

Etude thermomécanique de la dégradation des assemblages de puissance soumis à des vieillissements à haute température

F. Arabi^a, L. Théolier^a, D. Martineau^b, J.-Y. Deletage^a, E. Woïrgard^a

^a University of Bordeaux, IMS Laboratory, UMR 5218, F-33400 Talence, France

^b Labinal Power System, Safran Group, Réau, France

RESUME - Des vieillissements sévères (cycles thermiques [-55 °C / +245 °C]) ont révélés des dégradations dans des substrats de puissance AMB Si₃N₄ cuivre nickel flash or. A l'issue de 2000 cycles thermiques, l'empreinte des motifs de métallisation de la surface supérieure se reflète sur la surface inférieure. Cela se traduit par une microfissuration de la surface de métallisation inférieure et une modification de la rugosité de surface. Ce phénomène n'est constaté que sur des cycles sévères, il ne l'a pas été sur des cycles thermiques [-40 °C / +150 °C]. La question posée par cet article porte sur les causes de l'apparition de cette dégradation, et les pistes pour y remédier. Dans un premier temps, le contexte de l'électronique de puissance est présenté afin de justifier les sollicitations sévères, auxquelles les modules de puissance haute température sont soumis. Les dégradations induites sont décrites et analysés. Le choix a été d'effectuer un protocole de simulations par éléments finis de ce vieillissement afin d'interpréter les origines de ces dégradations. Il a été clairement établi que l'origine de ces dégradations est la propagation de contraintes mécaniques dans le substrat, car le phénomène a été reproduit par simulations thermomécaniques. En vue de proposer des solutions pour remédier à ces dégradations rédhibitoires, l'influence de l'épaisseur de la métallisation cuivre, du coefficient de dilatation thermique, du module de Young, de la limite d'élasticité de cette couche, du gauchissement du substrat et de la dimension des plages de report est évaluée. L'objectif est de proposer des choix technologiques en terme de géométrie des plages de report (gravure anglaise ou traditionnelle) et de choix des matériaux composant le substrat de puissance afin qu'en environnement de fonctionnement à haute température ces dégradations ne se produisent pas.

Mots-clés — hautes températures, substrat AMB, tests de fiabilité, microparticules d'argent frittées, module de Young, cyclage thermique.

1. INTRODUCTION

Il y a quelques années est apparue une rupture technologique dans la fabrication des modules de puissance à application haute température. Les joints de brasure à forte teneur en plomb ont été remplacés par des joints frittés de pâte d'argent [1] dont la tenue en température après frittage est nettement supérieure. Afin d'effectuer des vieillissements

accélérés sur ces modules de puissance haute température essentiellement destinés à des applications aéronautiques, il est nécessaire de les solliciter très sévèrement. Des cycles thermiques [-55 °C / +245 °C] sont donc appliqués sur ces assemblages, composés d'une puce de puissance reportée par joint fritté sur un substrat AMB-Si₃N₄ métallisation cuivre nickel flash or. Le report de la puce sur le substrat par frittage de pâte d'argent va incontestablement augmenter sa robustesse aux cycles thermiques passifs [-55 °C / +140 °C] [2]. Cela induit une migration des zones fragiles du joint vers d'autres technologies composant l'assemblage de puissance [3,4]. L'objet de cet article est d'étudier une des conséquences sur le substrat de l'augmentation de la différence de température de ces cycles thermiques passifs.

2. DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION

2.1. Description des véhicules de test

Les VTs (véhicules de test) se composent de diodes en carbure de silicium (SiC) 15 A – 1200 V (CREE) (Fig.1), reportées sur des substrats céramiques Si₃N₄ métallisés cuivre avec une finition nickel flash or (KYOCERA) (Fig.2). Le joint entre la puce et substrat est composé de microparticules d'argent frittées (Fig.1). Les épaisseurs des différentes couches constituant l'assemblage sont données par le tableau 1.

