

# Estimation de distributions de résistance thermique à la liaison d'éléments d'assemblages électroniques par thermographie infrarouge

Vincent FEUILLET<sup>1,3\*</sup>, Yves SCUDELLER<sup>2</sup>, Yvon JARNY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes, Université Paris 12 Val de Marne

61 avenue du Général De Gaulle – 94010 Créteil Cedex, FRANCE

<sup>2</sup>Laboratoire de Génie des Matériaux et Procédés Associés, <sup>3</sup>Laboratoire de Thermocinétique UMR CNRS 6607

Ecole polytechnique de l'université de Nantes, La Chantrerie, BP 50609 – 44306 Nantes, FRANCE

\* (auteur correspondant : vincent.feuillet@univ-paris12.fr)

**Résumé** –Ce travail présente une méthode de mesure non intrusive de distributions 2D de résistance thermique à la liaison d'éléments d'assemblages électroniques pour la détection de défauts. La méthode consiste à analyser la distribution de température en régime permanent acquise par thermographie infrarouge dans le plan des éléments dissipatifs de la structure étudiée. Un dispositif expérimental mettant en jeu les procédés de photolithographie et de gravure chimique a été mis au point. Il a permis de localiser et de caractériser thermiquement des lames d'air artificiellement créées au sein de liaisons adhésives.

## 1. Introduction

L'optimisation des transferts thermiques aux interfaces (colles, brasures, soudures) des composants électroniques de puissance présente un intérêt grandissant en raison des chutes de température importantes observées au niveau des liaisons entre éléments. Les phénomènes thermiques aux interfaces sont ainsi responsables d'une part souvent essentielle de l'échauffement global et de l'apparition locale de points chauds.

Les interfaces sont susceptibles de présenter différents types de défauts : décollements, vides, fissures, délaminations... Ceux-ci peuvent entraîner à long terme de graves problèmes de fiabilité pour le composant. Les vides dans les brasures et soudures peuvent être présents dès le processus de fabrication en raison d'un débit trop élevé sur les lignes de production [1] ou du manque d'adhérence des surfaces [2]. Les décollements et les fissures apparaissent de préférence en fonctionnement lorsque le composant est soumis à de brusques et fréquentes variations de température entraînant des sollicitations thermomécaniques importantes [3]. Les méthodes expérimentales de détection des défauts ne fournissent en général que des informations qualitatives sur l'emplacement des défauts. Katsis et Van Wyk [4] utilisent la microscopie acoustique pour déterminer le pourcentage volumique de vides dans la liaison puce-substrat après un certain nombre de cycles thermiques. L'imagerie par rayons X et la mesure de température par diode [5] permettent de visualiser l'interface et de localiser les régions de contact imparfait dans le plan de la puce. Beyfuss et *al.* [6] utilisent la microscopie photothermique afin de déterminer l'influence sur la température de la puce de l'épaisseur d'une lame d'air située à l'interface. Kurabayashi et Goodson [7] mettent en oeuvre la technique de photoréflexion qui consiste à parcourir la surface de la puce à l'aide d'une diode laser et à mesurer les variations d'intensité du faisceau réfléchi à l'aide d'un photodétecteur. Cette technique permet de reconstituer la distribution de résistance thermique d'interface mais nécessite néanmoins de nombreuses approximations au niveau du modèle thermique (dimensions latérales de la puce infinies).

## 2. Modélisation thermique des assemblages électroniques étudiés

### 2.1. Problème direct : méthode des Résistances Discrètes de Frontière

Une méthode de calcul originale permettant de déterminer les champs de température 3D en régime stationnaire au sein de composants hétérogènes (empilements pyramidaux d'éléments parallélépipédiques) a été développée [8]. La méthode des Résistances Discrètes de Frontière (RDF) est basée sur la décomposition en éléments simples de l'assemblage étudié et la discrétisation des frontières entre ces éléments. Chaque nœud est relié au puits de chaleur de l'assemblage par l'intermédiaire d'une résistance thermique de frontière. La résolution de l'équation de la chaleur pour chaque élément simple repose sur l'utilisation des Transformations Intégrales. Un algorithme itératif a été mis au point afin de déterminer les distributions de résistance de frontière en raccordant thermiquement les différents éléments de l'assemblage. La méthode RDF présente de nombreux avantages en termes de précision et de temps de calcul. Seule la discrétisation des interfaces est nécessaire et un traitement original des interfaces permet la prise en compte d'hétérogénéités et de défauts.

