

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

Estimation numérique de la résistance mécanique à la flexion d'un circuit imprimé Comportant des circuits intégrés miniatures

Présenté Par :

1) M BOURAHLA Abdelwahed

Devant le jury composé de :

Pr. OUDAD Wahid	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BAHRAM Kaddour	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BELHENINI Soufyane	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
M. MECELLEM Ameer	Doctorant	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

J'exprime tous mes remerciements à ALLAH le Tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour mener à terme ce présent travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études et qui m'ont offert l'opportunité d'explorer et d'apprendre.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mon encadrant Dr BELHENINI Soufyane, mon co-encadreur M MECELLEM Ameer ainsi que les membres du corps professoral qui m'ont guidé et assisté à chaque étape de mon parcours académique.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers les membres de jury, Pr OUDAD Wahid et Dr BAHRAM Kaddour qui ont consacré leur temps et leurs efforts pour examiner et évaluer ce modeste travail dans le but de le rendre plus riche scientifiquement.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à ma famille et à mes amis pour leur soutien constant et leur encouragement remarquable tout au long de cette période de préparation.

Un grand merci à vous tous.

BOURAHLA Abdelwahed.

Résumé

La course à la miniaturisation des composants électronique a poussé les chercheurs à développer des composants de plus en plus petits avec des fonctionnalités multiples. Cette miniaturisation s'est accompagnée par un passage de l'électronique à la microélectronique voire la nanoélectronique.

La présente étude s'est intéressée à la réponse mécanique d'un microcomposant électronique monté sur un circuit imprimé par la technique de la puce-retournée (Flip-Chip). Des modélisations numériques utilisant la méthode des éléments finis ont été développées pour étudier les effets de l'épaisseur de la puce et du matériau de la brasure sur la réponse mécanique en flexion du microcomposant. Les résultats, présentés sous formes de comparaisons quantitatives et qualitatives, montrent clairement l'impact de l'épaisseur de la puce et des propriétés de la brasure sur la résistance mécanique en flexion du microcomposant.

Abstract

The race towards the miniaturization of electronic components has pushed researchers to develop increasingly smaller components with multiple functionalities. This miniaturization has been accompanied by a transition from electronics to microelectronics and even nanoelectronics.

This study focused on the mechanical response of a microelectronic component mounted on a printed circuit board using the Flip-Chip technique. Numerical simulations using the finite element method were developed to investigate the effects of chip thickness and solder material on the flexural mechanical response of the microcomponent. The results, presented in terms of quantitative and qualitative comparisons, clearly demonstrate the impact of chip thickness and solder properties on the flexural mechanical strength of the microcomponent.

ملخص

تسابق التصغير في مجال المكونات الإلكترونية دفع الباحثين لتطوير مكونات أصغر حجمًا بوظائف متعددة. وقد ترافق هذا.. التصغير مع انتقال من مجال الإلكترونيات إلى الميكروإلكترونيات وحتى النانوإلكترونيات

ركزت هذه الدراسة على الاستجابة الميكانيكية لمكون إلكتروني ميكروي مركب على لوحة دارة مطبوعة باستخدام تقنية تم تطوير نماذج رقمية باستخدام طريقة العناصر المحدودة لدراسة تأثير سمك الرقاقة ومادة اللحام على الاستجابة الميكانيكية للمكون الميكروي في الانثناء. تُظهر النتائج التي قُدمت في شكل مقارنات كمية ونوعية تأثير سمك الرقاقة وخصائص اللحام بوضوح على المقاومة الميكانيكية للمكون الميكروي في الانثناء

Sommaire

Remerciements	2
Résumé.....	3
Abstract	3
ملخص.....	3
Sommaire	4
Introduction Générale.....	10
Chapitre I Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service	12
1. Introduction.....	13
2. Fabrications des microcomposants électroniques.....	13
3. Assemblage des microcomposants électroniques	15
4. Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants en service	18
5. Estimation de la résistance mécanique des microcomposants électroniques	19
6. Présentation du microcomposant de l'étude	21
7. Présentation du test de flexion normalisé JEDEC	22
8. Présentation de l'approche numérique de l'étude	23
Chapitre II : Simulation numérique d'un essai de flexion sur des microcomposants électroniques montés sur un PCB normalisé	24
1. Introduction :.....	25
2. Présentation du logiciel choisi pour l'étude :.....	25
3. Présentation de la géométrie :.....	26
4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés :.....	27
5. Conditions aux limites et de chargement :.....	29
6. Maillage :.....	30
7. Interface	32
8. Technique de calcul :.....	32

9. Résultats attendus de la simulation :	32
Chapitre III : Résultats numériques, discussions et perspectives.....	33
1. Introduction :.....	34
2. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises.....	34
2.1. Le Si0.3.....	34
2.2. Le Si0.4.....	39
2.3. Le Si0.5.....	43
3. Répartition des déformations plastiques (cuivre et SAC)	48
3.1. Le Si 0.3.....	49
3.2. Le Si0.4.....	50
3.3. Le Si0.5.....	53
4. Comparaisons quantitatives des résultats	55
4.1. L'effet sur les contraintes équivalentes de Von Mises.....	55
4.2. L'effet sur les déformations plastiques (PE) :.....	56
5. Conclusion :	58
Conclusion Générale	59
Références bibliographiques.....	60

