

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique
Thème

Analyse numérique thermomécanique d'un microcomposant électronique assemblé sur un circuit imprimé

Présenté Par :

- 1) M BELAIDI Mohamed
- 2) M FODIL Said Noureddine

Devant le jury composé de :

Pr. DJEBBAR Noureddine	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Pr. OUDAD Wahid	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Pr. BELHENINI Soufyane	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
M. EL FATMI Imad	Doctorant UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, la détermination et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Notre profonde gratitude va à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études et qui nous ont permis d'explorer et d'apprendre. Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, le Professeur BELHENINI Soufyane, ainsi que notre co-encadreur, Monsieur EL FATMI Imad, et l'ensemble du corps professoral qui nous a guidés et soutenus à chaque étape de notre parcours académique.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance envers les membres du jury, le Professeur DJEBBAR Noureddine et le Professeur OUDAD Wahid, pour avoir consacré leur temps et leurs efforts à l'évaluation de ce modeste travail dans le but de le renforcer sur le plan scientifique.

Nos remerciements vont également à nos familles et à nos amis pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements constants tout au long de cette période de préparation. Nous adressons un sincère merci à chacun d'entre vous.

BELAIDI Mohamed

FODIL Said Noureddine

ملخص

تتبع تصنيع الأشباه الموصلات مسار قانون مور، مما يشير إلى تقدم تنموي في هذا المجال. بينما يشغل تجميع الرقاقت المقلوبة مكانة مركزية في تطبيقات مثل الهواتف المحمولة بين العديد من أنواع التجميعات المستخدمة في مجال الأشباه الموصلات.

تهدف دراستنا إلى تحليل السلوك الحراري والميكانيكي لتجميع الرقاقت المقلوبة من خلال محاكاة اختبار الاعتماد السريع، ولا سيما اختبار الدورة الحرارية. قمنا بتعريض تجميع الرقاقت المقلوبة لدينا رقمياً لأربع دورات حرارية معيارية تتوافق لتقييم مقاومتها للتوترات الحرارية (0-100°C، -40_125°C، -55_125°C، -65_150°C) مع معيار JEDEC.

لإجراء هذا التحليل بنجاح، استخدمنا محاكاة رقمية تعتمد على طريقة العناصر المحددة. قامت هذه المحاكاة بمساعدتنا في تحديد مواقع التوترات والتشوهات المتبقية التي تعانيها المكونات الدقيقة، مما سمح لنا بتحديد أية مشاكل محتملة فيما يتعلق بالاعتمادية.

لحساب Abaqus بالإضافة إلى النتائج التي تم الحصول عليها، كانت هذه الدراسة أيضاً فرصة لنا للتعرف على برنامج العناصر المحددة واكتساب فهم أساسي لسلوك المواد الميكانيكي في سياق الأشباه الموصلات.

Résumé

La fabrication des microélectroniques suit la trajectoire de la loi de Moore, ce qui implique une progression exponentielle dans ce domaine. Parmi les nombreux types de montages utilisés en microélectronique, le montage flip chip occupe une place centrale dans des applications telles que la téléphonie mobile.

Notre étude vise à analyser le comportement thermomécanique d'un montage flip chip en simulant un test de fiabilité accéléré, en particulier le cyclage thermique. Nous avons soumis numériquement notre montage flip chip à quatre cycles thermiques normalisés conformes à la norme JEDEC (0-100°C, -40_125°C, -55_125°C, -65_150°C) pour évaluer sa résistance aux contraintes thermiques.

Pour mener à bien cette analyse, nous avons utilisé des simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis. Ces simulations nous ont permis de localiser les contraintes et les déformations résiduelles subies par le microcomposant, nous permettant ainsi d'identifier d'éventuels problèmes de fiabilité.

En plus des résultats obtenus, cette étude a également été l'occasion de nous familiariser avec le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus et d'acquérir une compréhension fondamentale du comportement mécanique des matériaux dans le contexte de la microélectronique.

Abstract

The manufacturing of microelectronics follows the trajectory of Moore's Law, implying exponential progress in this field. Among the various types of assemblies used in microelectronics, the flip chip assembly holds a central role in applications such as mobile telephony.

Our study aims to analyze the thermomechanical behavior of a flip chip assembly by simulating an accelerated reliability test, specifically thermal cycling. We subjected our flip chip assembly to four standardized thermal cycles in accordance with the JEDEC standard (0-100°C, -40_125°C, -55_125°C, -60_150°C) to assess its resistance to thermal stresses.

To conduct this analysis, we employed numerical simulations based on the finite element method. These simulations allowed us to pinpoint the stresses and residual deformations experienced by the micro-component, enabling us to identify potential reliability issues.

In addition to the obtained results, this study also provided us with the opportunity to become acquainted with the finite element analysis software Abaqus and gain a fundamental understanding of material mechanical behavior in the context of microelectronics.

Table des matières

Remerciements	2
ملخص.....	3
<i>Résumé</i>	3
<i>Abstract</i>	4
Table des matières.....	5
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	8
Introduction générale.....	9
Chapitre I : Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service.....	10
I.1 Généralités sur les microcomposants électroniques.....	10
I.2 Domaine d'utilisation des microcomposants électroniques.....	11
I.3 Catégories des microcomposants électroniques.....	11
a. Technique filaire: Wire bonding.....	12
b. L'assemblage en TAB (Tape Automated Bonding).....	12
c. Le montage en puce retournée par microbilles de brasure « flip chip ».....	13
I.4 Assemblage des microcomposants électroniques de type Flip-Chip.....	13
I.5 Sollicitations thermomécanique subies par les microcomposants en service.....	14
A.Échauffement par effet Joule.....	14
B.Variations de températures du milieu extérieur.....	15
C.Les contraintes mécaniques provoquées par une variation de température.....	15
I.6 Estimation de la résistance thermomécanique des microcomposants électroniques : ..	17
I.7 Microcomposant de l'étude.....	18
I.8 Présentation des tests accélérés de cyclage thermique.....	18
I.9 Présentation de l'approche numérique de l'étude.....	19
I.10 Conclusion.....	20
Chapitre II : simulation numérique d'un essai de cyclage thermique sur des microcomposant électroniques sur un PCB normalisé.....	21
I.1 L'approche numérique.....	21
II.2 Logiciel de la simulation :.....	21
II.3 Géométrie.....	22
II.4 Contacts et interactions.....	24
II.5 Conditions aux limites et de chargement.....	25
II.6 Le maillage.....	27
II.7 Le mode de calcul.....	29
II.8 Matériaux.....	29

II.9 Résultats recherchés	30
Chapitre III : Résultats numériques, discussions et perspectives.....	31
III.1 Introduction	31
III.2 Effet de cycle thermique imposé et de l'épaisseur de la puce.....	31
III.2.1 Comparaisons qualitatives.....	31
– Les contraintes maximales dans le PCB	32
– Les contraintes maximales dans les plots de cuivre.....	33
– Les contraintes maximales dans les billes de brasure SAC.....	33
– Les contraintes maximales dans la couche intermétallique IMC.....	35
– Les contraintes maximales dans la couche diélectrique USG.....	36
– Les contraintes maximales dans la couche métallique AlCu	37
– Les contraintes maximales dans la puce en Si	38
– Les déformations plastiques dans les plots de cuivre.....	39
III.2.2 Comparaisons quantitatives.....	41
III.3 Conclusions et perspectives.....	46
Conclusion générale	48
Références bibliographiques	50

Liste des figures

Figure 1. Carte électronique comportant des composants et des microcomposants électroniques.....	11
Figure 2. Puce électronique (microcomposants).....	12
Figure 3. Les principales techniques d'interconnexion ; a) Technique filaire ; b) Le montage en puce retournée « flip chip par microbilles » ; c) L'assemblage en TAB.....	13
Figure 4. Exemple de billes de bresure pour assembler un microcomposant sur un circuit imprimé[4].....	14
Figure 5. Schématisation de la déformation thermomécanique d'un composant à matrice....	16
Figure 6. Profil type de température d'un test de cyclage thermique accéléré.....	19
Figure 7. Modèle géométrique de l'étude.....	22
Figure 8. Détection des surfaces en contact et attribution de type soudé (Tie-contact parfait).	25
Figure 9. Déclaration de la symétrie le long de l'axe x.....	26
Figure 10. Déclaration de la symétrie le long de l'axe y.....	26
Figure 11. Blocage de la face inférieure du PCB.....	26
Figure 12. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le PCB.....	32
Figure 13. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans les plots de cuivre..	33
Figure 14. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la brasure SAC.....	34
Figure 15. Zone de défaillance dans une bille de brasure après un cyclage thermique.....	35
Figure 16. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans l'intermétallique IMC.	36
Figure 17. Fissuration dans la couche intermétallique.....	36
Figure 18. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la passivation USG.	37
Figure 19. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la métallisation AlCu.	38
Figure 20. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le silicium.....	39
Figure 21. Répartition de la déformation plastique principale maximale dans les plots de cuivre.....	40
Figure 22. Répartition de la déformation plastique principale maximale dans la brasure SAC.	41
Figure 23. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-60^{\circ}\text{C}+150^{\circ}\text{C}$	42
Figure 24. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-55^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$	43
Figure 25. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-40^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$	43
Figure 26. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $0^{\circ}\text{C}+100^{\circ}\text{C}$	43
Figure 27. Evolution de la contrainte maximale équivalente dans la couche intermétallique en fonction de l'épaisseur de la puce pour les quatre chargements.....	44
Figure 28. Evolution de déformation plastique maximale en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-60^{\circ}\text{C}+150^{\circ}\text{C}$	45
Figure 29. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-55^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$	45
Figure 30. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-40^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$	45

Figure 31. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement 0°C+100°C..... 46
Figure 32. Evolution de la contrainte maximale équivalente dans la couche intermétallique en fonction de l'épaisseur de la puce pour les quatre chargements. 46

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du profil de chargement thermique..... 19
Tableau 2. Caractéristiques géométriques des éléments constituant l'assemblage. 23
Tableau 3. Maillage utilisé dans la simulation numérique par éléments finis. 27
Tableau 4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les simulations 29

Introduction générale

Les microcomposants électroniques sont soumis à des procédés de fabrication de plus en plus avancés, et l'assurance de leur fiabilité thermomécanique est devenue une étape critique dans leur développement. Cette nécessité découle de la contrainte de comprendre et de maîtriser les forces thermiques et mécaniques qui se manifestent pendant le fonctionnement de ces composants, afin d'éviter toute défaillance prématurée.

Avant de commercialiser de nouveaux produits, les fabricants doivent s'assurer de leur robustesse et de leur durabilité. Pour ce faire, ils utilisent des tests de fiabilité accélérés, qui sont conformes à des normes bien établies, telles que les normes JEDEC, qui sont reconnues dans l'industrie.

Notre étude se concentre spécifiquement sur l'analyse des contraintes thermomécaniques subies par un microcomposant de type flip chip. Pour réaliser cette analyse, nous avons opté pour une approche basée sur la simulation numérique, utilisant le logiciel Abaqus. Cette méthodologie nous permet de modéliser le comportement du composant en réponse aux variations de température auxquelles il est exposé. En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, notre travail comporte trois sections :

- La première section de notre travail est consacrée à une revue approfondie de la littérature existante sur les puces flip chip et leurs évolutions. Nous explorons les avancées et les développements récents dans ce domaine.
- La deuxième partie de notre étude se penche sur la méthodologie que nous avons suivie pour développer nos modèles numériques. Nous détaillons également les étapes de la modélisation numérique ; géométries, maillages, matériaux, contacts, conditions aux limites et de chargement ainsi que le type de calcul.
- Enfin, la troisième section est dédiée à la présentation des résultats que nous avons obtenus grâce à nos simulations numériques. Nous examinons ces résultats sous formes de comparaisons qualitatives et quantitatives pour en tirer des conclusions significatives.

En somme, notre recherche vise à apporter une compréhension approfondie des contraintes thermomécaniques des composants flip chip en utilisant des approches de pointe en simulation numérique, tout en s'appuyant sur une revue complète de la littérature et des normes de l'industrie pour garantir la qualité et la pertinence de notre analyse.

Chapitre I : Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service

I.1 Généralités sur les microcomposants électroniques

Jusqu'à la fin du XIXème siècle, les appareils utilisés pour le chauffage, l'éclairage, le téléphone et le télégraphe contenaient des circuits électriques simples et basiques. C'est avec l'invention de la radio et la nécessité d'amplifier les signaux que de nouveaux produits électroniques ont été inventés tel que les tubes à vide¹ qui entraient dans la fabrication des radios, téléviseurs, matériels de communication et même les premiers ordinateurs. Leur utilisation a duré jusqu'à la fin des années 1960. La découverte des transistors dans les années 50 a inauguré une nouvelle ère dans le monde de l'électronique[1].

L'industrie de la microélectronique s'appuie sur des techniques d'assemblage d'un réseau de transistors et autres composants complexes sur une seule puce mise en boîtier qu'on appelle package. La figure I.1 montre le premier multi composant développé par Jack Kilby en 1959 appelé circuit intégré « Integrated Circuit (IC) ». Il est composé de deux transistors et une résistance assemblés sur un seul support. Depuis, le nombre de transistors assemblés sur une seule puce (intégration) a continué d'augmenter tout en réduisant la taille de cette dernière. Cette course à la miniaturisation suit la loi empirique de Moore qui prévoit le doublement du nombre de composants intégrés dans une puce tous les deux ans[1].

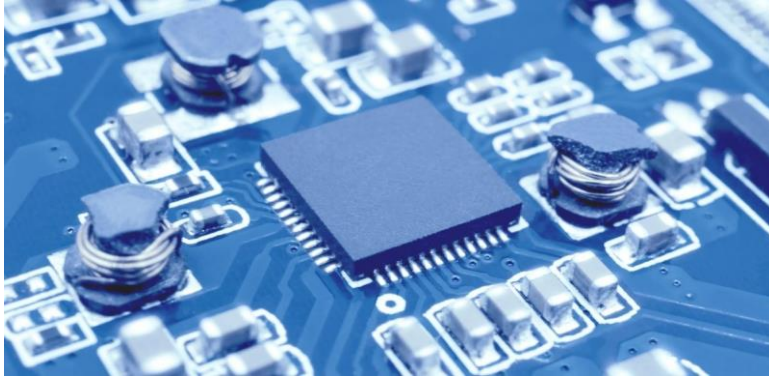


Figure 1. Carte électronique comportant des composants et des microcomposants électroniques¹.

I.2 Domaine d'utilisation des microcomposants électroniques

Les microcomposants électroniques sont actuellement employés dans divers domaines comme par exemple :

- l'électronique grand public;
- les télécommunications;
- les communications militaires;
- les ordinateurs et les périphériques;
- l'électronique industrielle;
- l'automobile ;
- l'agriculture ;
- l'électronique médicale.

I.3 Catégories des microcomposants électroniques

Les composants électroniques sont classés en plusieurs catégories dont les plus élémentaires sont les deux suivants :

- Les composants actifs qui ont la possibilité d'amplifier un signal et de produire l'énergie. Dans cette catégorie on trouve notamment les transistors et les circuits intégrés.
- Les composants passifs qui ne permettent pas d'amplifier les signaux mais qui sont utilisés comme régulateurs. Les résistances, les condensateurs et les inductances font

¹ Image internet/Libre accès

partie des composants passifs.

La présente étude est orientée vers les composants actifs et plus précisément puces électroniques appelées également des microcomposants électroniques. Ces composants de très faible taille réunissent plusieurs composants élémentaires dans un seul boîtier pour gagner en espace.