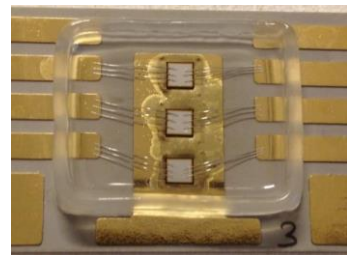


Fig.1 Vehicule de test composé d'une diode SiC reportée par frittage de pâte d'argent sur un substrat céramique Si₃N₄.

Tableau 1. Les épaisseurs des différentes couches constituant l'assemblage.

	SiC	Ag	Au	Cu supérieur	Si ₃ N ₄	Cu inférieur	Ni
Epaisseur (µm)	200	30	0,05	150	320	150	3

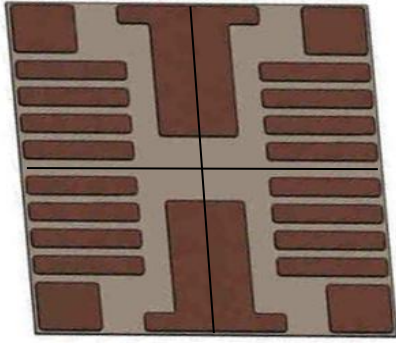


Fig.2 La géométrie des substrats utilisés (céramiques Si_3N_4 et métallisation cuivre) montrant la présence de deux symétries planaires.

2.2. Le vieillissement accéléré

Les véhicules de test ont été vieillis par des cycles thermiques VRT (Variation Rapide de Température) de $-55\text{ }^\circ\text{C}$ à $+245\text{ }^\circ\text{C}$, durée de maintien aux paliers de température haute et basse : 30 minutes, pente de transition entre les deux paliers : $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ (Fig.3). Un câblage filaire des puces a été réalisé dans le but de suivre l'évolution de la caractéristique thermique de l'assemblage au cours des vieillissements. Tous les véhicules de test ont été insérés dans l'enceinte thermique avant vieillissement, puis après un temps prédéfini de cyclage, certains véhicules de test sont prélevés pour subir un protocole d'analyses destructives (cisaillement, micro section) ou non destructives (RX, microscopie acoustique, caractéristiques thermiques).

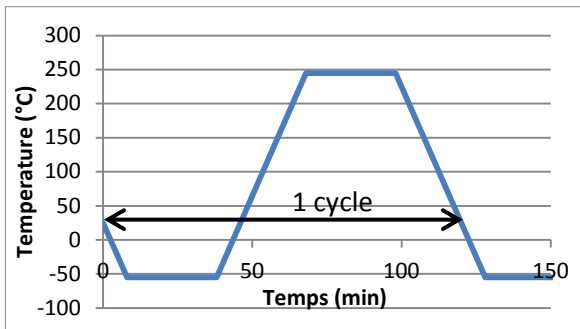


Fig.3 Profil de cyclage VRT (1 cycle).

2.3. Observation des dégradations apparaissant durant le vieillissement sur le substrat AMB

Une augmentation de la rugosité de surface de la métallisation inférieure du substrat apparait sur l'ensemble des VTs vieillis en VRT. Le motif gravé sur la métallisation supérieure se reflète et s'imprime sur la métallisation inférieure. L'aspect visuel montre que la métallisation s'est dégradée au droit des motifs gravés sur la surface supérieure (Fig.4) avec une rugosité de surface très importante (de l'ordre d'une dizaine de micromètres mesurés au profilomètre). Cette dégradation est spécifique à ce type de cyclages thermiques. En effet, elle n'a pas été observée sur les mêmes véhicules de test soumis à plus de 2500 cycles thermiques par chocs [$-55\text{ }^\circ\text{C}$ / $+180\text{ }^\circ\text{C}$].