Liste des figures

Figure 1: Le premier circuit intégré.....	14
Figure 2: Cycle simplifié de fabrication d'un circuit intégré.[2]	14
Figure 3: Séquences de Wedge bonding.[3]	15
Figure 4: séquences du Ball bonding.[4]	16
Figure 5: Principe simplifié du montage TAB[5].	17
Figure 6: Montage en Puce Retournée Flip-chip[6].	17
Figure 7: Fissuration d'une bille d'interconnexion d'une puce retournée (Flip-Chip)[7].	18
Figure 8: Chute d'un smartphone contenant des microcomposants électroniques.....	18
Figure 9: Essai de flexion quatre point sur des circuits imprimés PCB comportant des microcomposants électroniques.	20
Figure 10: Traction et compression sur les billes de brasure sous l'effet de la flexion du PCB.	20
Figure 11: Exemple d'une simulation numérique d'un PCB en flexion	21
Figure 12: Représentation 3D du microcomposant de l'étude.....	22
Figure 13: Schéma montrant l'installation de flexion à 4 points d'un circuit imprimé avec des composants de type FLIP-CHIP[8].	22
Figure 14 : Structure globale d'étude construite par ABAQUS	25
Figure 15: Géométrie modélisée en 2D	26
Figure 16: présentation de modèle 2D étudié	26
Figure 17: Conditions aux limites (symétrie)	29
Figure 18: Déplacement imposé en flexion.	29
Figure 19: Contraintes V.Mises du PCB du modèle Si0.3-.....	34
Figure 20: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC105.....	34
Figure 21: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC105	35
Figure 22: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC105.....	35
Figure 23: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC105	35
Figure 24: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC105	35
Figure 25: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC305.....	36

Figure 26: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.3-SAC305	36
Figure 27: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC305.....	36
Figure 28: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC305	36
Figure 29: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC305	37
Figure 30: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC305	37
Figure 31: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC405	37
Figure 32: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC405.....	37
Figure 33: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC405	38
Figure 34: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.3-SAC405	38
Figure 35: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC405.....	38
Figure 36: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC405	38
Figure 37: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-SAC105	39
Figure 38: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-SAC105.....	39
Figure 39: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-SAC105	39
Figure 40: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC105	39
Figure 41: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC105	40
Figure 42: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC105	40
Figure 43: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-SAC305	40
Figure 44: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-SAC305.....	41
Figure 45: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-SAC305	41
Figure 46: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC305	41
Figure 47: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.4-SAC305.....	41
Figure 48: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC305	42
Figure 49: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-SAC405	42
Figure 50: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-SAC405.....	42
Figure 51: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-SAC405	42
Figure 52: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC405	43

Figure 53: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.4-SAC405.....	43
Figure 54: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC405	43
Figure 55: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105	43
Figure 56: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC105.....	44
Figure 57: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105	44
Figure 58: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105	44
Figure 59: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105	44
Figure 60: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105	45
Figure 61: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC305	45
Figure 62: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC305.....	45
Figure 63: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.5-SAC305	45
Figure 64 : Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.5-SAC305.....	46
Figure 65 : Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.5-SAC305.....	46
Figure 66 : Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.5-SAC305	46
Figure 67 : Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC405	47
Figure 68 : Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC405.....	47
Figure 69 : Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.5-SAC405	47
Figure 70 : Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.5-SAC405.....	47
Figure 71 : Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.5-SAC405.....	48
Figure 72 : Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.5-SAC405	48
Figure 73: Déformation plastique du SAC105 avec Si0.3	49
Figure 74: Déformation plastique du Cuivre avec Si0.3-(SAC105)	49
Figure 75: Déformation plastique du Cuivre avec Si0.3-(SAC305)	49
Figure 76: Déformation plastique du SAC305 avec Si0.3	50
Figure 77: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.3-(SAC405)	50
Figure 78: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.3	50
Figure 79: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC105)	51

Figure 80: Déformation plastique de SAC105 avec Si0.4	51
Figure 81: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC305)	51
Figure 82: Déformation plastique de SAC305 avec Si0.4	52
Figure 83: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC405)	52
Figure 84: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.4	52
Figure 85: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC105)	53
Figure 86: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC105)	53
Figure 87: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC305)	53
Figure 88 : Déformation plastique de SAC305 avec Si0.5	54
Figure 89: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC405)	54
Figure 90: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.5	54
Figure 91: variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.3 du Silicium	55
Figure 92: Variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.4 du Silicium.....	55
Figure 93: Variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.5 du Silicium.....	56
Figure 94: Comparaison des déformations plastiques par le SAC105	56
Figure 95: Comparaison des déformations plastiques par le SAC305	57
Figure 96: Comparaison des déformations plastiques par le SAC405	57

Introduction Générale

Introduction Générale

La course à la miniaturisation des appareils électronique nécessite l'utilisation de composants électroniques de plus en plus petits. L'électronique évolue vers la microélectronique voire la nanoélectronique.

Le développement de nouveaux microcomposants électroniques nécessite la réalisation de test de qualification pour approuver la fiabilité. Ces tests normalisés coutent trop cher en temps et en argent. Dans un univers industriel très concurrentiel, être le premier à mettre sur le marché un nouveau produit est synonyme de réussite économique. Pour accélérer le développement de microcomposants électroniques, les industriels spécialisés ont intégré les simulations numériques par éléments finis dans leurs approches de développement. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail.

En effet, notre étude s'intéresse au comportement mécanique d'un microcomposant électronique de type puce retournée (Flip-Chip) sous l'effet d'une flexion de la carte mère. Ce comportement a été étudié par une approche numérique utilisant la méthode des éléments finis. Les effets de l'épaisseur de la puce ainsi que celui du matériau de la brasure ont été étudiés.

En plus d'une introduction générale et d'une conclusion générale, le présent mémoire, comporte trois chapitres :

- Un premier chapitre présentant l'évolution de l'électronique et mettant l'accent sur les sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service. Les techniques d'évaluation des contraintes et des déformations y sont également présentées.
- Un deuxième chapitre présentant notre approche numérique visant à étudier la réponse mécanique sous flexion d'un microcomposant électronique de type Flip-Chip monté sur un circuit imprimé normalisé. La norme JEDEC a été employée pour l'étude.
- Un troisième chapitre détaillant les résultats des simulations numériques. Des comparaisons des résultats quantitatives et qualitatives y sont présentées. Les contraintes équivalentes de Von Mises ainsi que les déformations plastiques maximales sont utilisées comme paramètres de comparaisons.