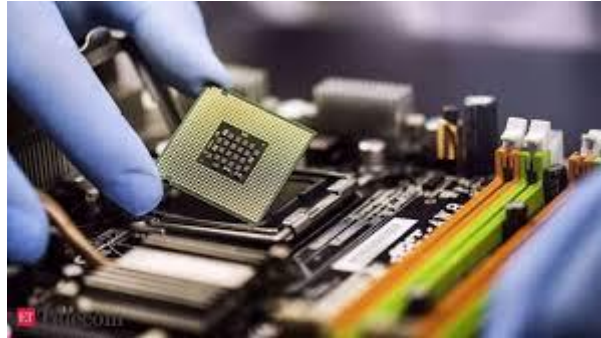


Figure 2. Puce électronique (microcomposants)².

Les puces électroniques sont assemblées sur les cartes mères appelées également circuits imprimés (PCB) par diverses techniques :

a. Technique filaire: Wire bonding

La technique filaire est caractérisée par le soudage des fils conducteurs entre les différents composants de la puce. Cette technique permet d'assurer la liaison électrique entre plusieurs puces. Les fils de câblage, souvent en or, platine, cuivre ou en aluminium, sont soudés par des techniques thermocompressive, thermosonique ou ultrasonique.

La principale limitation du soudage par fil est due à l'organisation des fils autour du composant. Ces connexions nécessitent un espace relativement important pour éviter les risques de court-circuit. En plus, la technique filaire utilisée pour relier un nombre important de composants représente une source de phénomènes électriques parasites[2].

b. L'assemblage en TAB (Tape Automated Bonding)

Cette technique consiste à reporter la puce sur un support souple métallisé. Le film est ensuite découpé afin de désolidariser des pistes contenant des points de connexions pour assurer le brasage ou le soudage avec le substrat. Cette technique permet d'assembler la puce d'une manière classique « montage TAB » ou en face retournée « montage FLIP-TAB »[2]

² Image internet/Libre accès

c. Le montage en puce retournée par microbilles de brasure « flip chip »

Développé pour la première fois en 1960 par la société IBM pour l'assemblage de circuits intégrés, le montage en « flip chip » est actuellement utilisé par la majorité des grandes sociétés spécialisées en microélectronique. Cette technique est basée sur l'utilisation d'une jonction par billes métalliques de faibles dimensions qui permet de diminuer les pertes, d'augmenter la compacité et la densité par rapport à la technique filaire. La puce est retournée de telle sorte que sa face active et ses billes d'interconnexion soient dirigées vers le substrat[1].

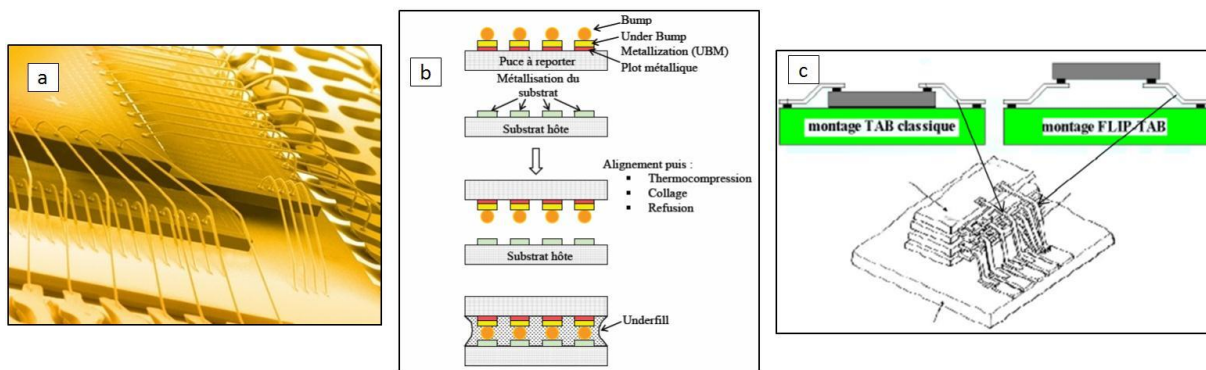


Figure 3. Les principales techniques d'interconnexion ; a) Technique filaire ; b) Le montage en puce retournée « flip chip par microbilles » ; c) L'assemblage en TAB.

I.4 Assemblage des microcomposants électroniques de type Flip-Chip

Dans le domaine des semi-conducteurs, la puce retournée (traduction de flip chip) est une des techniques utilisées pour effectuer les connexions électriques. La puce est retournée où les surfaces pour les soudures (ou contacts) doivent se trouver dans la même sens. La puce est donc bien retournée (par rapport au câblage par fil). Le terme « puce à bosses » est parfois employé, car sur les contacts, il y a des bille sou bosses pour la soudure au boîtier[3] .

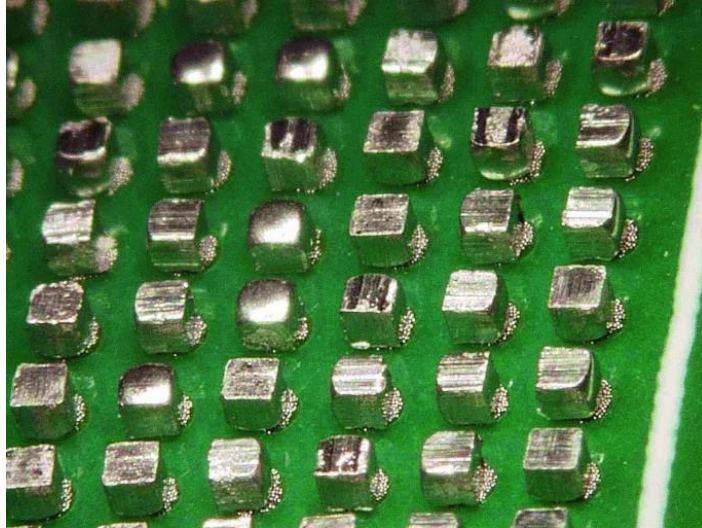


Figure 4. Exemple de billes de bresure pour assembler un microcomposant sur un circuit imprimé[4].

I.5 Sollicitations thermomécanique subies par les microcomposants en service

A. Échauffement par effet Joule

Les cycles thermiques de variation de puissance sont dus à la mise en marche, aux changements de régimes de puissance et à l'arrêt des équipements électriques. La chaleur est essentiellement générée par effet Joule des matériaux constituant les microcomposants. Les changements de température engendrés par les cycles thermiques entraînent la dilatation et la contraction des matériaux. Cela est dû à l'agitation (vibration) des atomes autour de leur position moyenne qui varie avec la température. Cette agitation devient de plus en plus forte avec l'augmentation de la température[3].

La dilatation et la contraction ne sont pas identiques entre les matériaux, ce qui a tendance à générer des contraintes entre les matériaux assemblés. Ces contraintes sont plus ou moins importantes. Lors de cycles de température, des contraintes sont générées et se relaxent de manière répétée dans les matériaux. Cette répétition entraîne la fatigue thermomécanique des matériaux assemblés et plus particulièrement de ceux qui sont ductiles et sensibles aux phénomènes de fluage. Dans certains cas, la géométrie des éléments assemblés, les caractéristiques d'épaisseur et les propriétés mécaniques des matériaux assemblés peuvent également entraîner des contraintes importantes dans les matériaux durs et fragiles, comme les céramiques. Ces contraintes provoquent la rupture de ces matériaux durs et fragiles et la défaillance du composant.

B. Variations de températures du milieu extérieur.

Un appareil en fonctionnement peut subir des fluctuations thermiques de sources internes et externes. L'effet Joule dû à un courant élevé à travers une interconnexion de soudure augmentera la température du composant lui-même ou des composants adjacents, ce qui provoquera des gradients de température abrupts pendant les transitoires marche-arrêt. Les entrées externes ajoutent des variations de température à la température du fonctionnement, telles que les cycles de jour et de nuit (production de chaleur due à une utilisation plus élevée ou à une moindre activité), ainsi que les cycles de température ambiante tels que les appareils portatifs ou de transport. L'hiver produit une fluctuation de température encore plus large[1].

En plus du cyclage thermique, les appareils électroniques subissent des forces ou des champs externes supplémentaires, notamment des contraintes mécaniques, des champs électriques, de la corrosion chimique et des contraintes thermomécaniques et élastiques thermomécaniques complexes induites par les fluctuations thermiques.

C. Les contraintes mécaniques provoquées par une variation de température

Les contraintes thermomécaniques sont le résultat de la présence de plusieurs matériaux de propriétés différentes notamment les coefficients de dilatation thermiques, collés entre eux et qui subissent une variation de température ΔT . Les différences entre les coefficients de dilatation thermiques des différents matériaux constituant le composant provoquent des déformations différentielles. Nous expliquons schématiquement le phénomène en simplifiant le composant en une puce en Si contenant des billes de brasure, le tout est monté sur un PCB (Figure 5). À la température de référence, les trois constituants de l'assemblage ne présentent aucune dilatation ou contraction, les contraintes et les déformations thermiques sont alors nulles. Durant le chauffage, les éléments commencent à se dilater d'une manière inégale. La dilatation est plus importante dans les billes de brasure et dans le cuivre du PCB que dans le silicium. Ce dernier élément limite l'expansion des billes de brasure en provoquant ainsi de fortes contraintes thermiques. Durant le refroidissement, la situation s'inverse, la rétraction des billes est bridée par la faible rétraction du silicium en provoquant des contraintes thermiques en sens opposé. La multiplication des cycles de températures conduit à des sollicitations cycliques conduisant à la rupture par fatigue des interconnexions[1].

La déformation thermique est donnée par :

$$\underline{\varepsilon}^{th} = \alpha(T) \cdot (T - T_{ref}) \cdot \underline{I} \quad (1)$$

Avec : α est le coefficient de dilatation thermique, T_{ref} représente la température de référence à laquelle la dilatation thermique est nulle, et I la matrice unité.

Les billes de brasure ne subissent pas le même niveau de déformation. Le niveau de déformation dépend de la distance qui sépare la bille de la ligne neutre (figure 5). La déformation de cisaillement due à la variation de température d'une bille située à une distance L de la ligne neutre (ligne médiane) s'écrit [1]:

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L}{h} (\Delta\alpha \cdot \Delta T) \quad (2)$$

ΔL représente la différence de déplacement, $\Delta\alpha$ représente la différence des coefficients de dilatations, ΔT est la différence de température et h représente la hauteur de la bille de brasure.

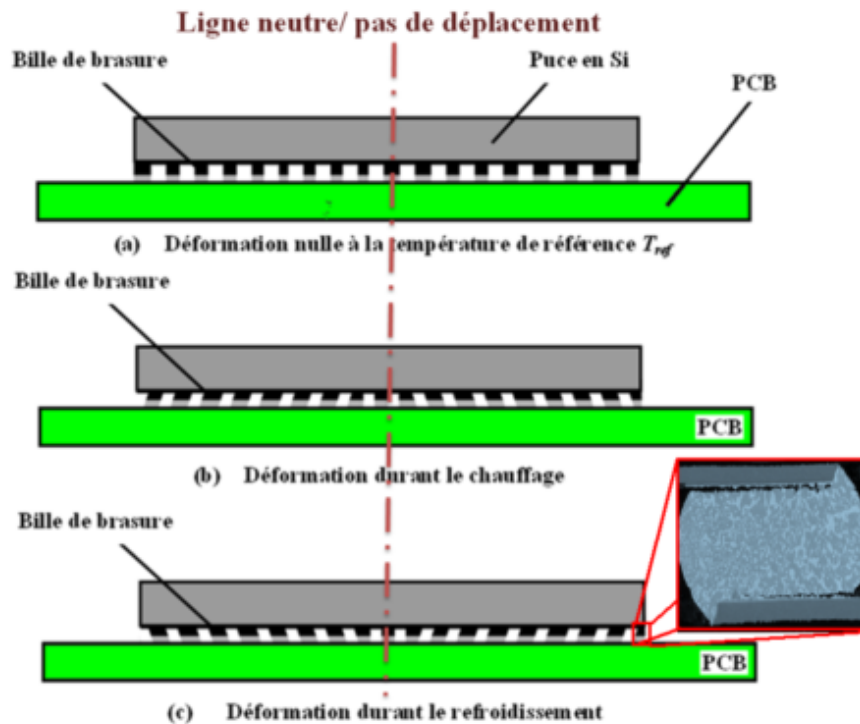


Figure 5. Schématisation de la déformation thermomécanique d'un composant à matrice[5].

I.6 Estimation de la résistance thermomécanique des microcomposants électroniques :

L'estimation de la résistance thermomécanique des microcomposants électroniques est une démarche cruciale dans le domaine de l'électronique. Cette estimation vise à évaluer la capacité d'un microcomposant électronique à résister aux contraintes thermiques et mécaniques auxquelles il peut être soumis pendant son fonctionnement. Voici quelques points clés à considérer dans cette estimation [6]:

Analyse des caractéristiques du composant : Il est essentiel de comprendre les caractéristiques du microcomposant, telles que sa taille, sa forme, sa structure interne, et les matériaux utilisés. Ces informations sont cruciales pour prédire son comportement thermomécanique.

Modélisation numérique : La modélisation numérique est utilisée pour simuler les contraintes thermiques et mécaniques sur le composant. Des logiciels de simulation, tels que des logiciels de calcul par éléments finis (FEA), permettent de modéliser ces contraintes et de prédire la réponse du composant.

Facteurs environnementaux : Il est important de prendre en compte les conditions environnementales dans lesquelles le composant sera utilisé. Cela inclut la plage de températures, les vibrations, les chocs, etc.

Normes et standards : Les normes de l'industrie, telles que celles évoquées précédemment (IEC, MIL-STD, JEDEC, AEC), définissent souvent les critères de résistance thermomécanique que les composants doivent respecter. Il est important de se conformer à ces normes pour garantir la fiabilité du composant.

Essais physiques : En plus de la modélisation numérique, des essais physiques peuvent être effectués pour évaluer la résistance thermomécanique. Cela peut inclure des tests de température cyclique, des tests de vibration, des tests de choc thermique, etc.

Analyse des défaillances : En cas de défaillance d'un composant, une analyse détaillée

des défaillances peut être effectuée pour comprendre les causes sous-jacentes et améliorer la conception future.

En résumé, l'estimation de la résistance thermomécanique des microcomposants électroniques repose sur une combinaison d'analyse des caractéristiques du composant, de modélisation numérique, de prise en compte des conditions environnementales, de conformité aux normes de l'industrie, d'essais physiques, et d'analyse des défaillances pour garantir la fiabilité et la durabilité des composants dans diverses applications électroniques.

I.7 Microcomposant de l'étude

Le microcomposant de l'étude est une puce retournée assemblée sur un circuit imprimé par l'intermédiaire de 49 billes de brasure. Le microcomposant est constitué d'un empilement de couches minces conductrices et diélectriques. Les éléments constituant le microcomposant sont donnés avec plus de détails dans le deuxième chapitre. L'assemblage subit un échauffement représentant une partie des cycles thermiques imposés par la norme JEDEC[7].

I.8 Présentation des tests accélérés de cyclage thermique

Le profil de température utilisé dans la présente étude correspond à la norme JEDEC, couramment utilisée par l'industrie pour effectuer des études de fiabilité des joints de soudure.

Le profil de température a un effet important sur la déformation du joint de soudure, car le comportement de la soudure dépend du taux de chargement. Le choix du profil de température affecte de manière significative la fiabilité des billes de soudure.

Il existe plusieurs façons d'imposer des fluctuations de température sur les interconnexions des composants et des soudures, y compris les systèmes de cycles de température à une, deux ou trois chambres. Le plus simple est le cyclage à chambre unique, où les plaques d'essai sont placées dans une chambre fixe et sont chauffées ou refroidies en introduisant de l'air chaud ou froid dans la chambre.