2.4. Analyse des dégradations

Une analyse EDX est effectuée dans l'objectif d'analyser l'apparition du motif de la surface supérieure sur la métallisation inférieure. Dans la zone non-dégradée, les fissures sont moins importantes que dans la zone dégradée. Plusieurs spectres ont été relevés sur différentes zones de la métallisation (perturbées et non perturbées) dans l'objectif de déterminer le taux d'or et de nickel. Les analyses EDX

montrent (Fig.5) que la couche totalement fissurée est celle du nickel. Il est également montré qu'à l'intérieur des fissures, le cuivre s'est oxydé. Cette dégradation est réhibitoire et peut se répercuter sur la tenue d'accroche des puces.



Fig.4 Empreinte des motifs de la métallisation supérieure du substrat sur la métallisation inférieure.

2.5. Conclusion

Des cycles thermiques à différences élevées de température entre paliers haut et bas ont montré l'apparition de dégradations réhibitoires par fissuration de la couche de nickel sur la couche de métallisation inférieure au droit des motifs gravés sur la surface supérieure du substrat. Les tests ont été effectués sur des assemblages puce substrat, qui ne sont pas fixés sur une semelle dissipatrice. L'objectif de cette étude est de démontrer par des simulations thermomécaniques que l'origine de l'apparition de ce type de dégradations est exclusivement la conséquence des contraintes thermo-mécaniques engendrées dans le substrat par les dilatations différentielles du cuivre et de la céramique. En effet, seule la modélisation du comportement thermomécanique des cycles de vieillissement sur le substrat permet d'isoler les phénomènes thermomécaniques et d'examiner si l'effet sur la métallisation inférieure est reproduit, comme l'a montré l'expérimentation.

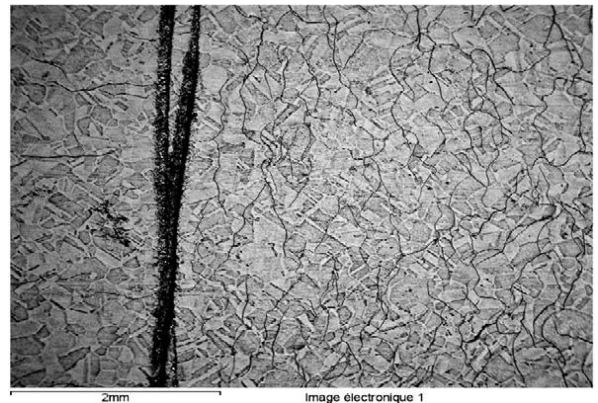


Fig.5 Image de surface arrière de la métallisation du substrat.

3. SIMULATION PAR ELEMENTS FINIS (ANSYS ©) DE L'EFFET THERMOMECHANIQUE DES CYCLES VRT [$-55\text{ }^\circ\text{C}/+245\text{ }^\circ\text{C}$]*

3.1. Effet d'un cycle thermique sur les contraintes équivalentes de la face inférieure du substrat

Pour toutes les simulations thermomécaniques de cette étude, seul un quart du substrat est modélisé (Fig.6) du fait de la présence de deux symétries planaires (Fig.2), le modèle utilisé est le substrat AMB Si_3N_4 métallisé cuivre utilisé dans l'expérimentation. Les couches de nickel et le flash d'or n'ont pas été modélisés [5]. Par hypothèse, le substrat est considéré à $25\text{ }^\circ\text{C}$ (température de référence) sans contraintes ni déformations résiduelles. Les températures lui sont appliquées selon le profil indiqué. La céramique est considérée comme un matériau fragile et le cuivre comme un matériau plastique. Les

paramètres thermophysiques de ces deux matériaux sont fournis dans les tableaux 2 et 3 dont C_1 et γ_1 sont les données du modèle cinématique non-linéaire d'érouissage de cuivre Chaboche.

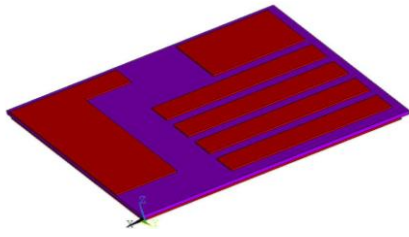


Fig.6 : Représentation du modèle substrat.

