assemblage électronique. Chaque sommet situe le passage à un nouvel élément de l'assemblage.

L'amplitude des sommets donne une information sur le produit conductivité thermique - capacité thermique. Cette représentation peut donner une indication sur le vieillissement d'un élément d'assemblage par un décalage du sommet. Ce décalage peut être horizontal, ce qui indiquera une variation de conductivité thermique ou verticalement, ce qui indiquera une variation de capacité thermique.

Cette approche est en cours de mise en œuvre. Le dispositif expérimental envisagé devra permettre de suivre l'évolution de l'impédance thermique de l'interface au cours du vieillissement (fig. 6). L'interface caractérisée est fixée entre deux plaques de cuivre amovibles. Cet ensemble est retiré pour le vieillissement en enceinte climatique. Le flux de chaleur est imposé par un composant IGBT mono-chip. La température de jonction du composant est déterminée par une mesure indirecte électrique tandis que celle faite au plus près de l'interface est effectuée via un thermocouple type T - classe 1.

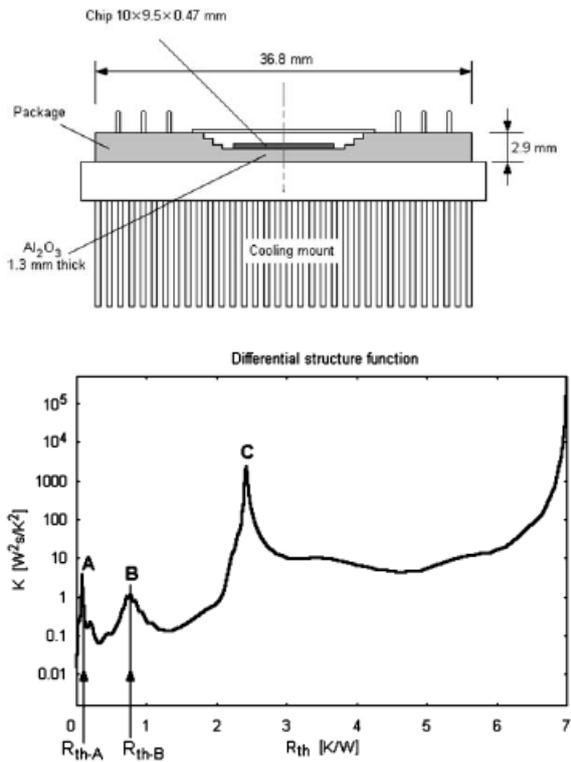


Figure 5 : Exemple d'une représentation par fonction de structure d'un assemblage électronique [7].

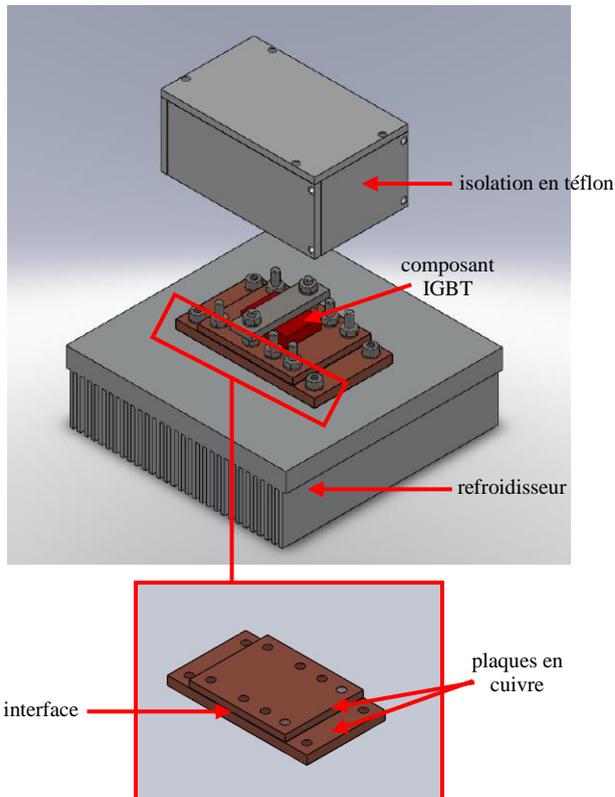


Figure 6 : Dispositif d'analyse transitoire des interfaces thermiques.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté ici les résultats d'une campagne de caractérisation thermique statique d'un panel d'interfaces effectuée dans les mêmes conditions expérimentales. Ces caractérisations sont réalisées en vue de l'étude du vieillissement des interfaces qui fait l'objet de travaux en cours. Nos conditions de tests, différentes de celles des constructeurs, mènent à des valeurs de conductivité thermiques légèrement différentes de celles annoncées dans les « data-sheet ». Par ailleurs, il est à noter que les chaînes de mesure impactent sur la précision des valeurs de conductivité obtenues. Pour cela, des campagnes supplémentaires de caractérisation avec des capteurs plus précis devront être menées, validant en plus la répétitivité des résultats. De plus, une vérification de la prise en compte ou non des résistances thermiques de contact devra être effectuée.

En termes de perspectives, des travaux de caractérisations transitoires mettant en œuvre une analyse thermique basée sur l'approche des fonctions de structures. Celle-ci devra nous permettre d'extraire la capacité thermique volumique afin d'être utilisée comme indicateur possible pour le suivi de l'évolution du vieillissement des interfaces. Cette caractérisation thermique transitoire devra être validée expérimentalement grâce au dispositif présenté dans cet article.

VI. REFERENCES

- [1] S. Narumanchi, M. Mihalic et K. Kelly, "Thermal interface materials for power electronics applications", IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Orlando, United States, Juillet 2008.
- [2] American Society for Testing and Materials, "Standard test method for thermal diffusivity by the flash", ASTM Standard E1461-01, 2001.
- [3] American Society for Testing and Materials, "Standard test methods for thermal transmission properties of thin thermally conductive solid electrical insulation materials", ASTM Standard D5470-06, 2006.
- [4] R. Schacht, D. May, B. Wunderle et al., "Characterization of thermal interface materials to support thermal simulation", IEEE International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems, Nice Côte d'Azur, France, September 2006.
- [5] B. Smith, T. Brunswiler et B. Michel, "Utility of transient testing to characterize thermal interface materials", IEEE International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems, Budapest, Hongrie, Septembre 2007.
- [6] V. Székely, "A new evaluation method of thermal transient measurement results", Microelectronics Journal, vol. 28, n° 3, p. 277-292, Mars 1997.
- [7] V. Székely, "Enhancing reliability with thermal transient testing", Microelectronics Reliability, vol. 42, n° 4-5, p. 629-640, Avril-Mai 2002.