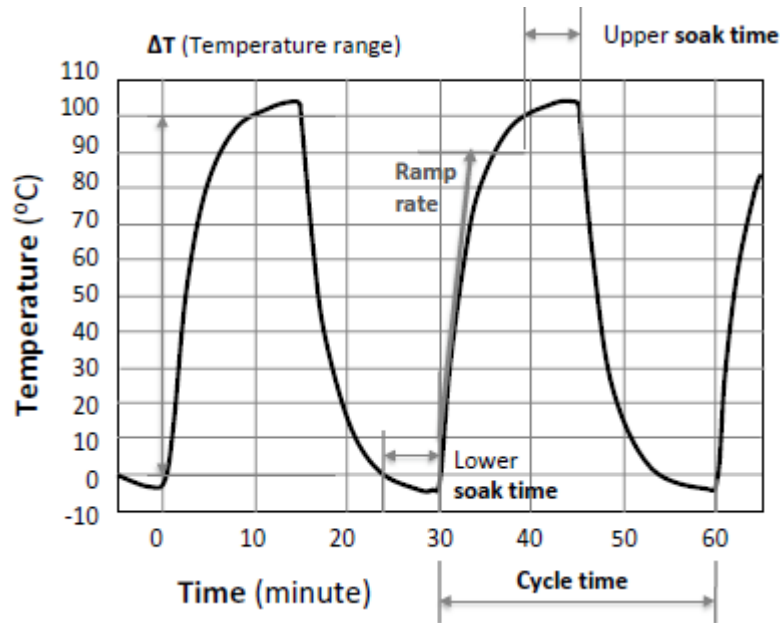


Figure 6. Profil type de température d'un test de cyclage thermique accéléré[7].

Les caractéristiques des cycles de températures sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Caractéristiques du profil de chargement thermique[7].

Test condition	Nominal T_s (min) with tolerance (°C)	Nominal T_s (min) with tolerance (°C)	ΔT (°C)
A	-55 (+0, -10)	+85 (+10, 0)	140
B	-55 (+0, -10)	+125 (+15, 0)	170
C	-65 (+0, -10)	+150 (+15, 0)	215
G	-40 (+0, -10)	+125 (+15, 0)	165
H	-55 (+0, -10)	+150 (+15, 0)	205
I	-40 (+0, -10)	+115 (+15, 0)	155
J	0 (+0, -10)	+100 (+15, 0)	100
K	0 (+0, -10)	+125 (+15, 0)	125
L	-55 (+0, -10)	+110 (+15, 0)	165
M	-40 (+0, -10)	+150 (+15, 0)	190
N	-40 (+0, -10)	+85 (+10, 0)	125

Dans la présente étude, et dans une logique de gain de temps, nous avons choisis 4 cycles pour nos simulations. Il s'agit des cycles B, C, G et J.

I.9 Présentation de l'approche numérique de l'étude.

La méthode des éléments finis a été choisie pour étudier l'impact du cycle de température imposé sur la réponse thermomécanique d'un composant de type flip chip assemblé une un

circuit imprimé. Le logiciel Abaqus est utilisé pour mener les calculs numériques. Le deuxième chapitre donne plus de détails sur les modèles numériques développés.

I.10 Conclusion

Les variations de température en service provoquent des contraintes thermomécaniques dans les microcomposants électroniques. Ces contraintes doivent être évaluées afin de s'assurer qu'elles ne représentent pas d'effets négatifs sur la tenue mécanique des composants sur les cartes électroniques. La simulation numérique par éléments finis est présentée comme étant une solution prometteuse permettant de fournir première estimation de la résistance mécanique des microcomposants avant le lancement de la fabrication réelle. Nous avons utilisé cette approche pour étudier l'impact des chargements thermiques sur la résistance mécaniques des microcomposants. Les deux chapitres suivants donnent une présentation détaillée de l'approche numérique développée ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre II : simulation numérique d'un essai de cyclage thermique sur des microcomposant électroniques sur un PCB normalisé

I.1 L'approche numérique

Ce chapitre sera consacré à la présentation de nos modèles éléments finis visant à étudier la réponse mécanique d'un assemblage microcomposant électronique/PCB sollicité thermiquement. Les différentes étapes de la modélisation y sont présentées (géométrie, matériaux, maillages, conditions de contact, conditions aux limites ainsi que les résultats attendus).

II.2 Logiciel de la simulation :

Le code de calcul par éléments finis Abaqus a été employé pour mener le travail numérique.

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

ABAQUS est un logiciel de calcul éléments finis développé, qui se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.

Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.

ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts[8].

II.3 Géométrie

Nous avons modélisé la géométrie de la puce retournée assemblée sur le PCB en utilisant ABAQUS. Le modèle géométrique comporte un microcomposant de $3 \times 3 \times 0.4 \text{ mm}^3$ placé sur un circuit imprimé de grande taille. Notons que trois épaisseurs de puces ont été modélisées à savoir, 0.4, 0.3 et 0.2 mm. La structure étant symétrique, seul le quart de l'assemblage (microcomposant/circuit imprimé) est modélisé.

La figure 7 montre le quart de l'assemblage représentant le modèle géométrique.

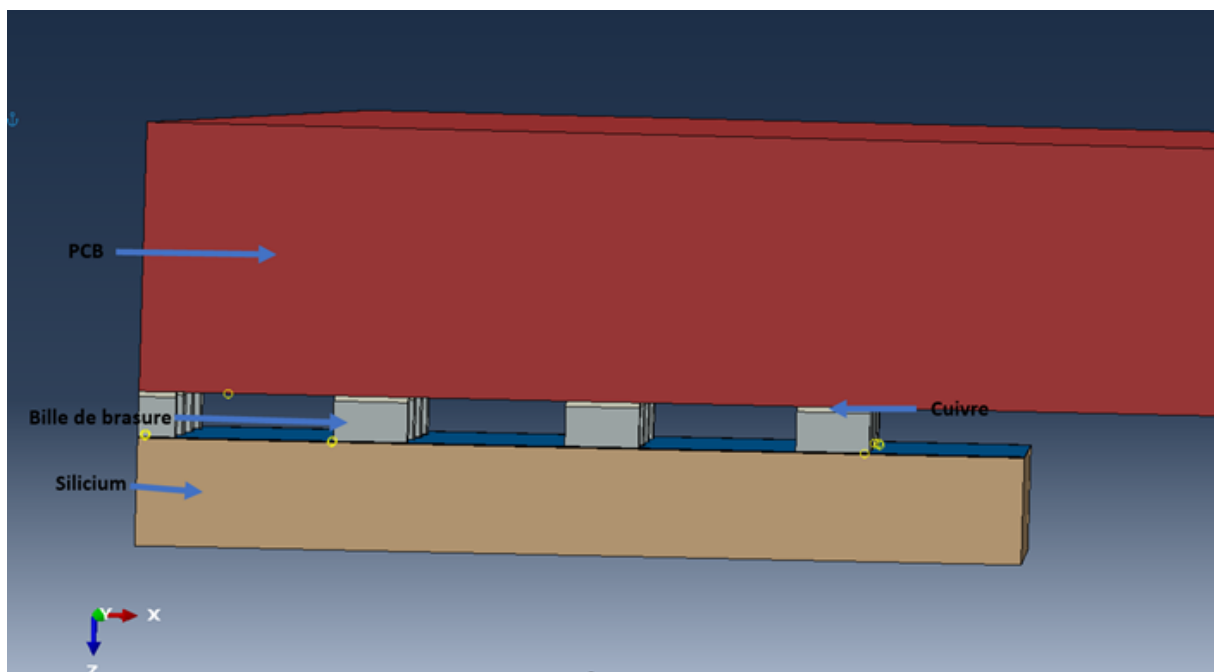
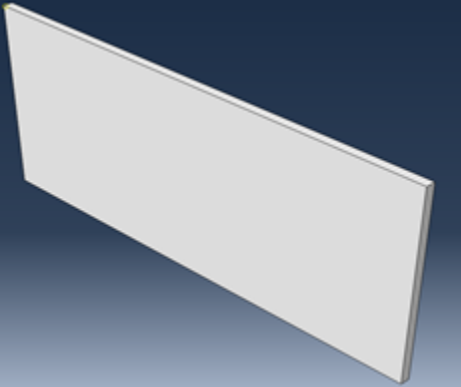
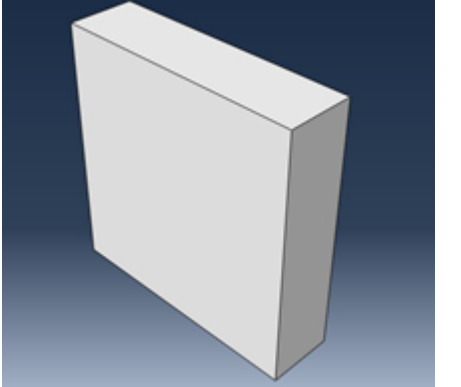
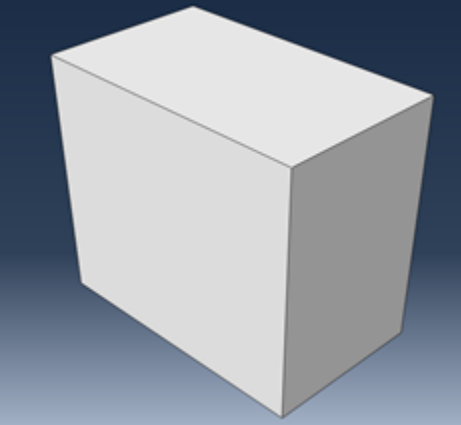
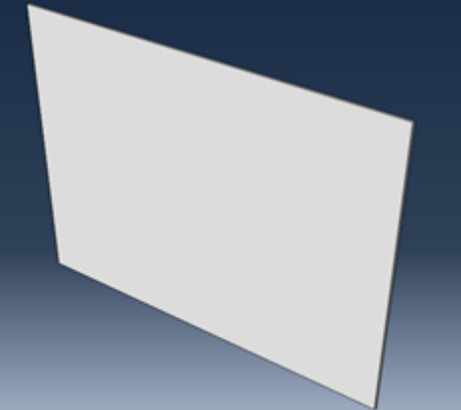
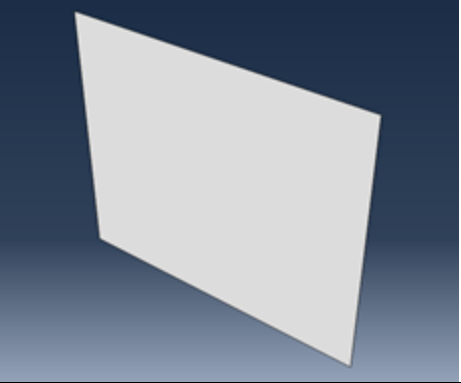
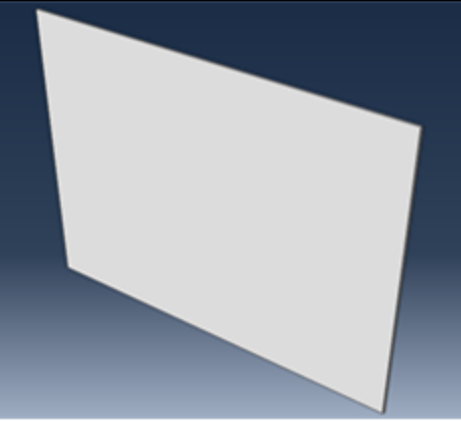
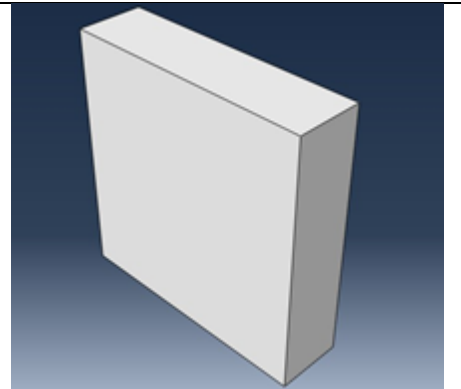


Figure 7. Modèle géométrique de l'étude.

Les détails géométriques des éléments constituant la structure sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Caractéristiques géométriques des éléments constituant l'assemblage.

Elément	Géométrie	Dimensions
PCB		<p>¼ du circuit imprimé (PCB) : Longueur = 24mm Largeur=50.5mm Epaisseur=1mm</p>
Plots de cuivre		<p>Epaisseur= 0.02 mm longueur=0.250 mm Largeur =0.250 mm</p>
Brasure SAC		<p>Hauteur =0.148 mm longueur=0.260 mm Largeur =0.260 mm</p>
Intermétallique IMC		<p>Epaisseur= 0.001mm longueur=0.260 mm Largeur =0.260 mm</p>

Passivation USG		Hauteur=3mm Largeur= 3 mm Epaisseur=0.003 m
Métallisation AlCu		Epaisseur= 0.0015mm longueur=0.260 mm Largeur =0.260 mm
Silicium Si		Longueur=3 mm Largeur= 3 mm Epaisseur= 0.4 mm (trois épaisseurs sont étudiées , 0.4, 0.3 et 0.2mm)

II.4 Contacts et interactions

Une recherche automatique des surfaces en contact a été effectuée sur abaqus. Les 132 surfaces en contact trouvées ont été déclarées avec un contact type parfait (TIE)

La figure 8 montre les surfaces en contact déterminées par le logiciel.

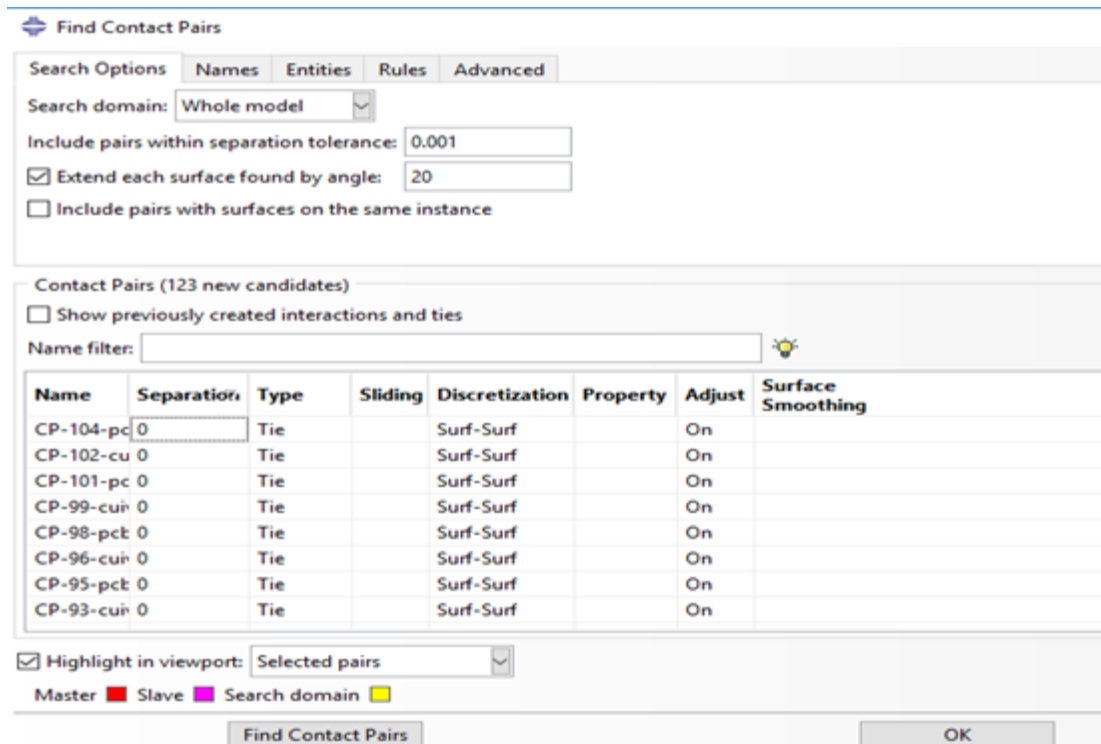


Figure 8. Detection des surfaces en contact et attribution de type soudé (Tie-contact parfait).