Chapitre I Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service

1. Introduction

La plupart des composants actifs sont des semi-conducteurs, qui sont classés en deux grandes catégories : les composants discrets et les circuits intégrés. Les composants discrets sont conçus pour effectuer une seule fonction, comme les diodes à effet tunnel, les transistors et les tubes électroniques. Il existe également des composants actifs spécifiques utilisés en électronique de puissance, tels que les diodes, les thyristors et les transistors, qui permettent la conversion statique de l'énergie électrique. [1]

Les composants électroniques actifs et passifs, une fois assemblés en modules et interconnectés, forment des circuits intégrés, qui peuvent réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques. Les circuits intégrés, qui peuvent être plus ou moins complexes, intègrent plusieurs types de composants électroniques, tels que les microprocesseurs, les amplificateurs opérationnels, les fonctions combinatoires et les convertisseurs analogique-numérique. Ils sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et des applications, qui évoluent rapidement. [1]

2. Fabrications des microcomposants électroniques

Les Microcomposants sont devenus indispensables de nos jours et se retrouvent dans pratiquement tous les appareils électroniques. Ces petites merveilles de la technologie offrent une solution pratique pour réduire considérablement la taille des appareils tout en offrant des fonctionnalités avancées avec une mise en place simplifiée. La production de composants microélectroniques implique l'utilisation de nombreux processus différents pour aboutir à la création de composants de base tels que les résistances, inductances, condensateurs, diodes et transistors. Ces composants de base sont ensuite assemblés pour former des Circuits Intégrés, qui sont des ensembles complexes de ces éléments de base.[2]

Le premier Circuit Intégré (figure 4) revient à Jack Kilby en 1958. Il était alors employé de Texas Instrument et avait câblé un montage à la main, avant que les premiers prototypes sur silicium soient réalisés. Kilby reçu le prix Nobel de physique en 2000. [2]



Figure 1: Le premier circuit intégré¹.

La fabrication d'un microcomposant électronique implique de nombreuses opérations physiques et chimiques telles que le dépôt de couches métalliques et diélectriques, le dopage, le collage, le lissage, le découpage et l'encapsulation. Ces opérations peuvent générer des défauts qui peuvent entraîner la défaillance des composants. Pour améliorer la durée de vie des composants, il est essentiel de comprendre ces défauts et leurs modes de défaillance.

Le processus de fabrication des microcomposants est schématisé par le figure I-2.

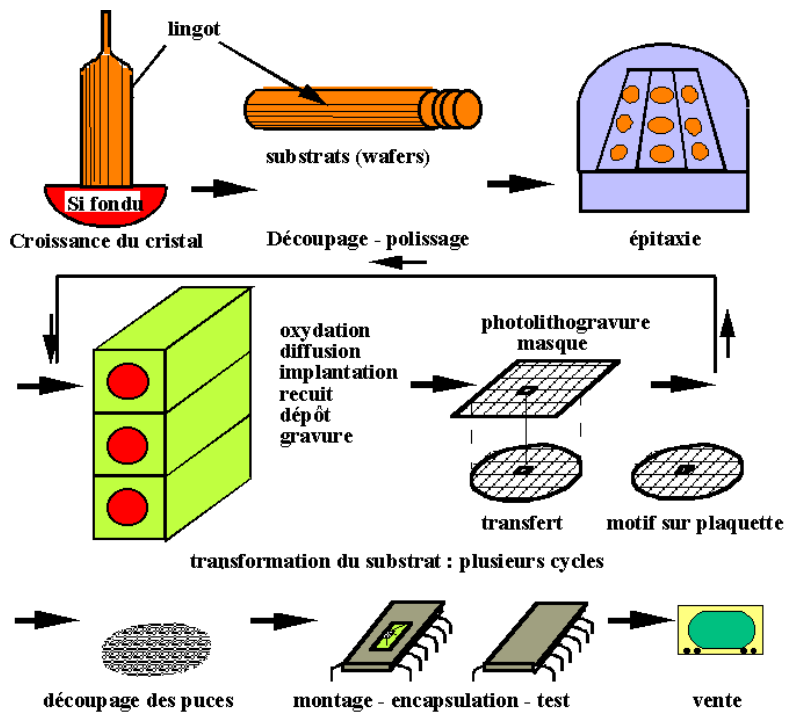


Figure 2: Cycle simplifié de fabrication d'un circuit intégré.[2]

¹ Image internet. Libre accès

3. Assemblage des microcomposants électroniques

Les microcomposants sont disposés sur une puce sont reliés les uns aux autres par des pistes conductrices appelées « interconnexions». À mesure que le nombre de composants augmente, les moyens d'interconnexion internes doivent être de plus en plus denses. Pour qu'un circuit intégré en puce soit utilisable, il faut qu'il soit électriquement relié au niveau de packaging. Les techniques d'interconnexion les plus employées sont :

(a) Assemblage par fil

La technique de câblage filaire (wire bonding) est la plus ancienne et la plus répandue dans l'industrie de la microélectronique pour réaliser l'interconnexion d'un circuit en « puce » avec son environnement (boîtier, circuit imprimé, circuit hybride...). Deux techniques de base sont utilisées et représentées ci-dessous par les figure I.3 et I.4 : le *Wedge bonding* et le *Ball bonding*.