Tableau 2. Les propriétés des matériaux utilisés dans les simulations thermomécaniques [3].

Matériaux	α (K-1)	E (MPa)	ν
Si ₃ N ₄	3,3	300	0,25
Copper	15,4	110	0,34

Tableau 3. Les paramètres du modèle de l'érouissage cinématique (Chaboche) de cuivre [4].

Temp (°C)	C ₁ (MPa)	γ_1	C ₂ (MPa)	γ_2
20	54,04	962	721	1,1
50	52,88	1000	700	1,1
150	45,76	1100	600	1,1

A l'issue de l'application d'un cycle thermique, à la température de référence, l'empreinte des motifs du cuivre gravé de la face supérieure se distingue sur la face inférieure (Fig.7 haut). Le phénomène décrit dans le chapitre précédent est clairement d'origine mécanique sous l'effet des cycles thermiques. Les contraintes observées sont homogènes (Fig.7 bas), ce qui peut expliquer, lors de l'expérimentation, les raisons de l'apparition de fissurations de surface ou de modification de rugosité et l'absence de délaminage.

3.2. Evolution de la contrainte équivalente moyenne en face inférieure du substrat en fonction du nombre de cycles

La courbe (Fig.8) montre l'accroissement de l'accumulation des contraintes de Von Mises (valeur quadratique moyenne des contraintes en un point) moyennées sur l'ensemble de la métallisation inférieure du substrat. Elle peut donner une indication approximative du nombre de cycles subis par le substrat avant rupture de sa métallisation.

Si l'origine de ces dégradations est thermomécanique, elle peut avoir trois causes principales : effet de la contrainte mécanique diffusée dans le substrat durant les cycles, effet de la déformation ou du gauchissement du substrat, ou effet cumulé des deux phénomènes. Pour répondre à cette interrogation, une simulation d'un cycle thermique a été effectuée sur un substrat dont seuls les déplacements dans le plan du substrat ont été autorisés empêchant tout gauchissement. Les résultats des contraintes équivalentes sur la couche de métallisation ne montrent pas d'atténuation de l'effet de report du motif de la surface supérieure (Fig.9). Il en résulte que la cause de la dégradation, est principalement due aux contraintes de cisaillement des plages de report qui se transmettent sur la couche de métallisation inférieure. Les pistes d'amélioration de la robustesse aux cycles thermiques sévères de ce type d'assemblage vont dans le sens d'une diminution de l'effet de dilatation différentielle entre la couche de métallisation et la céramique. Le chapitre suivant aborde la quantification de l'influence de certains choix technologiques

sur les contraintes équivalentes de la métallisation inférieure (critère d'optimisation).

3.3. Optimisation des choix technologiques du substrat dans l'objectif de réduire ou de supprimer l'apparition de ces dégradations

3.3.1 Influence des dimensions des plages de report de la couche de métallisation supérieure

L'objectif de cette simulation est d'argumenter sur le choix d'une gravure anglaise ou traditionnelle. Cette simulation a montré que les dimensions des plages de report n'influaient pas l'empreinte de ses motifs en surface inférieure. Les contraintes de Von Mises calculées en surface inférieure sont du même ordre de grandeur que pour un substrat gravé avec des plages plus petites (Fig.10).