II.5 Conditions aux limites et de chargement

Les conditions aux limites se résument à :

- La déclaration des deux plans de symétrie (modélisation du quart de la structure).
- Le PCB est bloqué en déplacement sur sa face libre (PCB posé sur la table du four lors d'un test réel).

Les figures 9 et 10 montrent la déclaration des conditions de symétrie tandis que la figure 11 illustre l'encastrement du PCB.

Pour le chargement, un échauffement est imposé d'une température minimale vers une température maximale. Notons qu'à tout instant t la température est identique dans toute la structure. Les cycles d'échauffement imposés sont :

- $-60^{\circ}\text{C}+150^{\circ}\text{C}$
- $-55^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$
- $-40^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$
- $0^{\circ}\text{C}+100^{\circ}\text{C}$

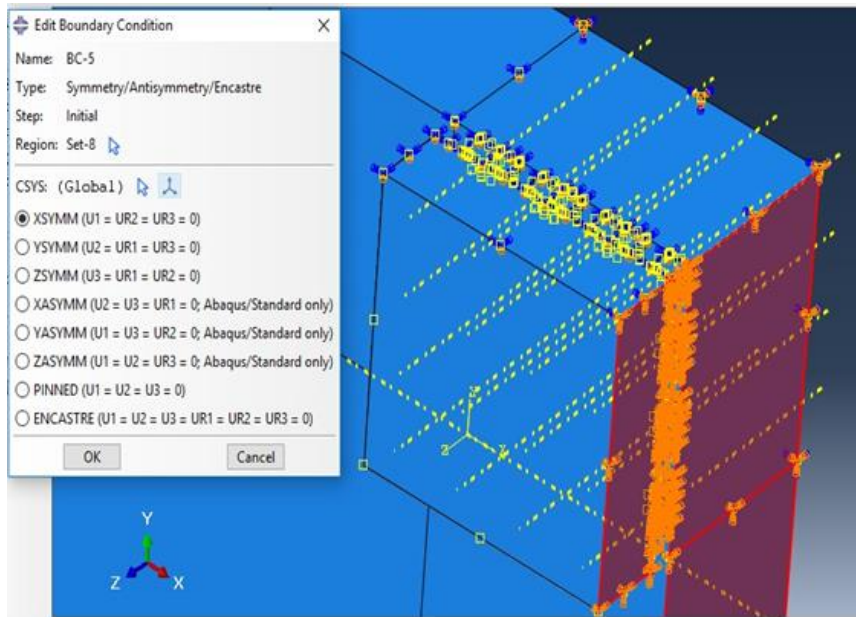


Figure 9. Déclaration de la symétrie le long de l'axe x.

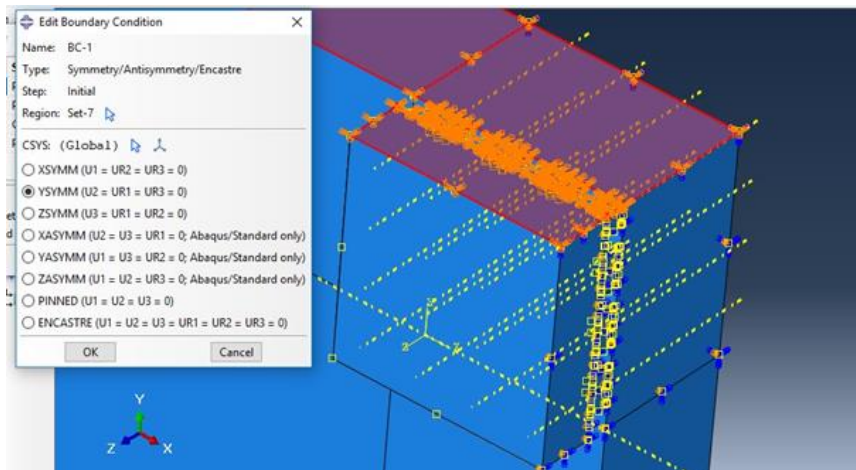


Figure 10. Déclaration de la symétrie le long de l'axe y.

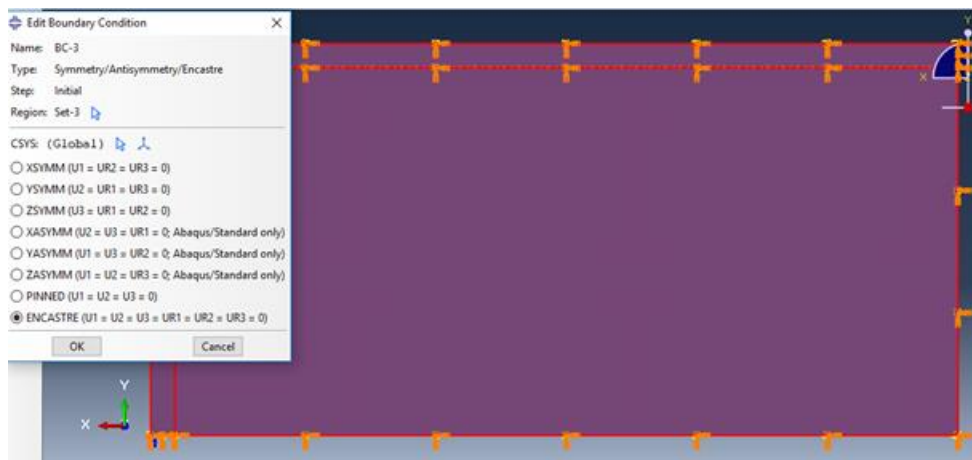
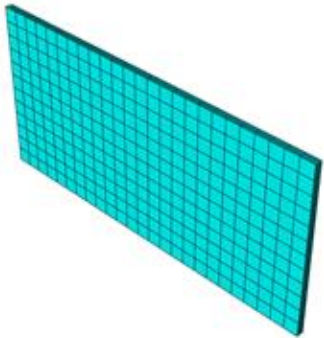
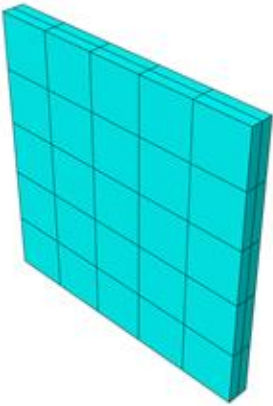
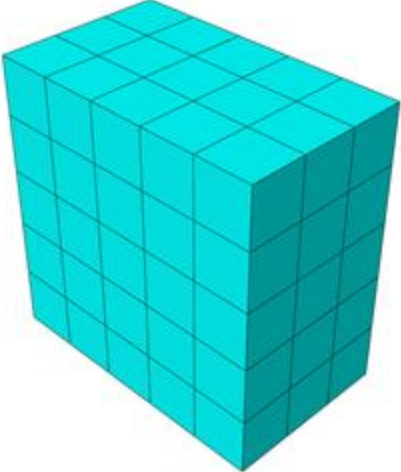


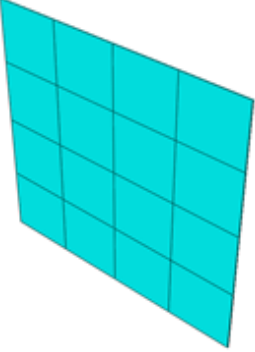
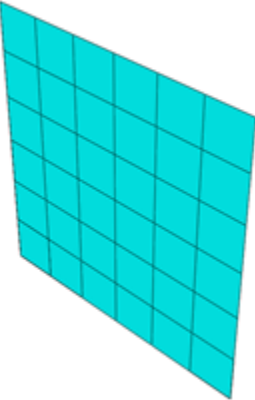
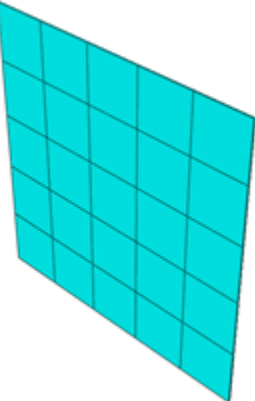
Figure 11. Blocage de la face inférieure du PCB.

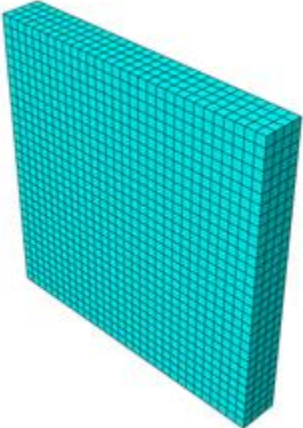
II.6 Le maillage

Un maillage structuré avec des éléments quadratiques a été employé pour discrétiser l'assemblage. Le tableau 3 montre le maillage des éléments formant l'assemblage.

Tableau 3. Maillage utilisé dans la simulation numérique par éléments finis.

Elément	Maillage	Caractéristiques
PCB		Nombre des éléments :1500 Type : C3D8T
Plots de cuivre		Nombre des éléments :50 Type : C3D8T
Brasure SAC		Nombre des éléments :75 Type ; C3D8T

<p>Intermétallique IMC</p>		<p>Nombre des éléments :48 Type ;C3D8T</p>
<p>Passivation USG</p>		<p>Nombre des éléments :108 Type :C3D8T</p>
<p>Métallisation AlCu</p>		<p>Nombre des éléments :75 Type ;C3D8T</p>

Silicium Si		Nombre des éléments :3600 Type :C3D8T
-------------	---	--

II.7 Le mode de calcul

Abaqus offre plusieurs possibilités pour calculer un problème thermomécanique comme par exemple l'utilisation d'un calcul couplé (température/déplacement), un calcul découplé, un couplage fort, un couplage faible, un calcul stationnaire, transitoire...

Pour des raisons évidentes de recherche de simplicité imposées par nos moyens informatiques, nous avons fait de choix de mener nos calculs en statique.

II.8 Matériaux

Les principales propriétés des matériaux introduites dans les simulations sont résumées sur le tableau 4. Le SAC est un matériau de brasure couramment employé en électronique pour remplacer l'alliage classique étain-plomb. Ainsi le SAC105 est constitué de 98% d'étain (Sn) de 1% d'argent (Ag) et de 0,5% de cuivre.

Tableau 4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés dans les simulations[9].

Matériaux	Module de Young [GPa]	Coefficient de Poisson	Comportement Plastique	
			Contrainte [MPa]	Déformation plastique
PCB	20	0.28		
Cuivre	110	0.34	33	0
			210	0.6
SAC105	45	0.3	15	0
			25	0.006
			29	0.019

			30	0.052
Si	131	0.3		
IMC	92	0.33		
AlCu	71	0.33	280	0

II.9 Résultats recherchés

L'étude numérique de la présente étude consiste à étudier la réponse mécanique d'un assemblage microcomposant/PCB soumis à un chargement thermique. Quatre chargements ont été choisis pour l'étude et trois épaisseur des puce ce qui fait 12 modèles à lancer. Les résultats sont présentés sous formes de comparaisons qualitatives et quantitatives. Nous avons choisi les contraintes équivalentes de Von Mises et les déformations plastiques principales comme des grandeurs de comparaisons. Donc, pour chacun de nos 12 modèles, les contraintes et les déformations sont calculées pour chacun des éléments (PCB, Cu, SAC, IMC, USG, AlCu et Si).

Chapitre III : Résultats numériques, discussions et perspectives

III.1 Introduction

La présente partie de l'étude concerne la présentation des résultats numériques obtenus avec analyses et interprétations. Il est à rappeler que notre étude concerne la réponse thermomécanique d'un microcomposant électronique de type « puce-retournée » (Flip-Chip en Anglais) assemblé sur un circuit imprimé PCB (couramment appelé carte électronique ou carte mère). La réponse thermomécanique est le résultat d'un chargement thermique reproduisant les conditions de fonctionnement. Ainsi, on trouve des chargements thermiques allant de -55 C° à 125 C° ; de 0 à 100 C° ; de -40 C° à 125 C° et de -60 C° à 150 C° . Ces conditions de chargement préconisées par les standards internationaux comme JEDEC reproduisent les conditions réelles de fonctionnement. A titre d'exemple, un avion au sol dans le désert Algérien se trouve durant l'été à une température de 60 C° . Une fois dans les cieux, la température peut descendre jusqu'au -50 C° . A ces conditions de fonctionnement externes il ne faut pas oublier les conditions thermiques générées par le composant lui-même. En effet, durant le fonctionnement, les composants électroniques chauffent et participent à l'augmentation de la température. Il est à noter que les températures maximales ne peuvent en aucun cas dépasser les 150 C° car au-delà de cette valeur le matériau de la brasure risque de se fondre provoquant ainsi le détachement des microcomposants de la carte électronique. En plus des conditions thermiques imposées, l'effet de l'épaisseur de la puce de silicium a été étudié afin de déterminer l'impact de la miniaturisation sur la tenue thermomécanique des microcomposants électroniques.

Dans une logique de simplifications des approches numériques, nous avons choisi de mener des comparaisons entre les résultats numériques pour étudier l'impact des cycles thermiques imposés sur la réponse thermomécanique du composant. Les contraintes équivalentes maximales et les déformations plastiques principales maximales ont été choisies pour mener les comparaisons. Pour plus de visibilité, le choix d'une comparaison à deux temps a été adopté avec une comparaison qualitative sous forme d'images donnant la répartition des contraintes et des déformations des différentes configurations et une comparaison quantitative sous formes de courbes donnant l'évolution des contraintes et des déformations en fonction du cycle imposé et de l'épaisseur de la puce.

III.2 Effet de cycle thermique imposé et de l'épaisseur de la puce

III.2.1 Comparaisons qualitatives

Dans cette partie, les répartitions des contraintes équivalentes de Von Mises ainsi que les déformations plastiques principales maximales sont présentées. Les comparaisons qualitatives sont présentées sous formes d'iso-contours de contraintes et de déformations

maximales afin d'étudier l'effet du chargement thermique et de l'épaisseur de la puces sur les zones à forte concentration de contraintes et de déformation.

Les comparaisons sont données pour chacun des éléments constituant l'assemblage à savoir le circuit imprimé PCB, les plots de cuivre Cu, les billes de brasure SAC, couche intermétallique IMC, la passivation USG, la couche conductrice AlCu et le silicium.

– **Les contraintes maximales dans le PCB**

La figure 12 montre la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises dans le PCB pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. On observe que la zone de forte concentration de contrainte est la même pour les différents cas. On peut en conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes.