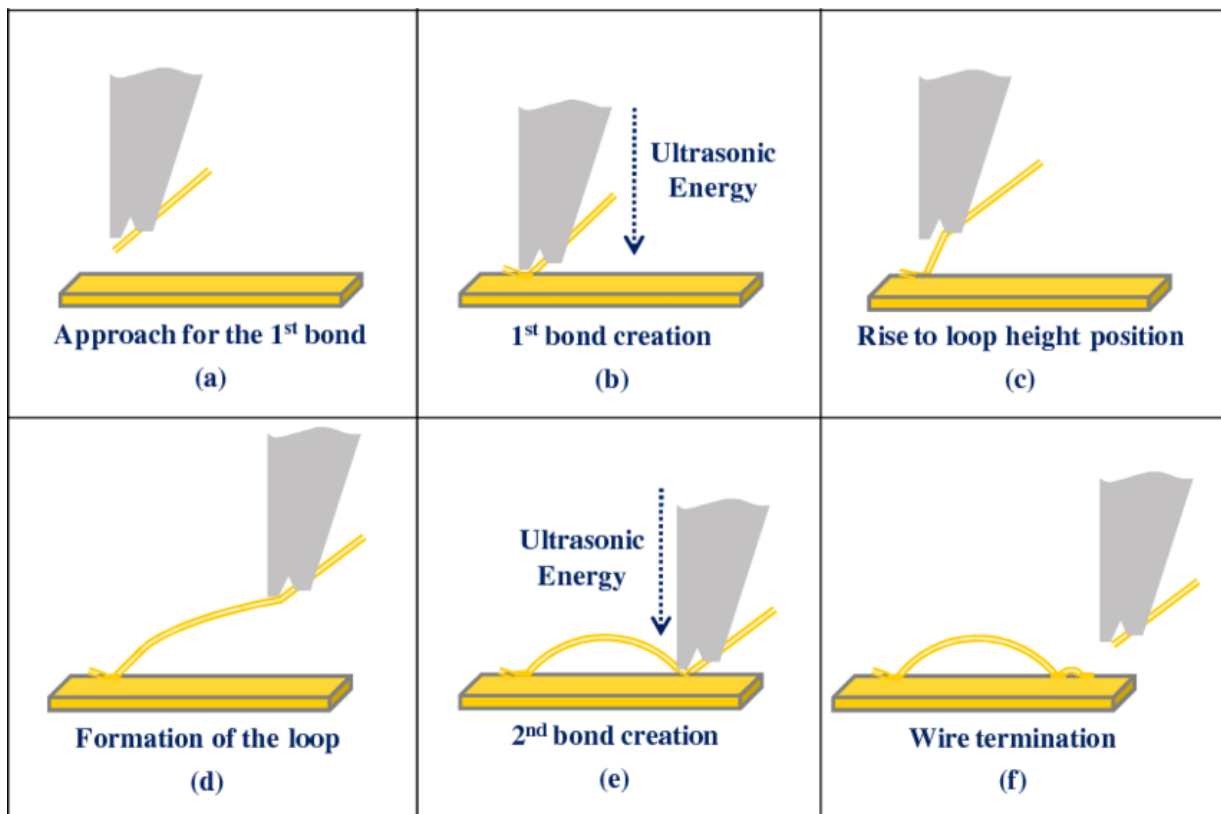


Figure 3: Séquences de Wedge bonding.[3]

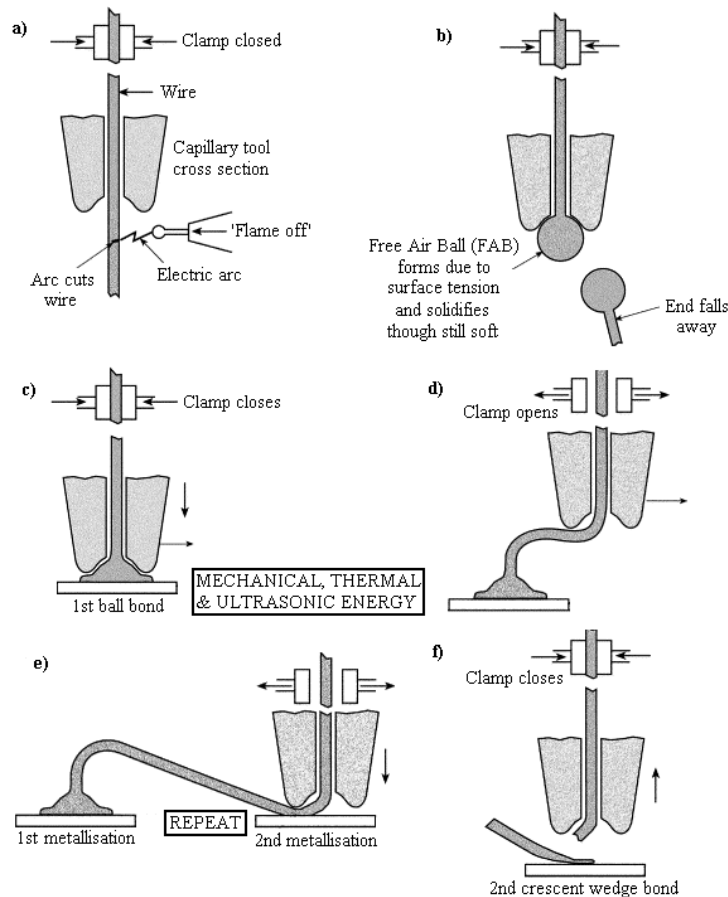


Figure 4: séquences du Ball bonding.[4]

(b) Technologie Tape Automated Bonding (TAB)

Cette technologie utilise un film multicouche de connexion (généralement en kapton ou en polyamide) qui réalise l'adaptation d'impédance en circuits coplanaires. Ce procédé associé à un boîtier permet de réaliser des modules actifs à faible coût. Le circuit intégré à connecter doit recevoir un traitement adapté à cette technologie. Un dépôt de TiW (barrière de diffusion) puis d'or (environ 20 μm) est effectué sur le plot d'aluminium[5].

Le circuit intégré est assemblé au centre du film de connexion (communément appelé l'araignée) par une opération de câblage dit interne ou d'ILB (Inner Lead Bonding). La puce est ensuite testée dans un connecteur de test[5].

L'ensemble (puce araignée) peut être monté par la suite sur une carte comme s'il s'agissait d'un boîtier conventionnel ou monté à l'intérieur d'un circuit hybride. Cette dernière étape est appelée OLB (Outer Lead bonding).

La soudure des plots internes (ILB) est réalisée par une technique de micro-câblage, mais elle est de moins en moins utilisée en raison de l'évolution des circuits intégrés en termes de complexité et de taille. Les machines de micro-câblage compatibles avec la soudure individuelle sont plus rapides et plus fiables, et permettent de mieux contrôler les conditions nécessaires à l'obtention d'un joint correct. La diminution de l'épaisseur d'or sur les plots est

un des paramètres qui limite également l'utilisation de la soudure collective[5]. Le principe simplifié de montage TAB est illustré par la figure I.5.