### 2.2. Problème inverse : algorithme du gradient conjugué

L'objectif de la technique de mesure est de reconstruire des distributions spatiales de résistance thermique de liaisons collées ou brasées. Le problème inverse associé a été résolu à l'aide de l'algorithme du gradient conjugué [9]. La méthode consiste à analyser la distribution de température obtenue par thermographie IR en régime permanent dans le plan des éléments dissipatifs de la structure étudiée (Figure 1). Une étude de sensibilité a permis de sélectionner la configuration d'éléments chauffants la plus favorable à une estimation rapide. Des configurations en forme de serpentín ou en bandes parallèles apparaissent plus performantes que des configurations constituées de un ou plusieurs plots carrés. On a également procédé à un raffinement progressif de la liaison afin de déterminer le nombre optimal de composantes de la distribution recherchée, ce qui semble incontournable dans des conditions expérimentales.

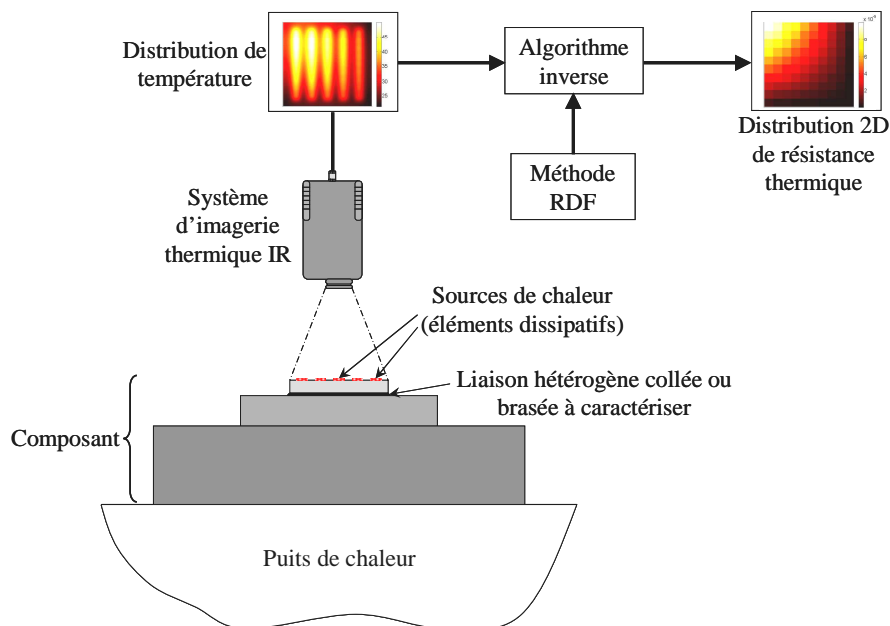


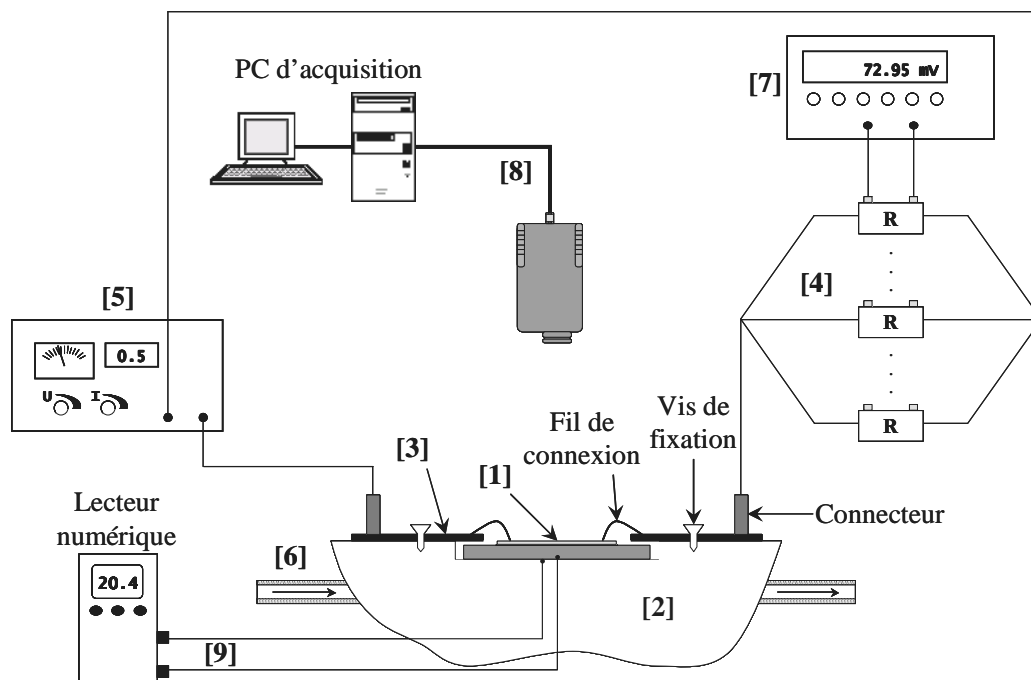
Figure 1 : Principe de la technique de mesure

### 3. Dispositif expérimental

#### 3.1. Assemblage à caractériser

Le dispositif expérimental mis au point est représenté sur la Figure 2. L'assemblage est composé d'un substrat reporté sur une embase au moyen de la liaison à caractériser. Des résistances électriques remplissant la fonction d'éléments chauffants sont réalisées en couches minces sur la face supérieure du substrat.

Le substrat est constitué d'une plaquette d'alumine. Il est revêtu initialement d'une couche de cuivre de  $1\ \mu\text{m}$  d'épaisseur en vue de l'élaboration des éléments chauffants. L'adhérence du cuivre sur l'alumine est assurée par une couche d'accrochage en chrome ( $0,1\ \mu\text{m}$  d'épaisseur) préalablement déposée sur l'alumine. Les techniques de photolithographie et gravure chimique permettent de former sur le substrat la configuration désirée d'éléments chauffants. Un thermocouple type K collé sur la face inférieure de l'embase en aluminium permet d'évaluer la résistance thermique du film de graisse s'interposant entre l'embase et le boîtier thermostaté.



- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| [1] : Assemblage à caractériser        | [6] : Alimentation fluide            |
| [2] : Boîtier thermostaté              | [7] : Multimètre numérique           |
| [3] : Circuit imprimé d'interconnexion | [8] : Dispositif de thermographie IR |
| [4] : Résistances électriques étalon   | [9] : Thermocouples type K           |
| [5] : Alimentation électrique          |                                      |

Figure 2 : Représentation schématique du dispositif expérimental

#### 3.2. Circuit imprimé d'interconnexion

Le rôle du circuit imprimé d'interconnexion (Figure 3) est d'assurer la distribution du courant dans les différents éléments chauffants réalisés sur le substrat tout en fournissant un support rigide à la connectique d'alimentation. Quatre ensembles de sept pistes parallèles en cuivre sont tracés par photolithographie et gravure chimique sur une carte époxy de  $1,6\ \text{mm}$

d'épaisseur. Cette disposition et le nombre élevé de pistes permettent d'envisager l'alimentation d'une grande diversité de configurations d'éléments chauffants sur le substrat. Les pistes sont reliées à un connecteur assurant la liaison avec l'alimentation électrique par l'intermédiaire de nappes flexibles. Un fil est brasé sur l'autre extrémité de la piste et sur l'élément chauffant à alimenter, réalisant ainsi la connexion électrique. La puissance dissipée dans chaque élément chauffant est déduite de la mesure de l'intensité et de la tension du courant électrique circulant dans l'élément placé en série avec une résistance électrique étalon de  $0,1 \Omega$ . La mesure de la tension aux bornes de cette résistance à l'aide du multimètre permet d'accéder à l'intensité du courant dans l'élément.