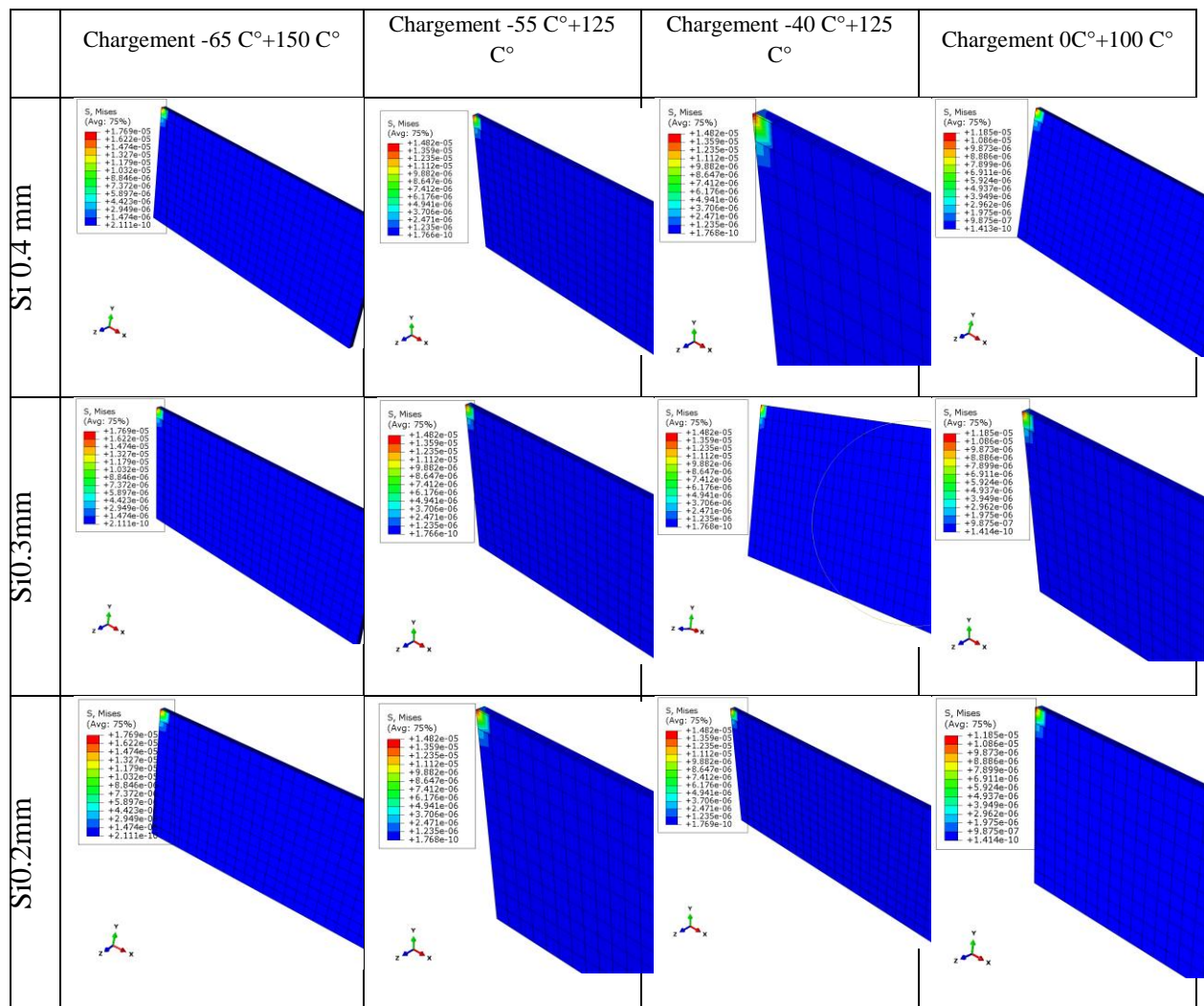


Figure 12. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le PCB.

– **Les contraintes maximales dans les plots de cuivre**

La figure 13 montre la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises dans les plots de cuivres pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. Les résultats obtenus montrent une forte concentration de contrainte sur la face en contact avec les billes de brasure pour les différents cas ce qui permet de conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes dans les plots de cuivre.

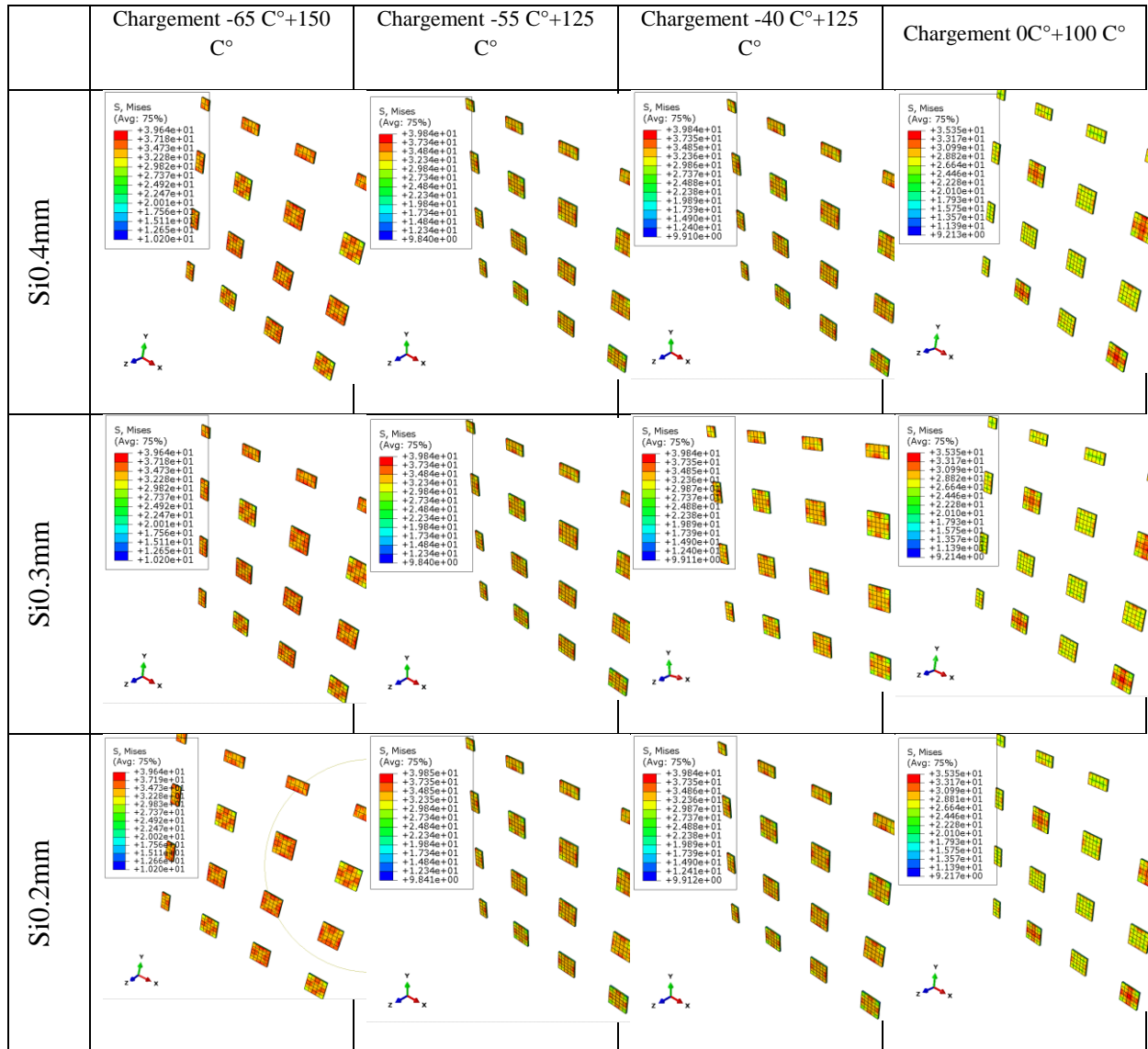


Figure 13. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans les plots de cuivre.

– **Les contraintes maximales dans les billes de brasure SAC**

La figure 14 montre la répartition de la contrainte équivalente maximale de Von Mises dans la brasure pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. On observe que la zone de forte concentration de contraintes se situe sur la brasure du coin de la puce.

Cette remarque est identique quel que soit le chargement appliqué ou l'épaisseur considérée. Les résultats obtenus sont validés par l'expérimentation qui montre clairement que les zones de défaillances sont souvent observées au niveau de brasure[10] (figure 15). On conclue que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes dans la brasure.

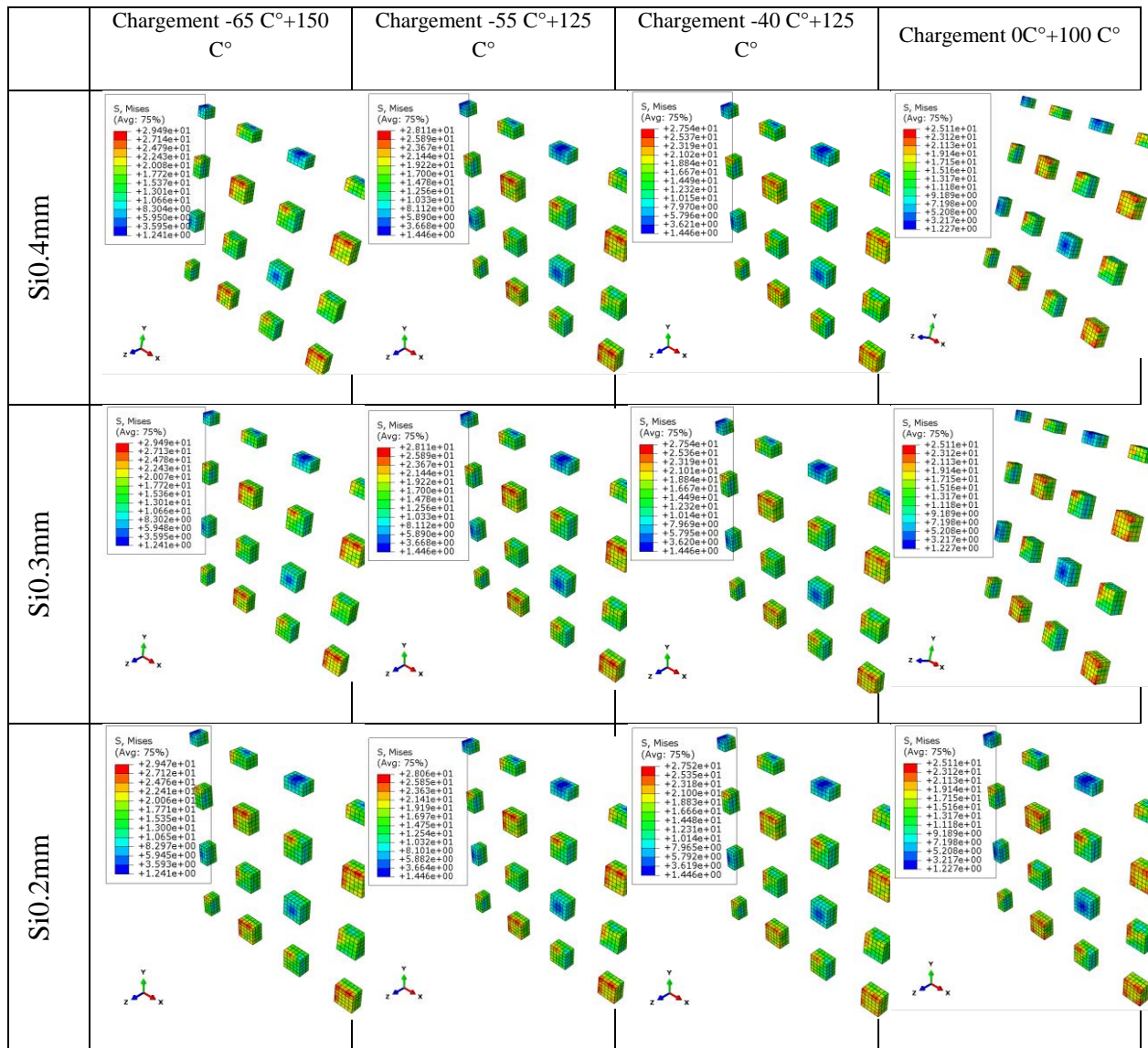


Figure 14. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la brasure SAC.

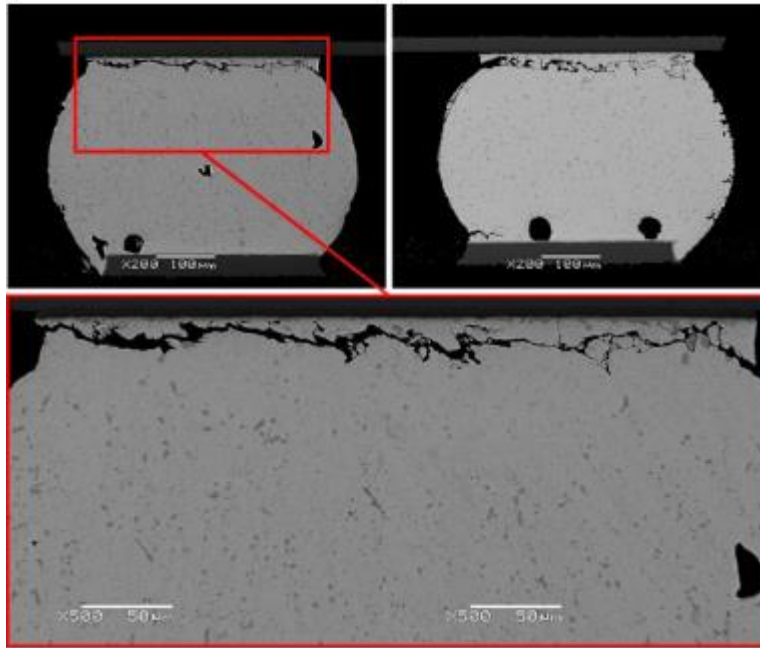
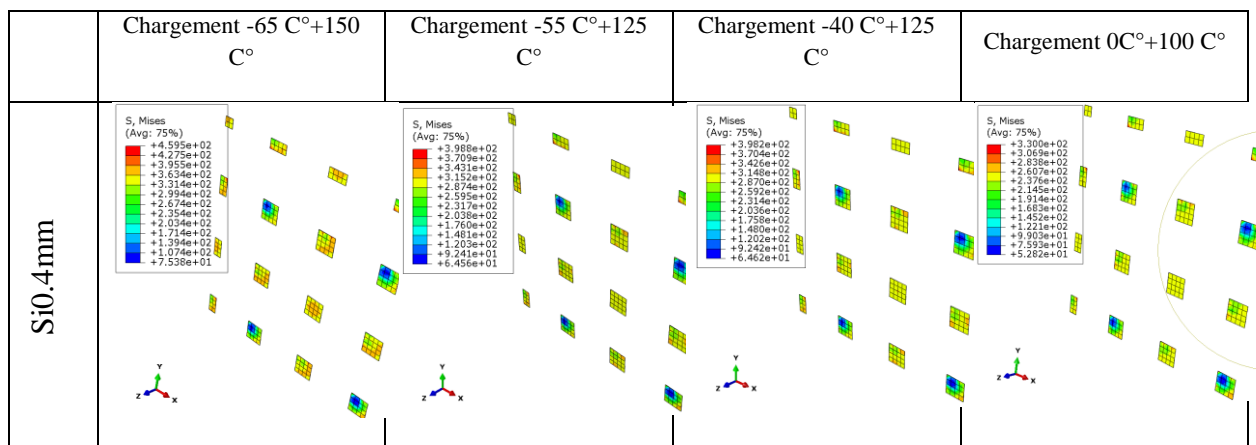


Figure 15. Zone de défaillance dans une bille de brasure après un cyclage thermique[10].

– **Les contraintes maximales dans la couche intermétallique IMC**

La répartition de la contrainte équivalente de Von Mises dans la couche intermétallique IMC pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce est donnée par la figure 16. On observe que la zone de forte concentration de contrainte est la même pour les différents cas. L'expérimentation montre un grand risque de rupture dans cette zone pour des composants soumis à un cyclage thermique[11] comme le montre la figure 17. On peut en conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes.