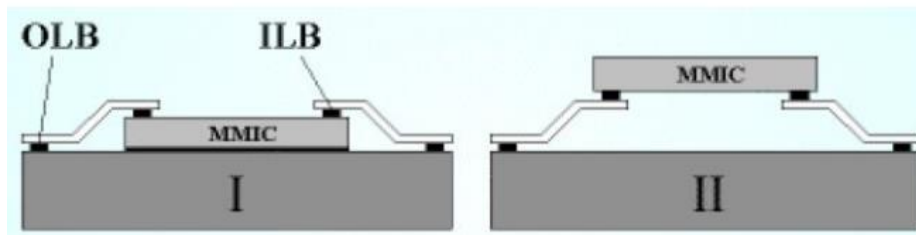


Figure 5: Principe simplifié du montage TAB[5].

(c) Puce Retournée (Flip chip)

Le flip chip est une technologie d'assemblage de composants électroniques dont le principe est de confiner les connexions sous l'élément à assembler. Une telle configuration offre ainsi un encombrement minimum, ainsi que la possibilité d'aboutir à de fortes densités d'interconnexions.

Par définition, le flip chip englobe toutes les technologies de report pour lesquelles la puce, qui possède tous ses contacts sur une seule face, est retournée pour être assemblée au substrat d'accueil. Il est possible de les classer en trois grandes familles : la brasure de microbilles, la thermo compression et le collage.[5]

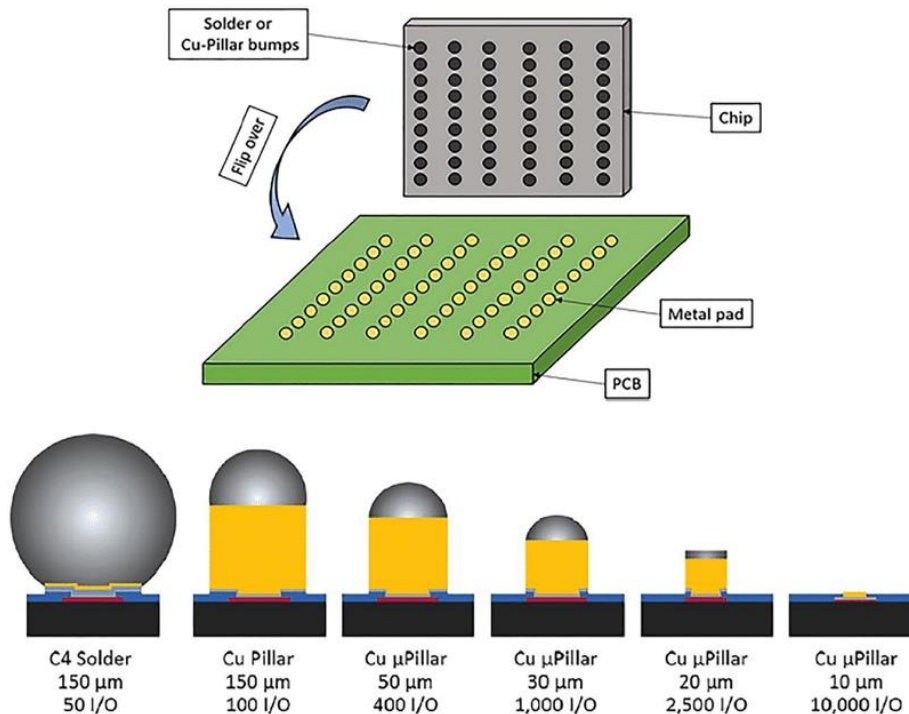


Figure 6: Montage en Puce Retournée Flip-chip[6].

4. Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants en service

Les microcomposants électroniques sont plus petits et polyvalents que les composants électroniques classiques, mais ils sont également plus sensibles aux contraintes mécaniques et thermiques qui peuvent entraîner des ruptures dans la zone de brasure. Les sollicitations mécaniques comme les vibrations et les chocs par exemple peuvent provoquer des ruptures brutales ou des ruptures par fatigue d'une ou de plusieurs parties des microcomposants. La figure I.7 montre une fissure dans une bille d'interconnexion d'une puce retournée.

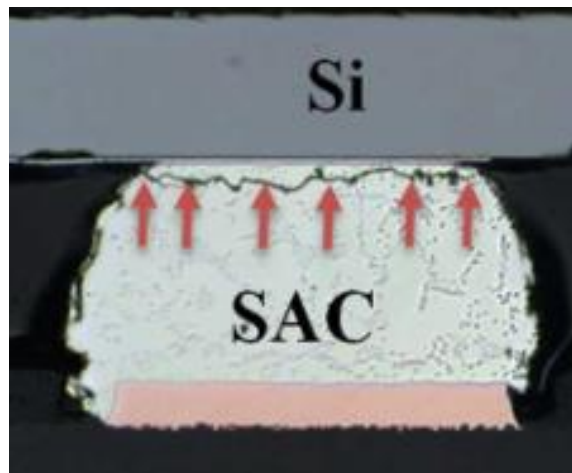


Figure 7: Fissuration d'une bille d'interconnexion d'une puce retournée (Flip-Chip)[7].

Parmi ces sollicitations mécaniques induites lors de l'utilisation des appareils électroniques comportant des microcomposants électroniques, on peut citer :

4.1. Les chocs mécaniques

Exemple des Smartphones et des tablettes, l'utilisateur peut faire tomber son appareil ce qui provoque un choc mécanique pouvant conduire à des ruptures brutales des interconnexions[7].