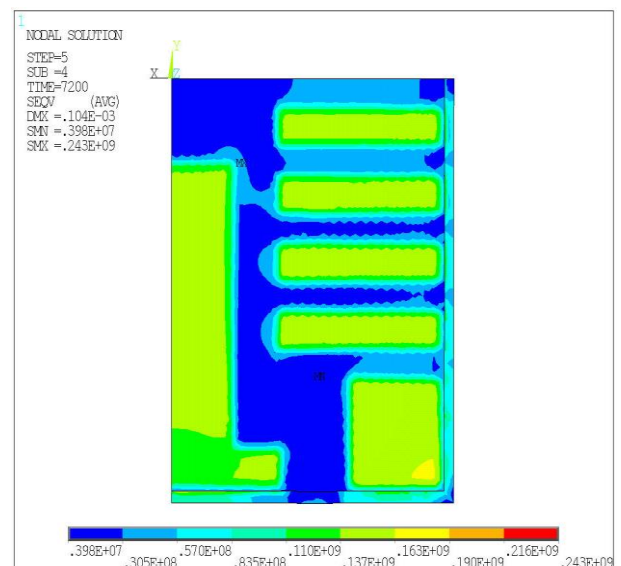
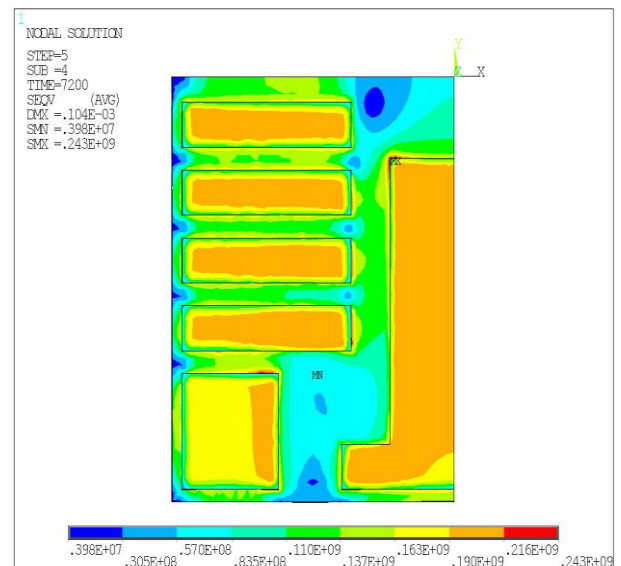


Fig.7 Contraintes équivalentes (Pa) sur la surface supérieure (haut) et inférieure du substrat (bas).

3.3.2 Influence de l'épaisseur du cuivre

La variation de l'épaisseur de cuivre a une influence significative sur le critère choisi après simulation de l'effet d'un cycle thermique. La figure (Fig.11) donne l'évolution de la contrainte équivalente moyenne en métallisation inférieure en fonction de l'épaisseur du cuivre des deux couches de métallisation après application d'un cycle thermique.

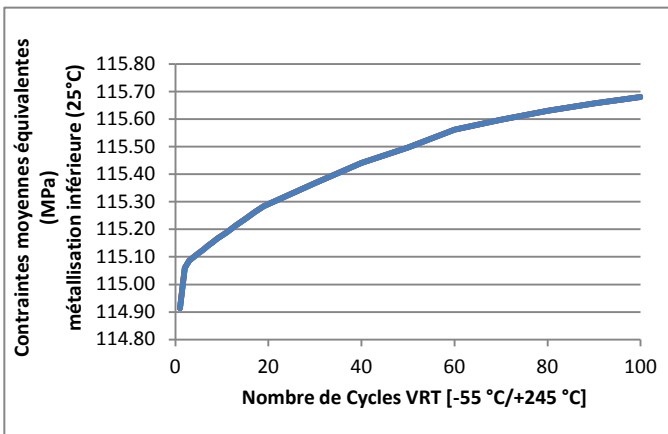


Fig.8: Contrainte moyenne dans la métallisation inférieure en fonction du nombre de cycles thermiques

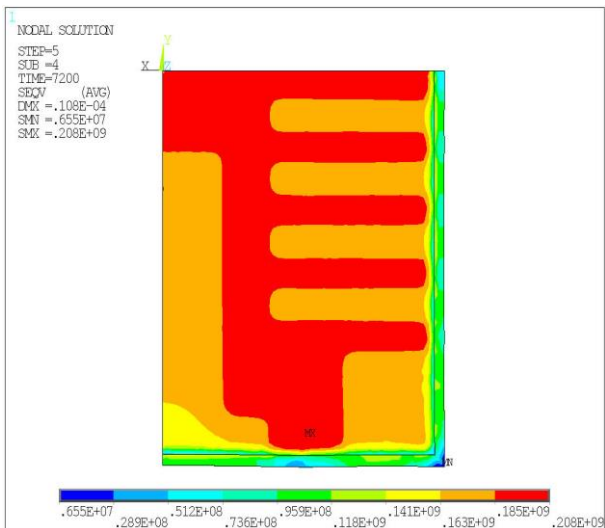


Fig.9 : Contraintes équivalentes (Pa) sur la métallisation de cuivre de la surface inférieure du substrat, dont le gauchissement en z est empêché.