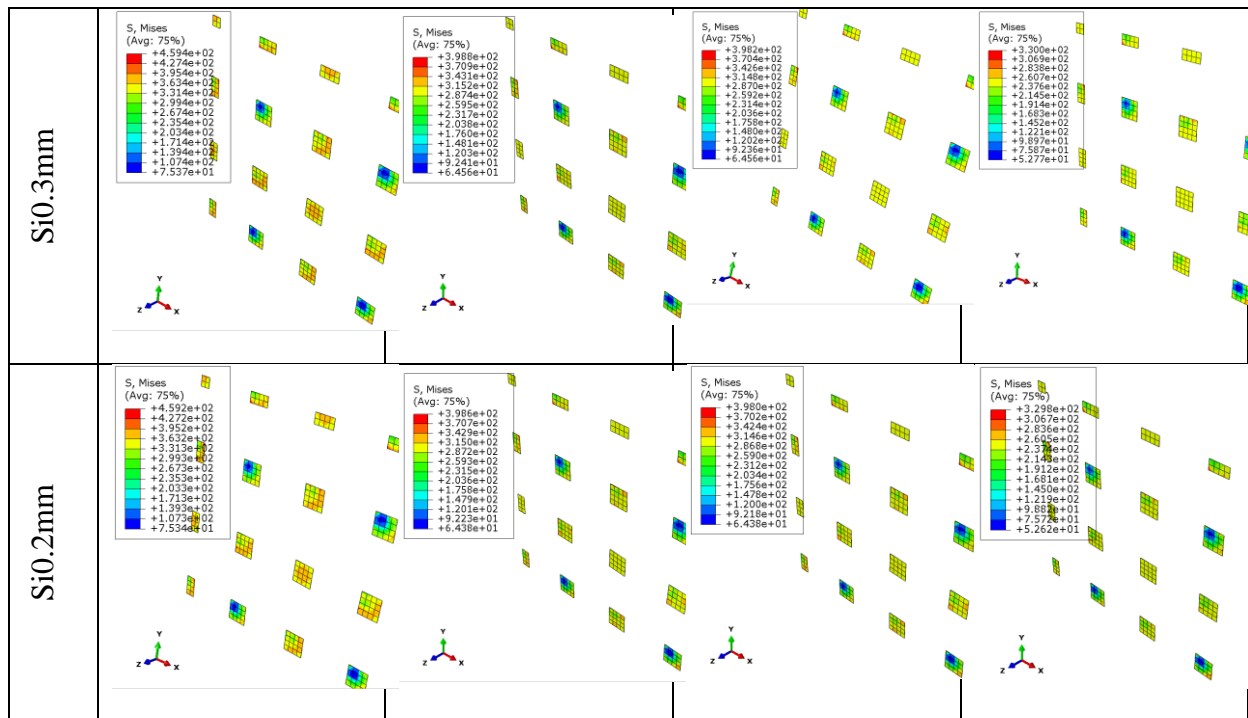


Figure 16. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans l'intermétallique IMC.

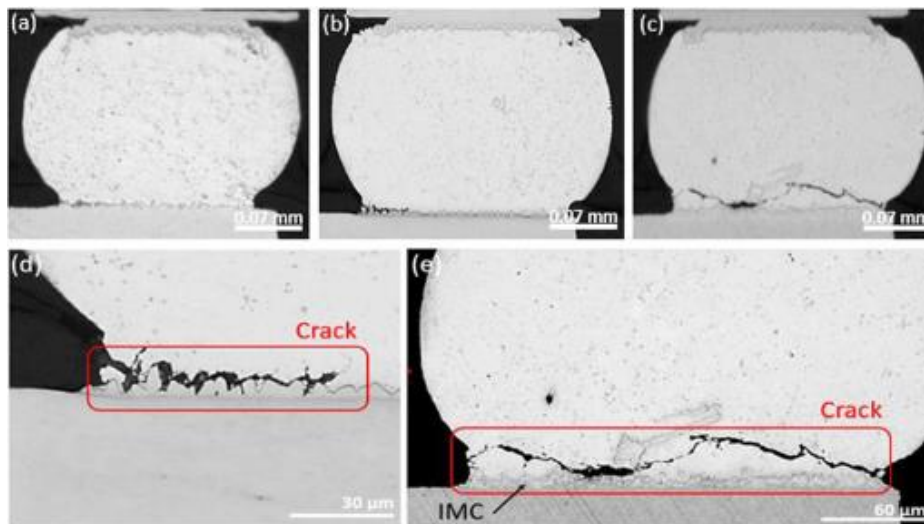


Figure 17. Fissuration dans la couche intermétallique[11].

– Les contraintes maximales dans la couche diélectrique USG

La couche de passivation présente une zone de forte concentration de contrainte dans la zone la plus proche de la brasure la plus sollicitée (celle se trouvant au coin du microcomposant) (figure 18). Cette zone de forte concentration de contrainte demeure inchangée quel que soit le chargement appliqué et l'épaisseur considérée. L'effet de chargement thermique et de l'épaisseur sur les zones à forte concentration de contrainte est négligeable.

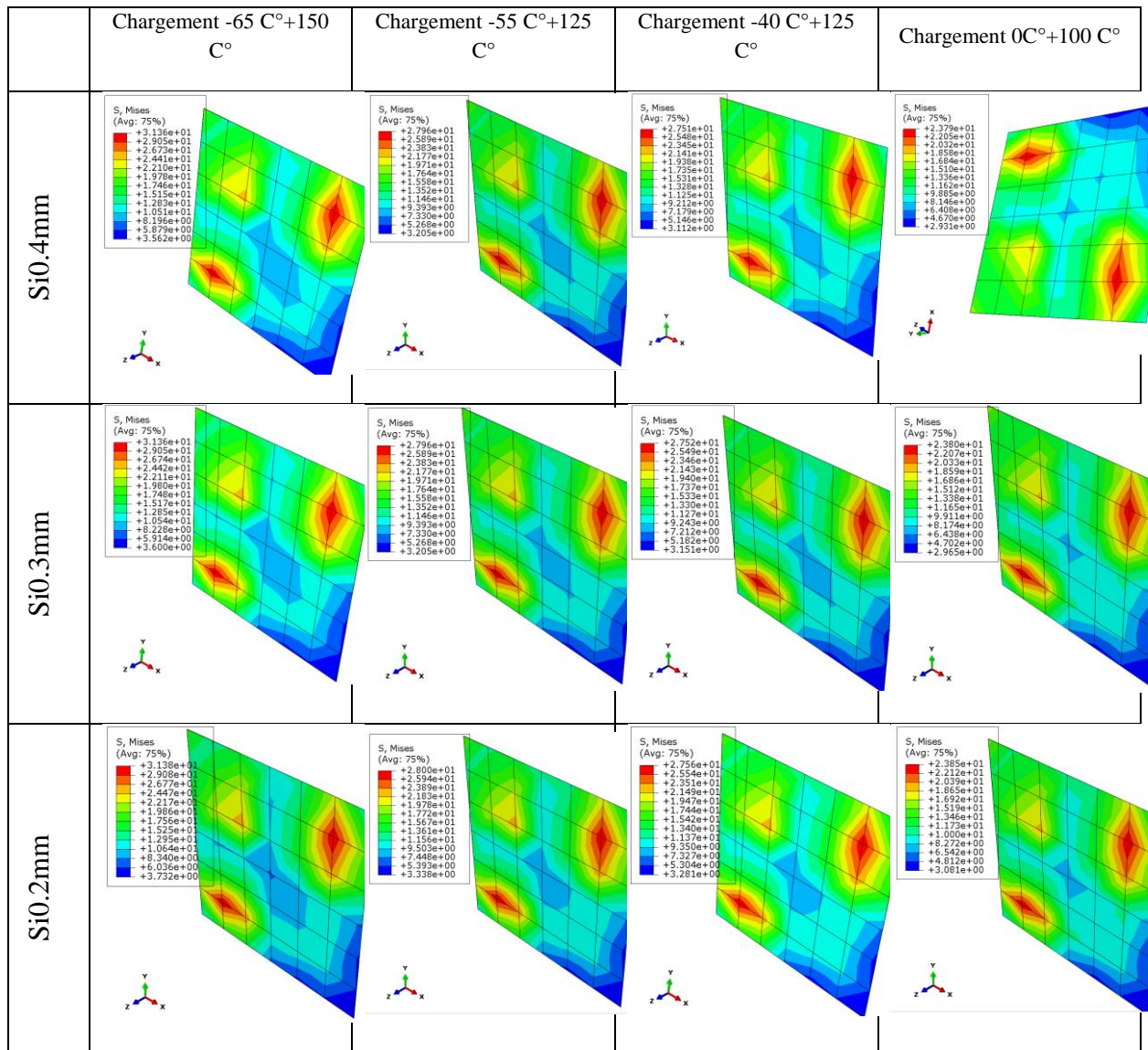


Figure 18. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la passivation USG.

– Les contraintes maximales dans la couche métallique AlCu

Les fortes valeurs des contraintes maximales de Von Mises dans la couche métallique AlCu sont les mêmes quel que soit l'épaisseur de la puce (figure 19). En revanche, une légère variation de ces zones est observée pour le cycle 0°C+100°C. L'impact de l'épaisseur est donc très faible.

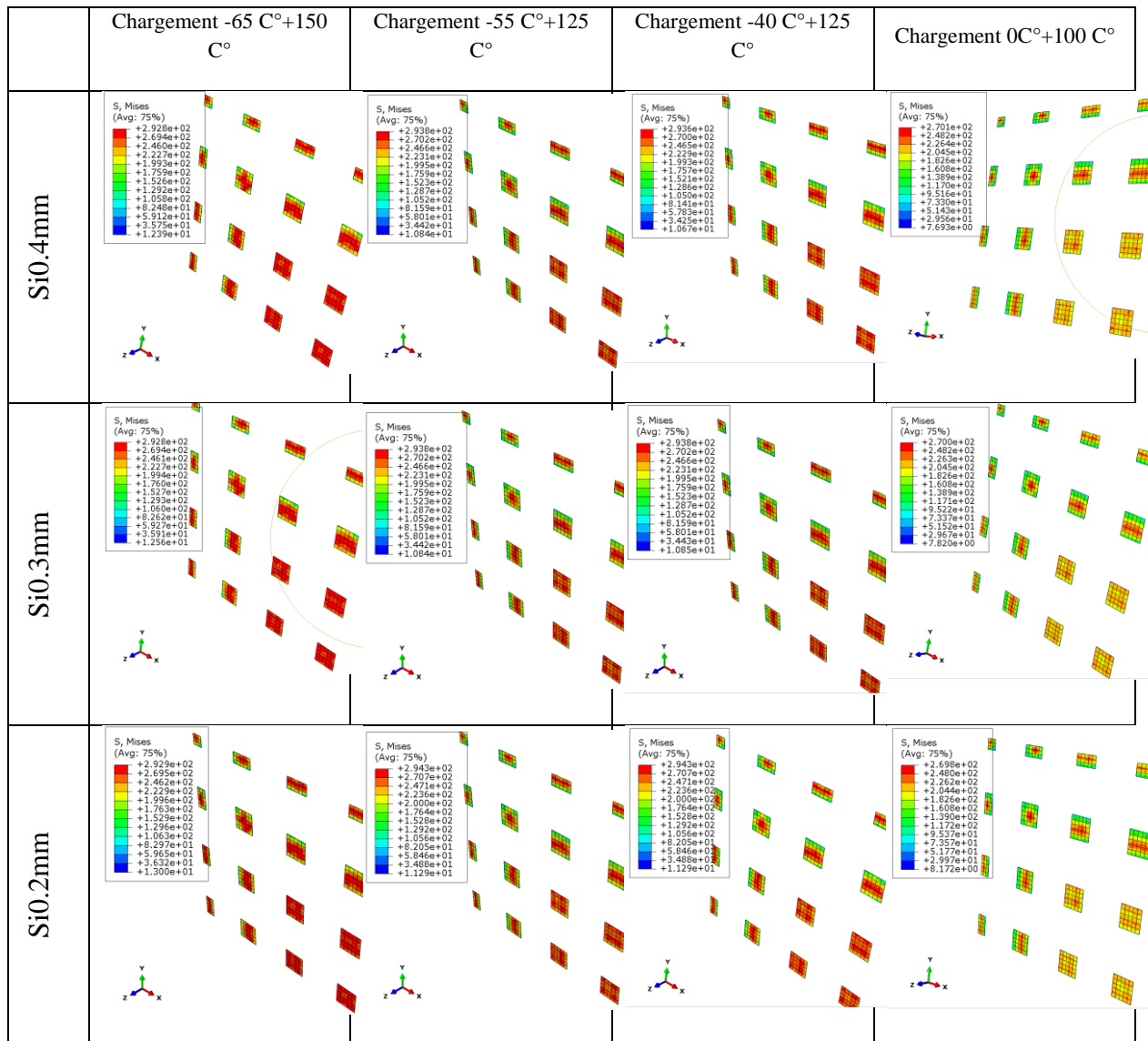


Figure 19. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans la métallisation AlCu.

– **Les contraintes maximales dans la puce en Si**

La figure 20 montre la répartition de la contrainte équivalente de Von Mises dans le silicium pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. On observe que la zone de forte concentration de contrainte est la même pour les différents cas. Elle se situe dans la zone en contact avec la bille de coin. On peut en conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes.

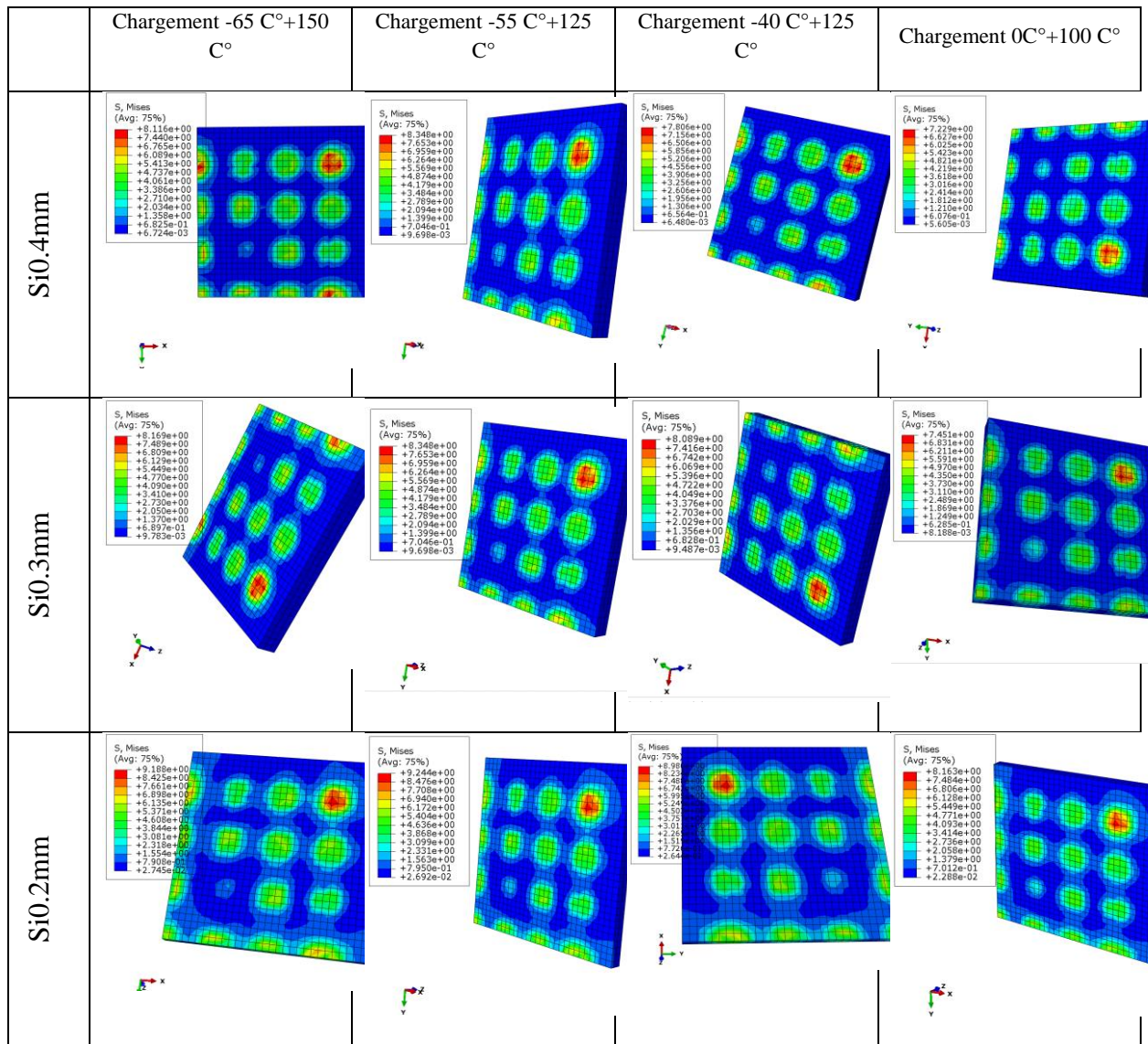


Figure 20. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le silicium.