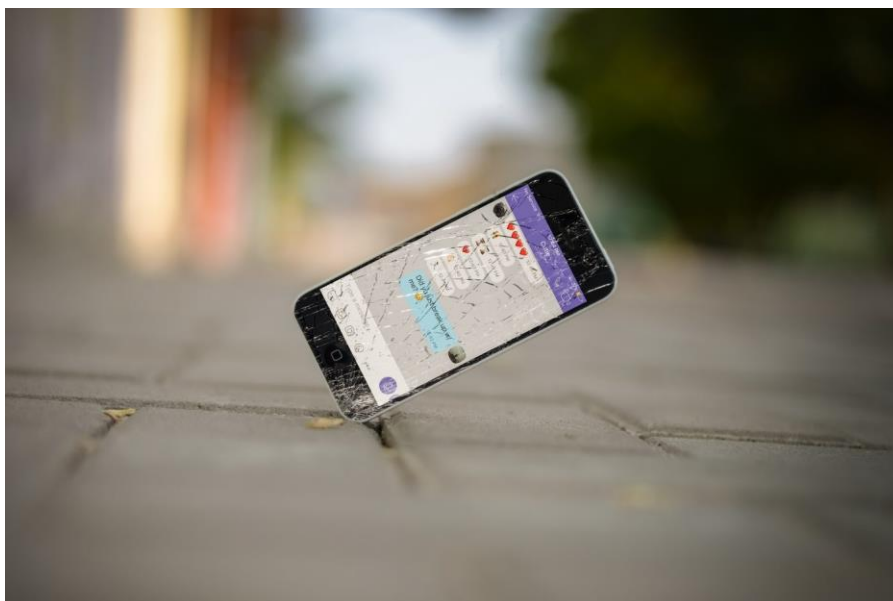


Figure 8: Chute d'un smartphone contenant des microcomposants électroniques.

4.2. Les vibrations

Les systèmes embarqués dans les avions par exemple subissent des vibrations et des conditions environnementales extrêmes, ainsi, les contraintes mécaniques que subissent les appareils électroniques peuvent conduire à des ruptures brutales.

4.3. La flexion répétée

Un individu qui rédige un texte sur son Smartphone ou sur sa tablette. L'action mécanique de son doigt sur l'écran provoque des mini-flexions des cartes électroniques porteuses de microcomposants électroniques. Même si les forces appliquées sont de faible intensité à notre regard, elles sont importantes sur l'échelle d'une puce qui fait quelques millimètres de surface et quelques micromètres d'épaisseur. En plus la répétition de ces sollicitations peut provoquer la rupture par fatigue. [7]

5. Estimation de la résistance mécanique des microcomposants électroniques

Cette partie de ce projet concerne une présentation des techniques employées dans l'estimation de la résistance à la flexion des microcomposants électroniques dans le but de détermination de la fiabilité des interconnexions durant le travail premièrement expérimentalement grâce à des tests accélérées, puis par la méthode des éléments finis.

5.1. Estimation par l'expérimentation

Les paramètres et les conditions de tests accélérés doivent respecter des normes spécifiques comme le JEDEC, le Mil Std-8839, et l'AEC10. Toutes les études menées dans le présent travail sont réalisées en se référant aux normes JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council)².

La présente étude concerne la détermination de la fiabilité mécanique des microcomposants électroniques subissant de la flexion répétée. La flexion répétée (flexion cyclique) de la carte lors de diverses opérations d'assemblage et de test et lors de l'utilisation réelle peut provoquer des pannes électriques dues aux fissures de la carte de circuit imprimé et des traces, des fissures des interconnexions de soudure et des fissures du circuit intégré SMT. Bien que le nombre de cycles de pliage répétés soit faible pendant l'assemblage (par exemple, manipulation entre diverses opérations d'assemblage, test en circuit, assemblage final dans le boîtier du produit), l'ampleur de la flexion peut être très importante. D'autre part, les conditions d'utilisation réelles telles que les pressions répétées sur les touches du téléphone portable peuvent entraîner un grand nombre de cycles de pliage répétés pendant la durée de vie du produit, bien qu'à une ampleur moindre. Les deux figures suivantes montrent l'essai de flexion des PCB et leurs impacts :

² <https://www.jedec.org/>



Figure 9: Essai de flexion quatre point sur des circuits imprimés PCB comportant des microcomposants électroniques³.

La flexion répétée d'un PCB comportant des microcomposants électroniques provoque des sollicitations de traction sur les billes d'interconnexion comme le montre la figure I-10.

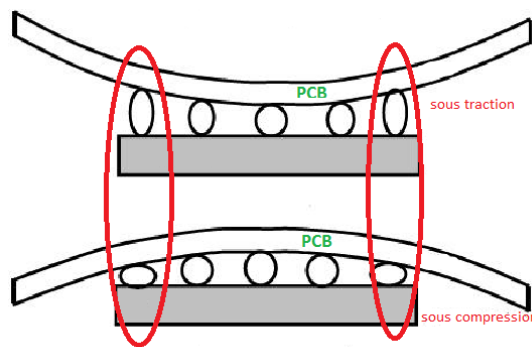


Figure 10: Traction et compression sur les billes de brasure sous l'effet de la flexion du PCB.

5.2. Estimation numériques par la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est un outil très puissant pour obtenir la solution numérique d'un large éventail de problèmes d'ingénierie. Elle permet de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire. Celle-ci peut, par exemple, représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques,

³ Image internet. Libre Accès

thermodynamiques, acoustiques, etc.). Le concept de base est qu'un organisme ou une structure peut être divisé en plusieurs petits éléments de dimensions finies appelé « éléments finis ». Le corps d'origine ou la structure est alors considéré comme un assemblage de ces éléments reliés à un nombre fini de joints appelé « nœuds » ou « points nodaux ». Les propriétés des éléments sont formulées et combinées pour obtenir les propriétés de l'ensemble du corps.

Un exemple de l'estimation de la réponse mécanique d'un PCB en flexion est présenté par la figure I-9.