Signalons la grande fragilité de la brasure réalisée sur les éléments chauffants en raison de leurs faibles largeur (de l'ordre de 1 mm) et épaisseur ( $1 \mu\text{m}$ ). La brasure et le fil de connexion sont ainsi très sensibles à toute contrainte mécanique et se brisent relativement facilement. Le recours au circuit imprimé s'avère donc très utile puisqu'il permet de ne plus manipuler les fils une fois la connexion effectuée. Enfin, un trou de 20 mm sur 20 mm est réalisé au centre de la carte afin de laisser visible le sommet du substrat sur lequel doit être mesurée la température par thermographie.

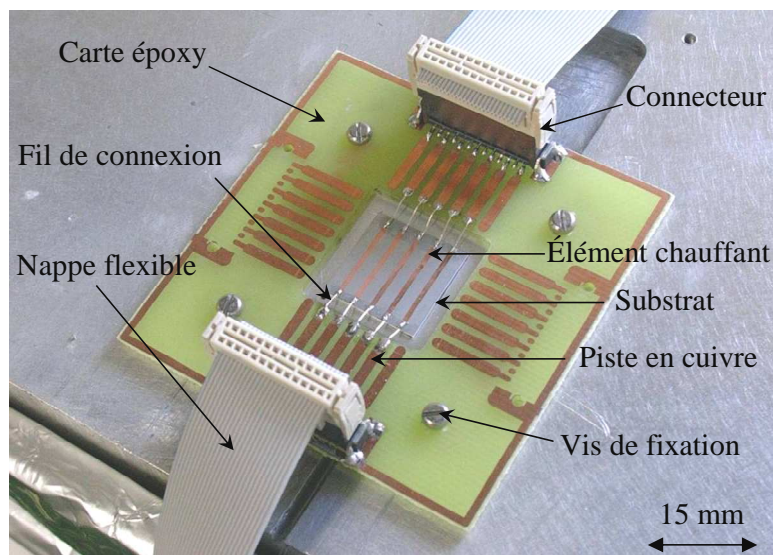


Figure 3 : *Circuit imprimé d'interconnexion*

### 3.3. Elaboration des éléments chauffants

Les éléments chauffants situés sur la face supérieure du substrat sont réalisés par photolithographie et gravure chimique. La couche de cuivre initialement déposée sur la plaquette d'alumine permet de réaliser ces éléments et de leur donner la forme souhaitée. Le principe de fabrication est de transférer sur le substrat des motifs initialement réalisés sur masque par photolithographie. Ce procédé comporte plusieurs étapes : dépôt de résine sur le substrat, tracé des motifs du masque sur film transparent, insolation du substrat à travers le film, révélation des motifs du masque sur le substrat. Les zones de cuivre situées en dehors des motifs sont finalement attaquées par gravure chimique. Cette technique permet de graver un grand nombre d'éléments chauffants sur un même substrat.

## 4. Résultats expérimentaux

Afin d'étudier la faisabilité et les performances de la méthode de caractérisation thermique mise au point, nous étudions des liaisons à base d'adhésifs double face de 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur [10]. Deux lames d'air de tailles différentes sont constituées au sein de la liaison (Figure 4(a)). L'excitation thermique de l'assemblage est effectuée à l'aide d'une configuration d'éléments chauffants en forme de serpentin pour une puissance totale dissipée  $P=7,0\text{ W}$ .