– Les déformations plastiques dans les plots de cuivre

La figure 21 montre la répartition de la déformation plastique principale maximale dans les plots de cuivre pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. On observe que la zone la plus déformée est la même pour les différents cas. On peut en conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de déformation plastique.

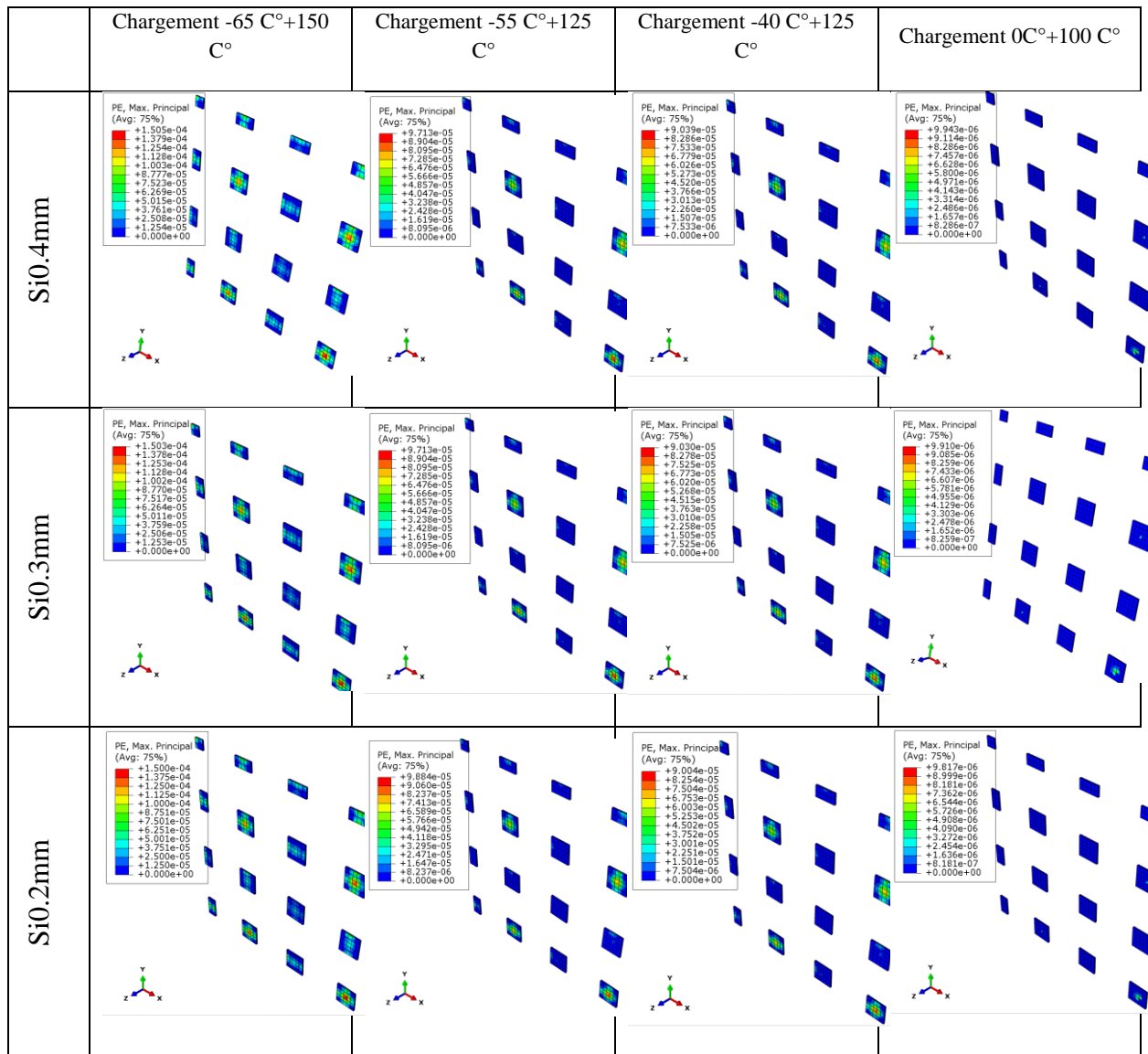


Figure 21 Répartition de la déformation plastique principale maximale dans les plots de cuivre.

Les déformations plastiques dans les billes de brasure SAC

La figure 22 montre la répartition de la déformation plastique principale maximale dans la brasure pour les différents chargements et les différentes épaisseurs de la puce. On observe que la zone à haut risque de rupture est la même pour les différents cas. Cette zone se situe sur la face supérieure de la bille de brasure se situant sur le coin du composant. On rappelle que l'expérimentation montre clairement la faiblesse de cette zone (figures 5 et 15). On peut en conclure que la variation de la condition de chargement ainsi que la variation de l'épaisseur de la puce n'ont pas d'effets significatifs sur les zones de fortes concentrations de contraintes.

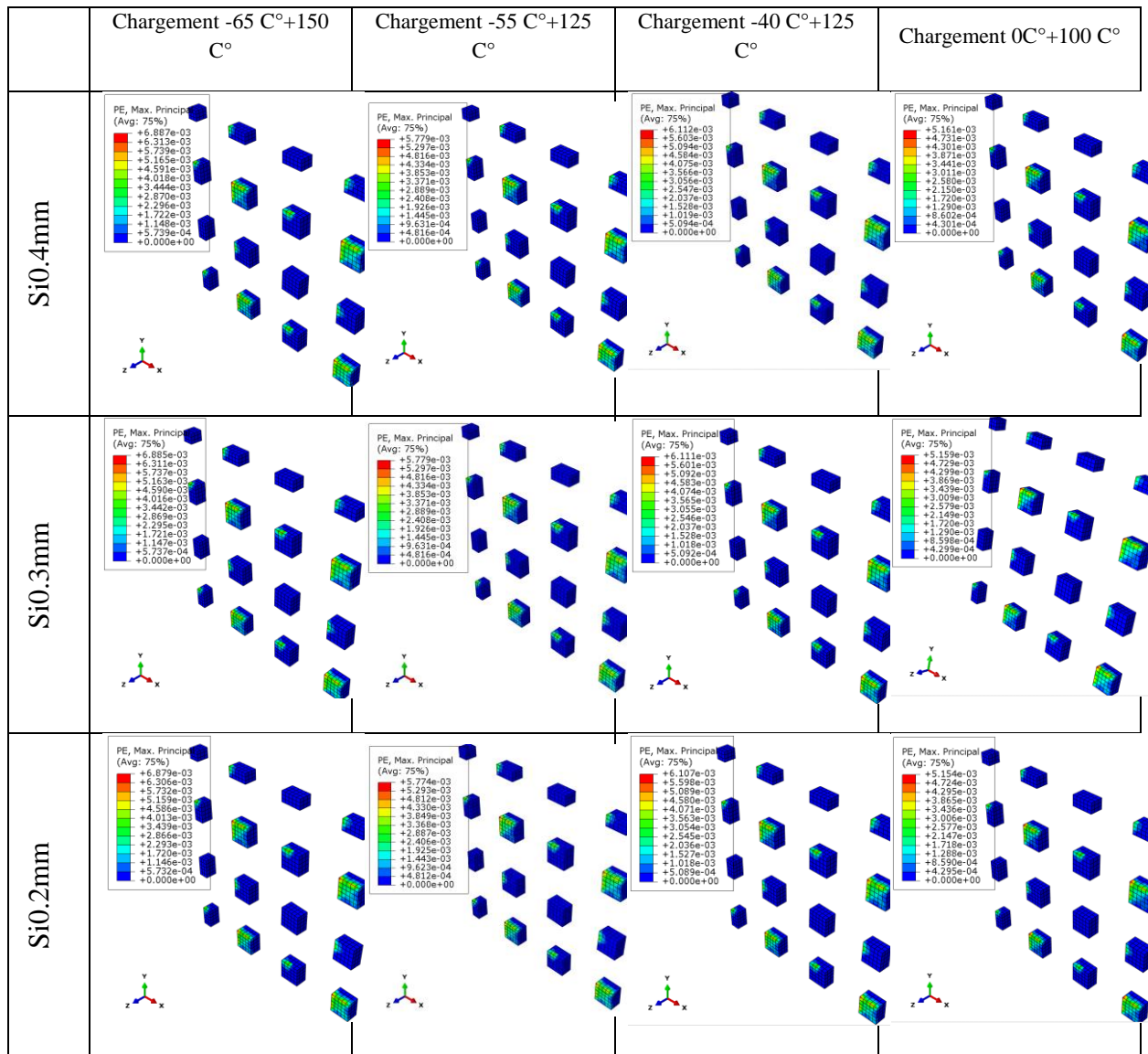


Figure 22. Répartition de la déformation plastique principale maximale dans la brasure SAC.

III.2.2 Comparaisons quantitatives

Nous avons constaté l'absence d'effets significatifs du chargement et de l'épaisseur de la puce sur les zones de fortes concentrations de contraintes et de déformation. Dans cette partie nous nous intéressons aux valeurs maximales obtenus par les différents modèles. Pour chaque chargement, nous avons représenté l'évolution de la contrainte maximale dans chacun des éléments constituant le microcomposant en fonction de l'épaisseur de silicium.

Les figures 23, 24, 25 et 26 présentent l'évolution des valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises en fonction de l'épaisseur de silicium pour l'ensemble des éléments constituant l'assemblage. On remarque que :

- Pour chacun des éléments (PCB, Cu, SAC, IMC, USG, ALCu et SI) la valeur de la

contrainte maximale demeure constante avec l'augmentation de l'épaisseur du silicium.

- Les éléments PCB, Cu, SAC, USG et SI enregistrent des contraintes relativement faibles dont les valeurs sont inférieures à 50 MPa.
- La métallisation AlCu enregistre les valeurs les plus importantes de contraintes (entre 300 et 450 MPa). Ces valeurs importantes de contraintes sont en partie dues au non prise en considération du comportement elastoplastique pour cet élément (manque de données spécifiques à ce matériau).
- Les valeurs les plus faible de contraintes dans la métallisation AlCu sont obtenues pour un chargement 0°C+100°C.
- La couche intermétallique à son tour enregistre des valeurs importantes de contraintes équivalentes de Von Mises. Les contraintes dans cette couche sont comprises entre 330 MPa et 450 MPa. Cette constatation est consolidée par les expérimentations qui ont démontré que cette couche est souvent une zone de rupture par fissuration (figure 17).

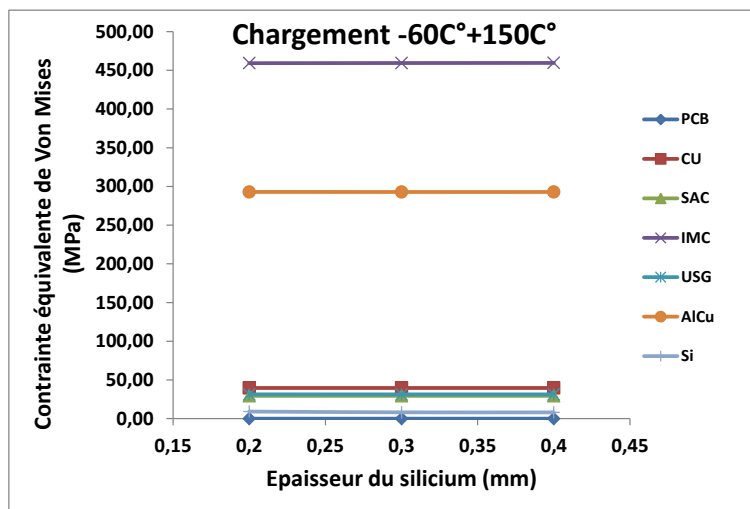


Figure 23. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement -60°C+150°C.

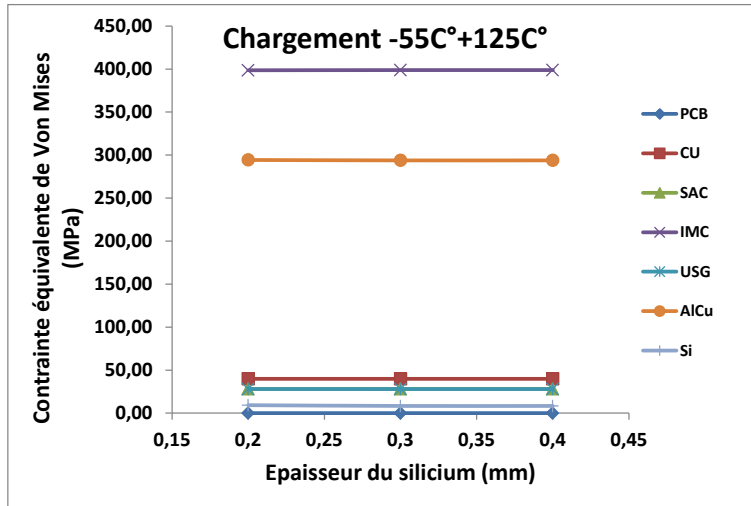


Figure 24. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement -55°C+125°C.

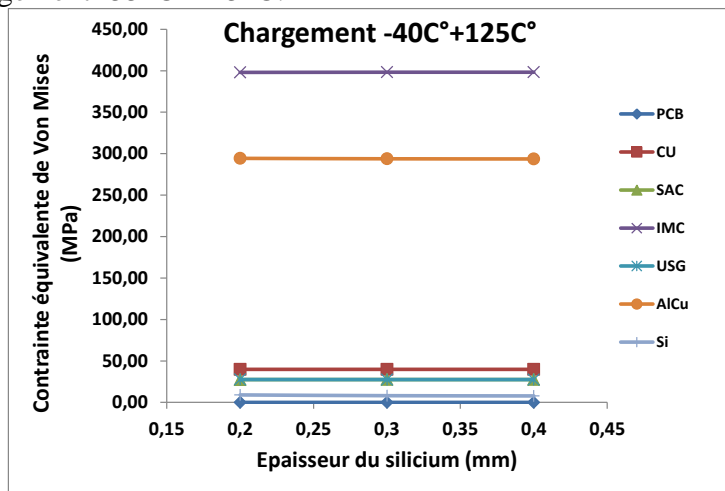


Figure 25. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement -40°C+125°C.

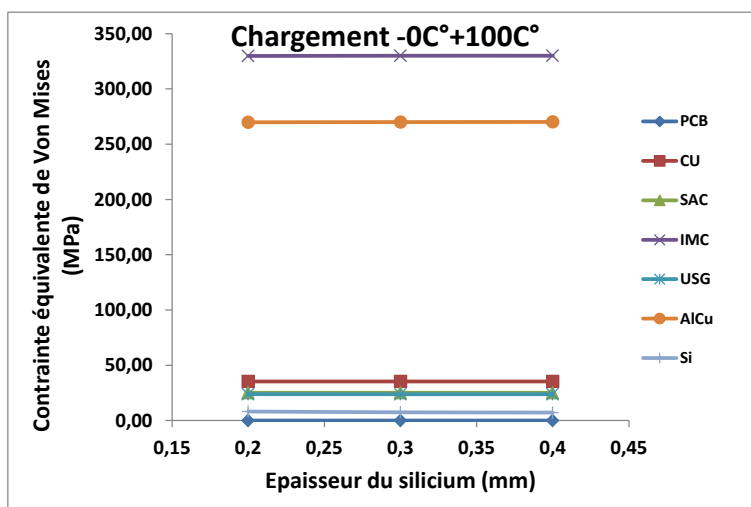


Figure 26. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement 0°C+100°C.