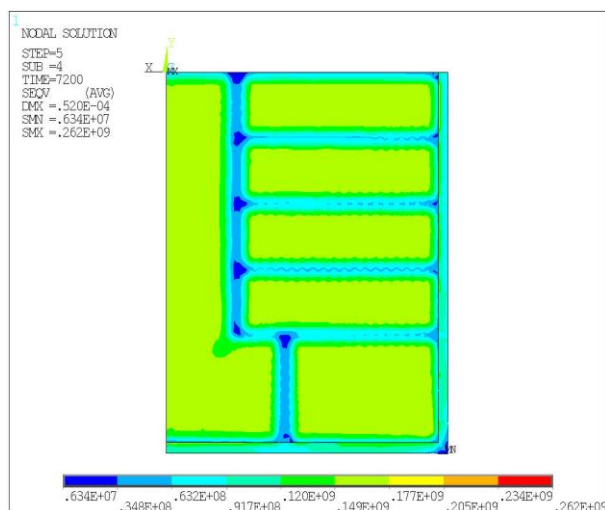


Fig.10 : Contraintes équivalentes (Pa) sur la métallisation de cuivre de la surface inférieure du substrat, dont les dimensions des plages de report en surface supérieure ont été augmentées.

La figure (Fig.12) représente les contraintes équivalentes sur la métallisation face inférieure dont l'épaisseur a été multipliée par deux par rapport à l'épaisseur initiale. L'empreinte des plages de report a quasiment disparu et les contraintes moyennes ont nettement baissé en surface de métallisation, par contre elles ont augmenté dans l'ensemble du substrat, ce qui le rend plus sensible à l'apparition de

délaminage des couches de métallisation. L'augmentation de l'épaisseur des métallisations réduit l'apparition de la dégradation observée, mais va probablement en générer une nouvelle en favorisant le délaminage des couches.

3.3.3 Influence du coefficient de dilatation thermique des couches de métallisation

La figure (Fig.13) donne l'évolution de la contrainte équivalente moyenne en métallisation inférieure en fonction du coefficient de dilatation des deux couches de métallisation après application d'un cycle thermique. Le résultat montre clairement qu'une couche de métallisation dont le coefficient de dilatation se rapproche de celui de la céramique augmente la robustesse aux cycles thermiques sévères et atténue considérablement l'apparition de la dégradation décrite dans ce papier.

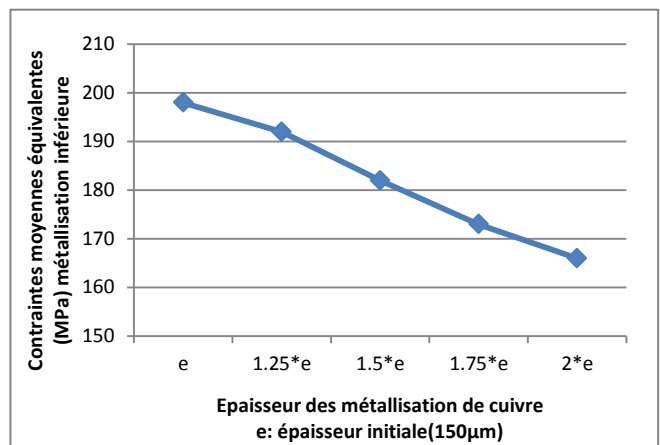


Fig.11 : Contrainte moyenne dans la métallisation inférieure en fonction de son épaisseur.