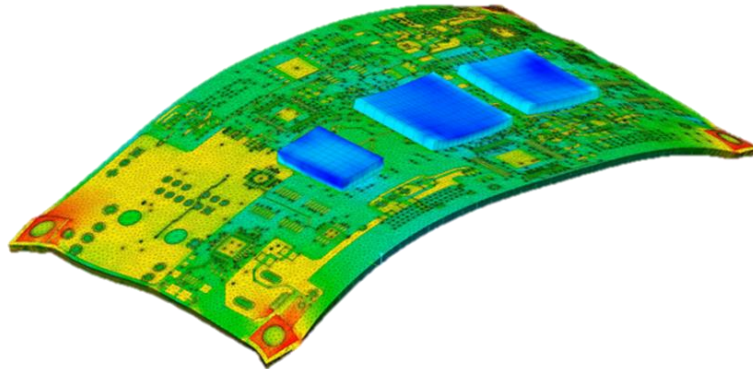


Figure 11: Exemple d'une simulation numérique d'un PCB en flexion⁴

6. Présentation du microcomposant de l'étude

Le composant électronique étudié est un circuit intégré **SMT IC** (Surface-Mount Technology) qui a le but de développer une nouvelle génération de microcomposants de type 3D pour des applications mobiles.

Il contient des couches minces électriques et diélectriques et assemblé directement sur son PCB en Flip-Chip par l'intermédiaire de 49 contacts en billes (simplifiées en cubes) sous forme de matrice (7x7). Comme la montre l'image ci-dessous :

⁴ Image internet. Libre accès

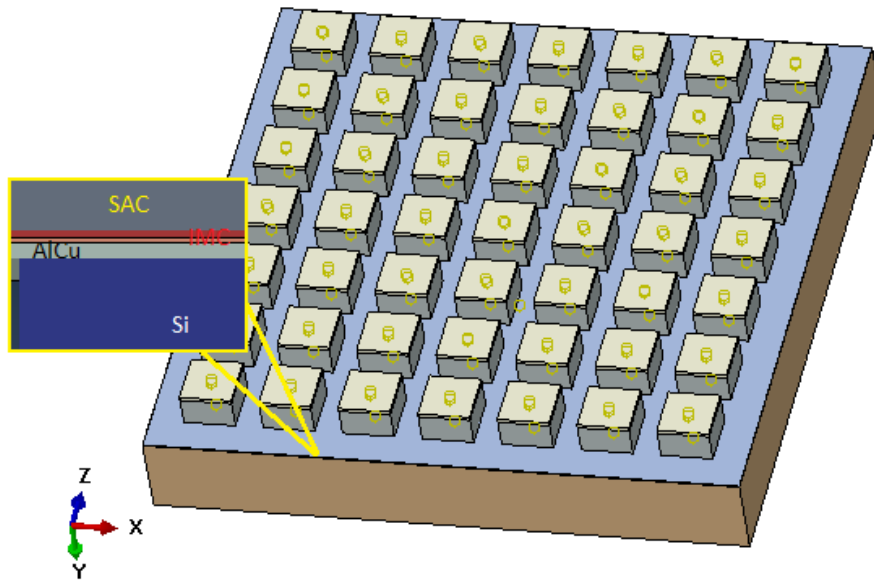


Figure 12: Représentation 3D du microcomposant de l'étude.

7. Présentation du test de flexion normalisé JEDEC

Cette partie standardise la méthode de flexion en 4 points pour la caractérisation des performances des microcomposants montés sur un circuit imprimé. La flexion cyclique est obtenue en faisant reposer le circuit imprimé sur deux appuis et en imposant le circuit imprimé vers le bas. Ceci est schématisé sur la figure suivante. La méthode de flexion en 4 points est spécifiée car elle entraîne une courbure constante de la carte entre les deux enclumes intérieures s'il n'y a pas de circuits intégrés SMT sur la carte[8].

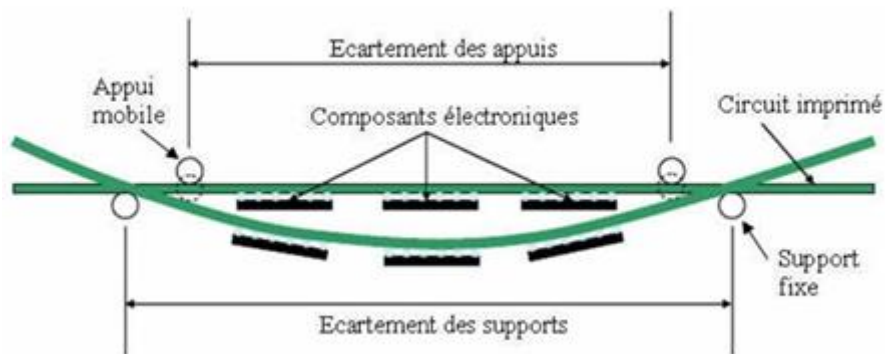


Figure 13: Schéma montrant l'installation de flexion à 4 points d'un circuit imprimé avec des composants de type FLIP-CHIP[8].

Le tableau I-1 décrit les paramètres nécessaires pour configurer la machine d'essai de flexion cyclique et les valeurs de ces paramètres sont spécifiées dans le tableau 1. Les valeurs de paramètre répertoriées sous le paramètre facultatif ne doivent pas être dépassées car cela peut entraîner un changement du mécanisme de défaillance. Pour le test de flexion cyclique, le principal est de reproduire le mécanisme de défaillance par fatigue de la soudure assurant la liaison entre les composants et le circuit imprimé.

Tableau 1 : Paramètres recommandés et optionnels pour le test de flexion cyclique à 4 pts[8]

Paramètre de flexion	Recommandation
Distance entre appuie (mm)	110
Distance entre points de charge (mm)	75
Rayon minimum de l'appui (mm)	3
Déplacement vertical des points de charge (mm)	2
Profil de charge	Sinusoïdal
Fréquence de cycle (Hz)	1

8. Présentation de l'approche numérique de l'étude

Nous utilisons des simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis pour étudier le test de flexion. Ces simulations nous permettent d'obtenir des informations détaillées sur le comportement mécanique des différents éléments constitutifs des composants testés. En analysant des données locales telles que les contraintes et les déformations nous sommes en mesure de localiser les zones de concentration de contraintes et de déformations, ainsi que de prédire les risques de défaillance.