On constate une bonne compatibilité entre les champs de température mesurée et estimée (Figures 4(b) et 4(c)). Les résultats de l'estimation (Figure 4(d)) montrent que les caractéristiques géométriques de la liaison sont correctement restituées. Les niveaux de résistance thermique calculée (respectivement  $2.10^{-3}\text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$  pour l'air et  $7.10^{-4}\text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$  pour l'adhésif) en moyenne pour l'adhésif) peuvent être contrôlés à l'aide d'un calcul simple. L'épaisseur de la liaison adhésive est estimée à 50  $\mu\text{m}$ . L'expression simplifiée de la résistance selon le rapport épaisseur sur conductivité thermique donne une conductivité équivalente de  $0,025\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour l'air. Cette valeur est conforme à celle trouvée dans les tables pour  $20^\circ\text{C}$ . De la même façon, la conductivité équivalente identifiée pour le film adhésif est de l'ordre de  $0,07\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Cette conductivité est plus faible que celle du film de polymère constituant l'adhésif (de l'ordre de  $0,15\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) en raison de l'existence de deux couches adhésives poreuses de part et d'autre du polymère entraînant des résistances additionnelles (approximativement  $2.10^{-4}\text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ ).

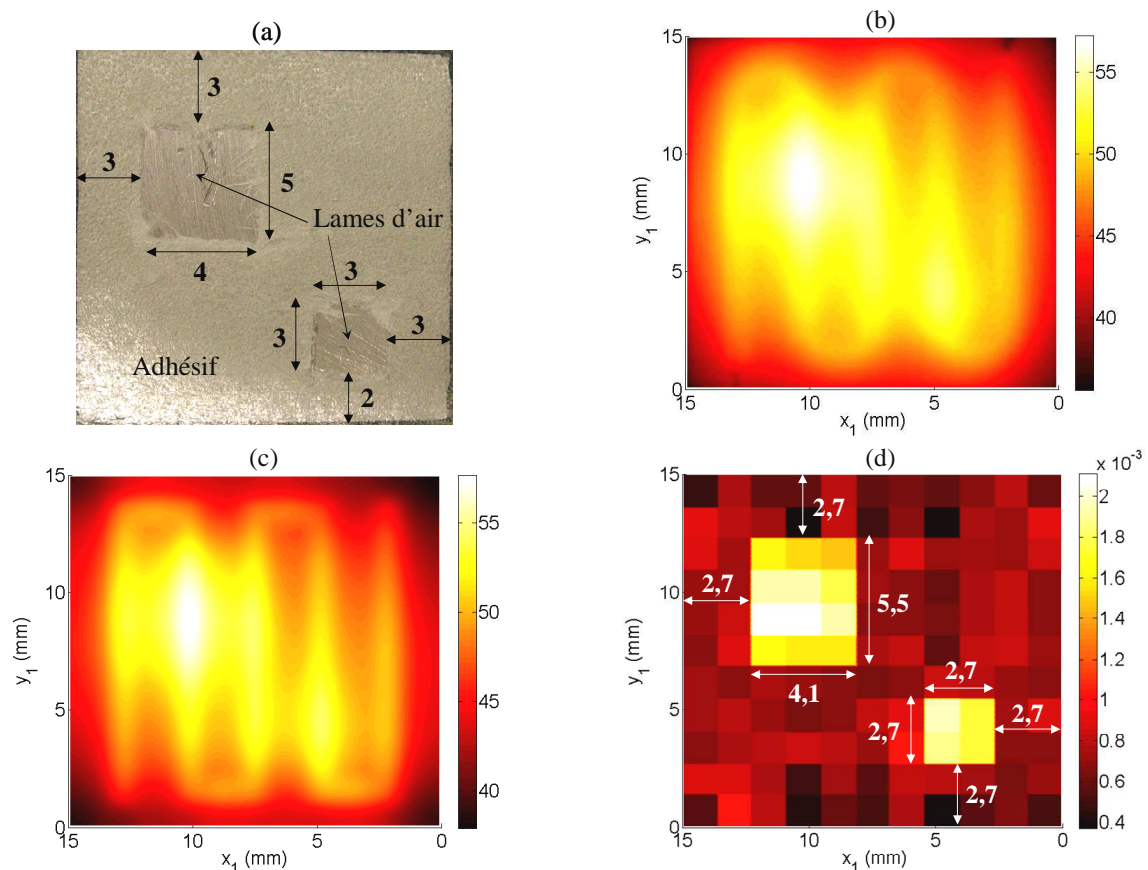


Figure 4 : Identification d'une liaison comportant deux défauts :  
 (a) positions des deux lames d'air (en mm), (b) champ de température mesuré ( $^\circ\text{C}$ ),  
 (c) champ de température estimé ( $^\circ\text{C}$ ),  
 (d) distribution de résistance thermique estimée ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )