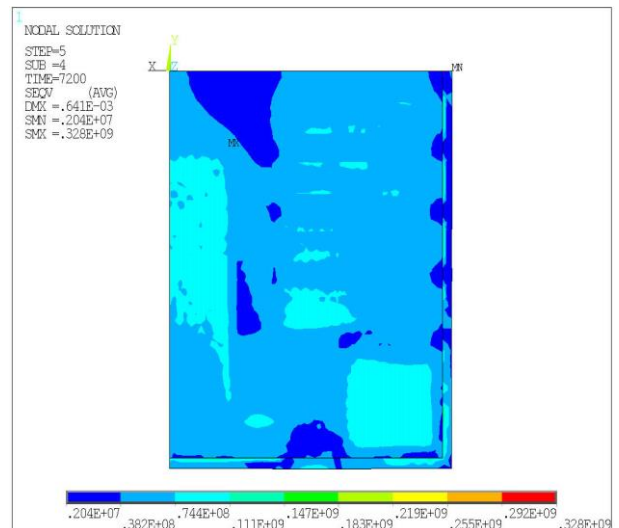


Fig.12 : Contraintes équivalentes (Pa) sur la métallisation de cuivre (d'épaisseur 300 µm) de la surface inférieure du substrat.

3.3.4 Influences du module de Young et de la limite d'élasticité des couches de métallisation

Les figures (Fig.14 et 15) donnent respectivement l'évolution de la contrainte équivalente moyenne en métallisation inférieure en fonction du module de Young et de la limite d'élasticité des deux couches de métallisation après application d'un cycle thermique. Le résultat montre que lorsque le module de Young ou la limite d'élasticité diminue, la robustesse aux cycles thermiques sévères augmente et l'apparition de la dégradation décrite dans ce papier atténue considérablement.

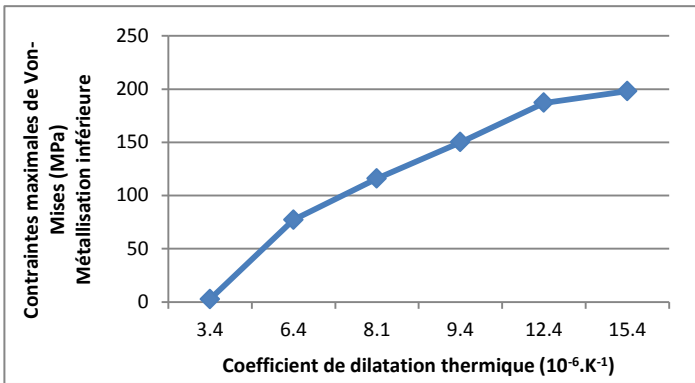


Fig.13 : Contrainte maximale dans la métallisation inférieure en fonction de son coefficient de dilatation

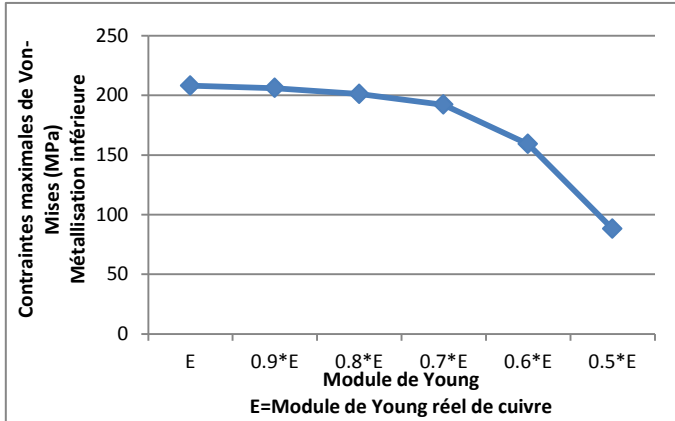


Fig.14 : Contrainte maximale dans la métallisation inférieure en fonction de son module de Young