Nous avons constaté que la zone qui présente le risque de rupture le plus important est localisée au niveau de la couche intermétallique. Pour une meilleure représentation des résultats, nous avons opté pour une comparaison de l'évolution de la contrainte maximale de Von Mises dans la couche IMC en fonction de l'épaisseur de la puce pour les différents cycles de chargement (figure 27). On remarque que :

- Les valeurs des contraintes maximales dépendent de la température maximale du chargement. Ainsi, les chargements $-40^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$ et $-55^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$ donnent deux courbes superposées.
- Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pour un chargement $0^{\circ}\text{C}+100^{\circ}\text{C}$ tandis que les plus importantes sont observées pour un chargement $-60^{\circ}\text{C}+150^{\circ}\text{C}$.

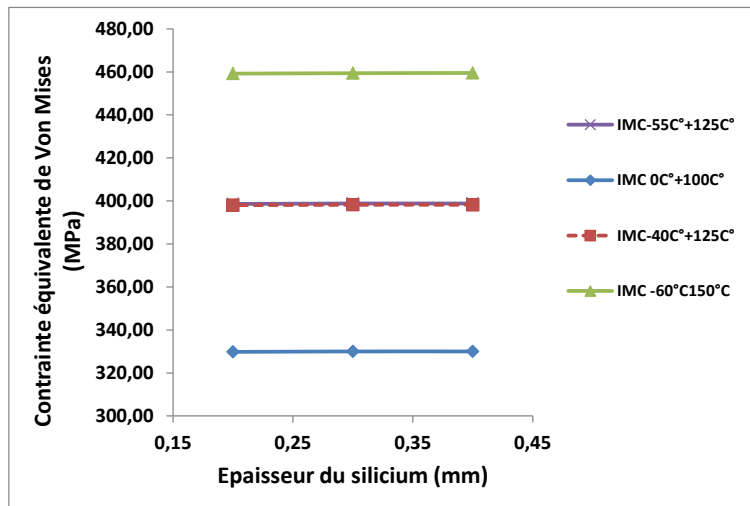


Figure 27. Evolution de la contrainte maximale équivalente dans la couche intermétallique en fonction de l'épaisseur de la puce pour les quatre chargements.

Les figures 28, 29, 30 et 31 présentent l'évolution des valeurs maximales déformation plastiques principales en fonction de l'épaisseur de silicium pour les éléments dont le comportement est élastoplastique à savoir les plots de cuivre et la brasure. On remarque que :

- Pour chacun des deux éléments la valeur de déformation principale maximale demeure constante avec l'augmentation de l'épaisseur du silicium.
- Les déformations plastiques dans les billes de brasure sont supérieures à celle estimées pour les plots de cuivre. Cette constatation est en phase avec les observations expérimentales qui montre un haut risque de rupture dans les billes d'interconnexion (figure 15).

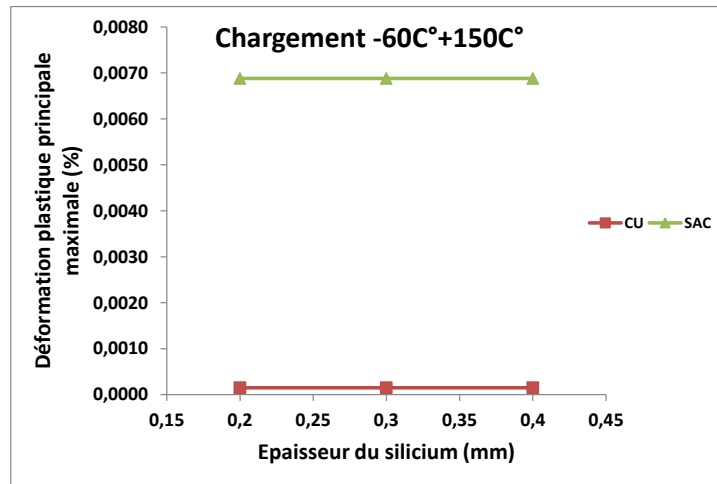


Figure 28. Evolution de déformation plastique maximale en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-60^{\circ}\text{C}+150^{\circ}\text{C}$.

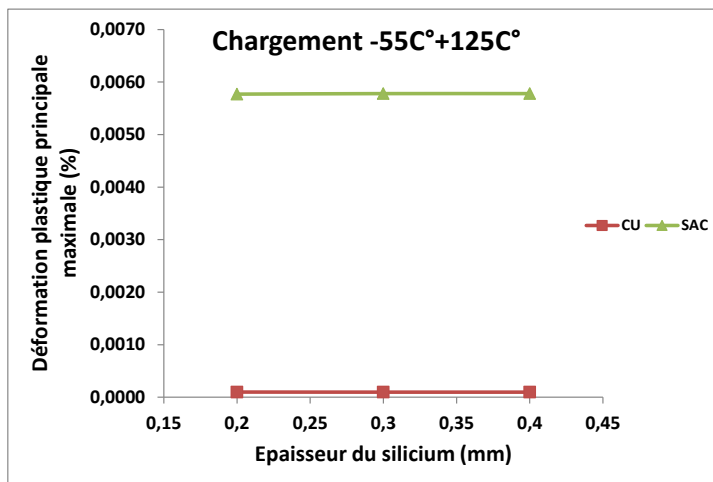


Figure 29. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-55^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$.

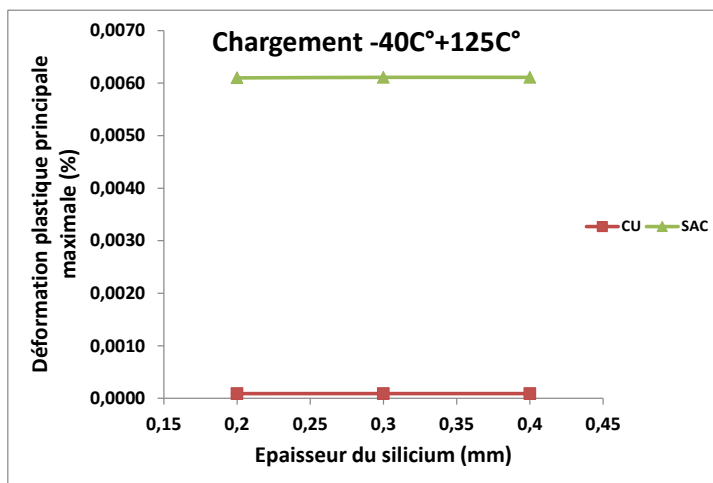


Figure 30. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement $-40^{\circ}\text{C}+125^{\circ}\text{C}$.

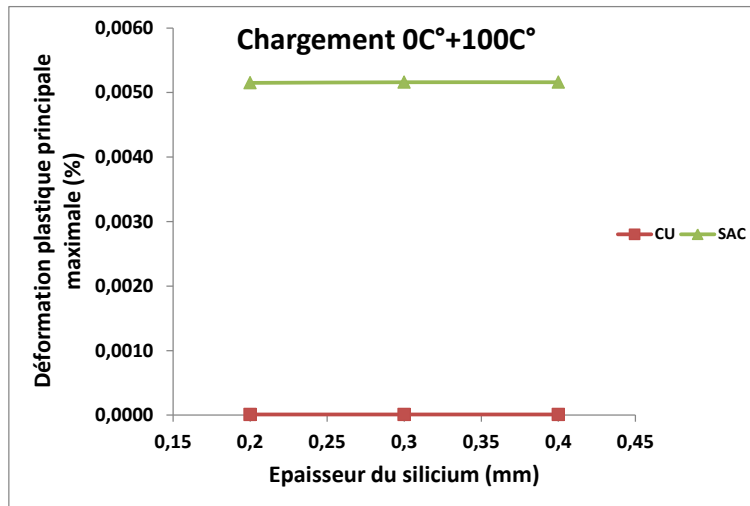


Figure 31. Evolution de la contrainte maximale équivalente en fonction de l'épaisseur de la puce pour un chargement 0°C+100°C.

Une comparaison de l'évolution de la déformation plastique principale maximale dans la brasure en fonction de l'épaisseur de la puce pour les différents cycles de chargement est présentée par la figure 32. On remarque que les déformations les plus importantes sont enregistrées pour la température maximale la plus élevée.

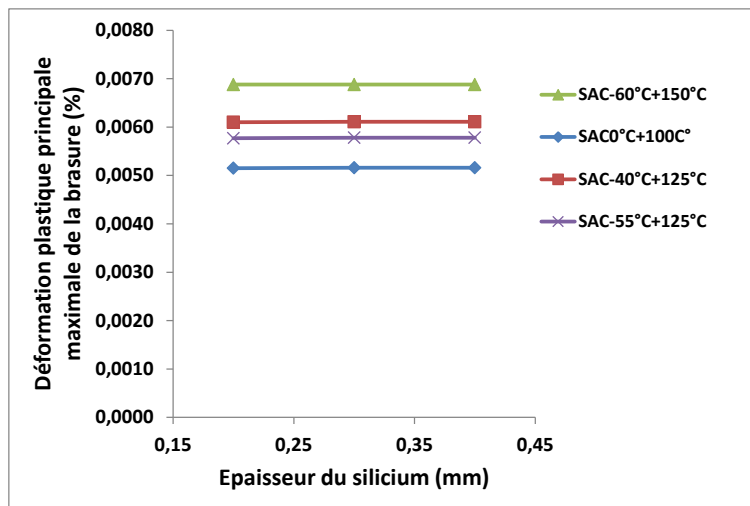


Figure 32. Evolution de la contrainte maximale équivalente dans la couche intermétallique en fonction de l'épaisseur de la puce pour les quatre chargements.

III.3 Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement l'importance de l'évaluation de la réponse thermomécanique des microcomposants mécaniques dans les conditions de service. Les valeurs importantes de contraintes dans la couche intermétallique sont validées

par l'expérimentation qui met en évidence des ruptures par fissuration dans cette zone. Les déformations plastiques importantes relevées sur la brasure se situant sur le coin du microcomposant indiquent un risque de rupture dans cette zone. Cette remarque est renforcée par les observations expérimentales qui montrent des ruptures dans cette zone.

Il est important de signaler que, pour des raisons de complexité de modélisation et de manque de moyens techniques, nous n'avons pas pu modéliser le cycle complet de chargement (chauffage/refroidissement), nous conseillons les étudiants qui souhaitent travailler sur ce même sujet de reprendre notre modèle et d'essayer de modéliser le cycle complet.

Conclusion générale

La quête constante de réduire la taille des composants électroniques a incité les chercheurs à concevoir des éléments de plus en plus petits dotés de multiples fonctionnalités. Cette tendance à la miniaturisation a conduit à une transition de l'électronique vers la microélectronique, voire la nanoélectronique.

Le développement de nouveaux microcomposants nécessite la réalisation de tests de fiabilité, tels que des essais de chocs mécaniques, de vibrations, de flexions répétées et cyclages thermiques, entre autres. Cependant, ces tests impliquent des investissements financiers substantiels, ce qui représente un obstacle au progrès.

Une alternative prometteuse consiste à recourir à des simulations numériques par la méthode des éléments finis pour évaluer la réponse des microcomposants avant même leur phase de conception. Cette étude se concentre spécifiquement sur la réponse thermomécanique d'un microcomposant électronique monté sur un circuit imprimé à l'aide de la technique du "Flip-Chip."

Au cours de cette étude, des modèles numériques ont été développés en utilisant la méthode des éléments finis pour analyser comment l'épaisseur de la puce et le cycle thermique de chargement influent sur la réponse thermomécanique en cyclage thermique du microcomposant électronique.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de comparaisons à la fois quantitatives et qualitatives, et peuvent être résumés comme suit :

- Pour chacun des éléments (PCB, Cu, SAC, IMC, USG, AlCu et Si) la valeur de la contrainte maximale demeure constante avec l'augmentation de l'épaisseur du silicium.
- Les éléments PCB, Cu, SAC, USG et Si enregistrent des contraintes relativement faibles dont les valeurs sont inférieures à 50 MPa.
- La métallisation AlCu enregistre les valeurs les plus importantes de contraintes (entre 300 et 450 MPa). Ces valeurs importantes de contraintes sont en partie dues au non prise en considération du comportement elastoplastique pour cet élément (manque de données spécifiques à ce matériau).
- Les valeurs les plus faibles de contraintes dans la métallisation AlCu sont obtenues pour un chargement $0^{\circ}\text{C}+100^{\circ}\text{C}$.

- La couche intermétallique à son tour enregistre des valeurs importantes de contraintes équivalentes de Von Mises. Les contraintes dans cette couche sont comprises entre 330 MPa et 450 MPa.
- Pour chacun des deux éléments la valeur de déformation principale maximale demeure constante avec l'augmentation de l'épaisseur du silicium.
- Les déformations plastiques dans les billes de brasure sont supérieures à celle estimées pour les plots de cuivre.

La présente étude peut être complétée par :

- L'étude de l'influence de la position des billes de brasure sur la réponse thermomécanique en cyclage thermique.
- L'étude de l'influence du refroidissement sur la réponse thermomécanique du microcomposant.

Il convient de noter que cette étude nous a offert une opportunité précieuse d'améliorer notre maîtrise du logiciel de calcul par éléments finis Abaqus.

Références bibliographiques

- [1] S. Belhenini, « Etude de structures de composants micro-électroniques innovants (3D) : caractérisation, modélisation et fiabilité des démonstrateurs 3D sous sollicitations mécaniques et thermomécaniques », 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2013TOUR4029/document>
- [2] F. MOUSSA BOUDJEMAA et L. NEHILA, « Analyse des contraintes thermomécaniques dans les assemblages des microcomposants électroniques. » Université d'Ain Témouchent Belhadj-Bouchaib, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://pmb-int.univ-temouchent.edu.dz/memoire/>
- [3] H. ZABAT et A. ZENASNI, « Analyse Numérique Des Effets Thermique Sur La Réponse Mécanique Des Microstructures De Type Flip-Chip En Front-End ». Université d'Ain Témouchent Belhadj-Bouchaib, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://pmb-int.univ-temouchent.edu.dz/memoire/>
- [4] X. Xie, D. Jin, et Y. Wan, « BGA Solder Ball Attaching Process Using Surface Tension of Liquid Solder », in *Proceedings of the Eighth Asia International Symposium on Mechatronics*, B. Duan, K. Umeda, et C. Kim, Éd., Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, p. 1039-1046.
- [5] S. SITRAMAN et J. PANG, *Fundamentals of design for reliability*, The McGraw-Hill Companies. in *Fundamentals of Microsystems Packaging*. 2004.
- [6] G. MARANZANA, « HAL Id: tel-01749824 <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749824> Submitted on 29 Mar 2018 HAL Université de Lorraine, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749824/document>
- [7] JEDEC, « Global Standards for the Microelectronics Industry, JEDEC ». JEDEC, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.jedec.org/standards-documents>
- [8] F. ECH CHEIKH, « Modélisations numérique et analytique du comportement mécanique et multi-physique d'une phase haute-tension pour fermes offshores », Ecole Centrale de Nantes, 2022.
- [9] A. BOURAHLA, « Estimation numérique de la résistance mécanique à la flexion d'un circuit imprimé Comportant des circuits intégrés miniatures ». Université d'Ain Témouchent Belhadj-Bouchaib, 2023.
- [10] R. Coyle *et al.*, *Interim Thermal Cycling Report on Hybrid, Homogeneous, and Resin Reinforced Low Temperature Solder Joints*. 2021.
- [11] M. Suhaimi, M. Abu Bakar, A. Jalar, F. Ani, et M. Ramli, « Thermal cycling effect on the crack formation of solder joint in ball grid array package », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2169, p. 012006, janv. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2169/1/012006.