## 5. Conclusion

Dans ce papier a été décrite une méthode de mesure pour la caractérisation thermique de défauts et d'hétérogénéités au sein de liaisons collées ou brasées. Des éléments chauffants ont été réalisés sur des substrats adaptés à l'aide d'une méthode performante de micro-fabrication associant les procédés de photolithographie et de gravure chimique. Ils sont destinés à l'excitation thermique de l'assemblage à caractériser et sont alimentés électriquement par l'intermédiaire d'un circuit imprimé d'interconnexion sur carte époxy. Le dispositif expérimental mis au point a permis de localiser l'emplacement de lames d'air artificiellement créées au sein d'une liaison adhésive. Les caractéristiques thermiques de la liaison ont été restituées de manière satisfaisante. Par ailleurs, l'influence du bruit de mesure a été analysée dans [10]. Il a été montré que cette erreur augmente lorsque la valeur de la résistance thermique recherchée diminue. Ainsi, l'algorithme d'inversion n'est pas en mesure d'identifier de manière fiable des résistances inférieures à  $10^{-6} \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ .

Le dispositif expérimental peut être utilisé pour la caractérisation d'autres types de liaisons telle qu'une brasure et constitue un outil de contrôle non destructif en vue de tester de nouveaux types de composants. Une des perspectives de ce travail consiste à étendre l'étude au régime transitoire, un film de température apportant plus d'informations qu'une image statique. La précision spatiale de la distribution estimée s'en trouverait améliorée, permettant de caractériser des aires de plus faibles dimensions. Egalement, un développement de la méthode d'inversion consisterait à caractériser des défauts situés à des profondeurs variables, la profondeur de la distribution à caractériser étant ici supposée connue et uniforme.

## Références

- [1] S. K. Iliiev, Thermal performance comparison of chip-on-board, flip chip-on-board and standard TQFP package, *Proceedings of the IEEE 14<sup>th</sup> Annual Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium* (San Diego, 1998), 161-168.
- [2] M. Mukadam, J. Schake, P. Borgesen, K. Srihari, Effects of assembly process variables on voiding at a thermal interface, *Proceedings of the Intersociety Conference Thermal Phenomena* (Las Vegas, 2004), 58-62.
- [3] D. C. Katsis, J. D. Van Wyk, Void induced thermal impedance in power semiconductor modules: some transient temperature effects, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39 (2003), 1239-1246.
- [4] E. Herr, T. Frey, R. Schlegel, A. Stuck, R. Zehringer, Substrate-to-base solder joint reliability in high power IGBT modules, *Microelectronics and Reliability*, 37-10/11 (1997), 1719-1722.
- [5] G. Pfannschmidt, Ultrasonic microscope investigations of die attach quality and correlations with thermal resistance, *Quality and Reliability Engineering International*, 8 (1992), 243-246.
- [6] M. Beyfuss, J. Baumann, R. Tilgner, *Photothermal imaging of local thermal resistances*, Springer Verlag, Berlin (1990), 17-20.
- [7] K. Kurabayashi, K. E. Goodson, Precision measurement and mapping of die-attach thermal resistance, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part A, 21-3 (1998), 506-514.
- [8] V. Feuillet, Y. Scudeller, Y. Jarny, The Discrete Boundary Resistance Method for thermal analysis of solid-state circuits and devices, *International Journal of Thermal Sciences*, 48-2 (2009), 372-382.
- [9] V. Feuillet, Y. Jarny, Y. Scudeller, Estimation of thermal resistance distributions for die-attach testing in microelectronics, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 15-7 (2007), 715-742.
- [10] V. Feuillet, *Développement d'outils d'analyse thermique pour la conception de composants électroniques de puissance*, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes (2006).