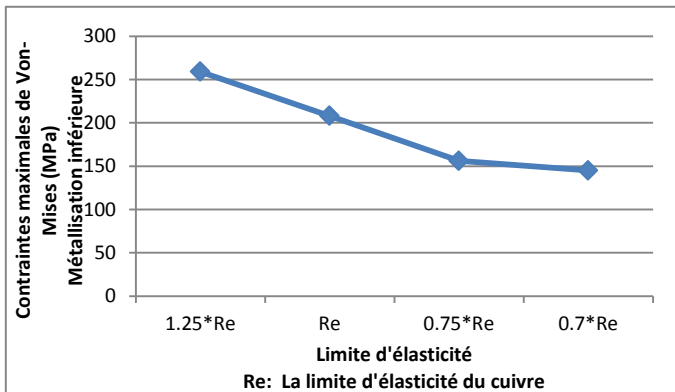


Fig.15 : Contrainte maximale dans la métallisation inférieure en fonction de sa limite d'élasticité

N.B : Les Contraintes maximales de Von Mises de la métallisation inférieure n'ont pas pu être simulés pour des valeurs de module de Young inférieures à la moitié de celle du cuivre et pareillement pour des valeurs de limite d'élasticité inférieure à 70 % de celle du cuivre à cause de la divergence du modèle de l'écroutissage cinématique (Chaboche) qui a été choisi pour le cuivre.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'étude décrite dans ce papier a montré que des dégradations survenues lors de cycles thermiques sévères à ΔT élevée sont d'origines thermomécaniques. Cette constatation oriente les solutions proposées pour en réduire les apparitions. Tout choix technologique permettant de réduire la dilatation différentielle entre les couches de métallisation et la céramique est pertinent.

Les vieillissements accélérés ont été appliqués sur des assemblages composés de puces reportées sur leur substrat, qui

était ainsi libre de toute contrainte. La simulation conduite sur un substrat dont les déformations n'ont pas été autorisées en dehors de son plan ne montre pas d'atténuation du phénomène de report des motifs de la face supérieure sur la face inférieure de métallisation. Il est donc probable que dans une configuration plus réaliste, dans laquelle le substrat est reporté sur une semelle dissipatrice, le phénomène se manifeste également.

Les simulations thermomécanique ont montré des pistes pour atténuer cette dégradation voire l'éliminer. Les solutions pour limiter ce phénomène seraient de disposer d'une métallisation avec un coefficient de dilatation proche de celui de la céramique et avec des propriétés mécaniques (module de Young et Limite d'élasticité) plus faibles que celles du cuivre.

5. REFERENCES

- [1] H. Schwarzbauer and R. Kuhnert, Novel large area joining technique for improved power device performance, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, 1991, pp. 93-95.
- [2] F. Le Henaff, S. Azzopardi, J. Deletage, E. Woigard, S. Bontemps and J. Jogue, A preliminary study on the thermal and mechanical performances of sintered nano-scale silver die-attach depending on the substrate metallization, Microelectronics Reliability, vol.52, issues 9-10, 2012, pp. 2321-2325.
- [3] L. Dupont, S. Lefebvre, Z. Khatir, S. Bontemps, Evaluation of Substrate Technologies under High Temperature Cycling, 4th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS), Naples, 2006.
- [4] M. Goetz, B. Lehmeier, N. Kuhn, A. Meyer, Silicon nitride substrates for power electronics, International Exhibition and Conference for Power electronics, IntelligentMotion, Renewable Energy and Energy Management, PCIM Europe 2012, 2012.
- [5] T. Youssef, E. Woigard, S. Azzopardi, D. Martineau, R. Meuret, Multi-physics modelling of thin films: optimization for finite elements simulations tools, 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems EuroSimE, 2015.
- [6] Online materials information resource — MatWeb, <http://www.matweb.com>.
- [7] Dong G, Lei G, Chen X, Ngo K, Lu G-Q. Edge tail length effect on reliability of DBC substrates under thermal cycling. Solder Surf Mt Technol 2009; 21(3):10-5.