Dans le cadre de notre travail, nous avons développé des modèles numériques dans le but d'étudier l'influence de l'épaisseur de la puce et des propriétés de la brasure sur la réponse en flexion des microcomposants électroniques. Les résultats obtenus à partir de ces simulations numériques peuvent être utilisés pour optimiser les conceptions et d'améliorer la fiabilité.

**Chapitre II : Simulation numérique d'un essai de flexion sur
des microcomposants électroniques montés sur un PCB
normalisé**

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédures suivies pour effectuer la simulation d'un test de flexion normalisé sur le modèle de l'étude. Ainsi, la modélisation géométrique, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et de chargement, et le maillage des différents éléments sont présentés.

Notre modèle est un circuit imprimé rectangulaire et symétrique comportant quinze circuits intégrés centrés Flip-Chip positionnés sur le PCB comme le montre la figure 14. Pour des raisons évidentes de simplification, le modèle 3D est transformée en modèle 2D équivalent.

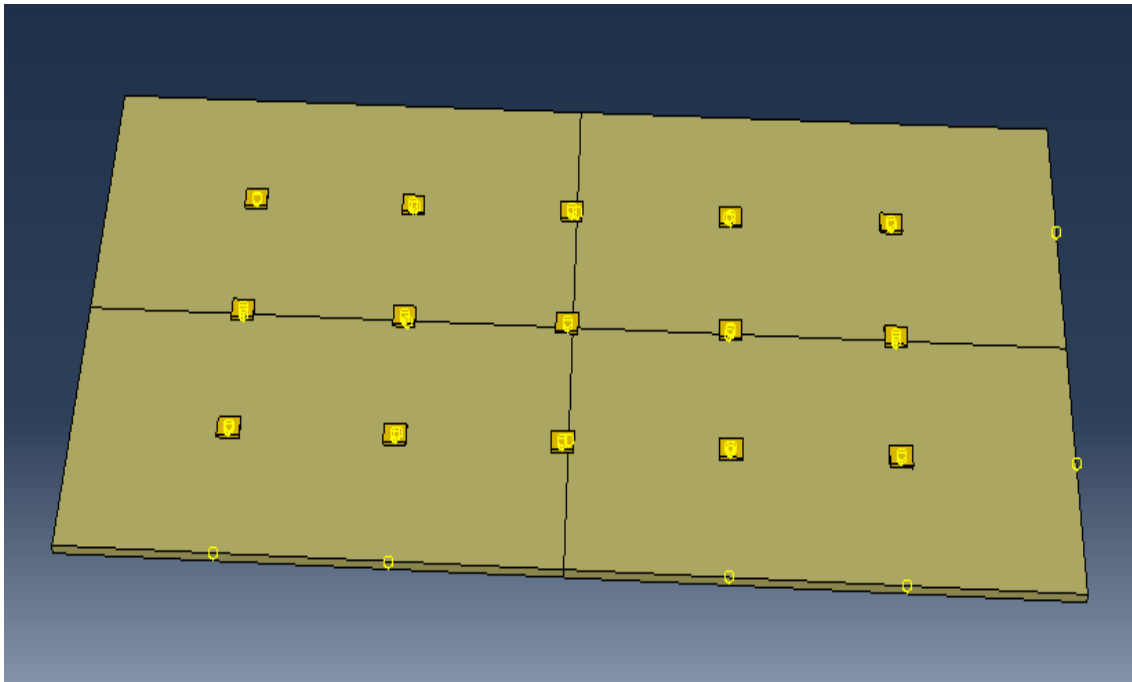


Figure 14 : Structure globale d'étude construite par ABAQUS

Notons que les simulations numériques ont été développées en utilisant le logiciel calcul ABAQUS.

2. Présentation du logiciel choisi pour l'étude :

Fondé en 1978, **ABAQUS** est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de logiciels et de services pour l'analyse par éléments finis. Sa gamme de logiciels est connue pour sa technologie de pointe, sa qualité et sa fiabilité. ABAQUS est devenu un outil essentiel dans les processus de conception des entreprises renommées de tous les secteurs industriels. Il propose les meilleures solutions pour les problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Avec ses différents produits, dont ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE, il offre un environnement complet pour l'analyse par éléments finis, offrant de nombreuses alternatives pour les opérations impliquant plusieurs fournisseurs et produits. ABAQUS est largement utilisé dans cette étude, en particulier la version ABAQUS/CAE⁵.

⁵ Plus d'informations sur <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/simulia/produits/abaqus/>

3. Présentation de la géométrie :

Pour des raisons de simplification, la structure 3D présentée par la figure 14 est remplacée par une structure équivalente 2D. Nous avons dessiné la structure globale du modèle sur le logiciel ABAQUS. Ainsi pour optimiser le temps de calcul, nous avons choisi de considérer uniquement la moitié de la structure comportant puce. La figure 15 présente le modèle géométrique.

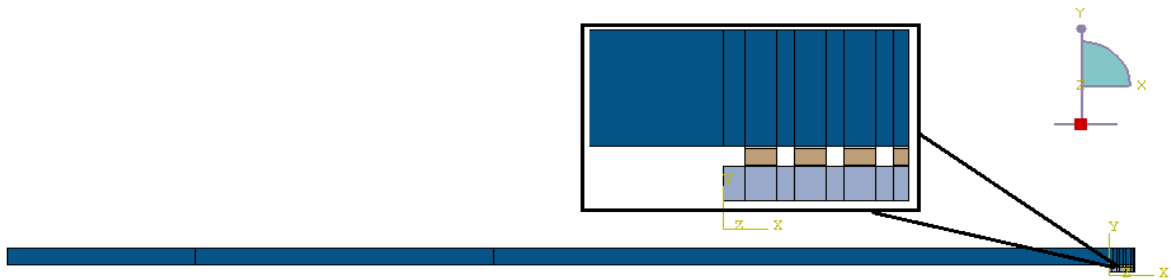


Figure 15: Géométrie modélisée en 2D

Un zoom géométrique présentant les détails des couches minces est illustré par la figure 16.

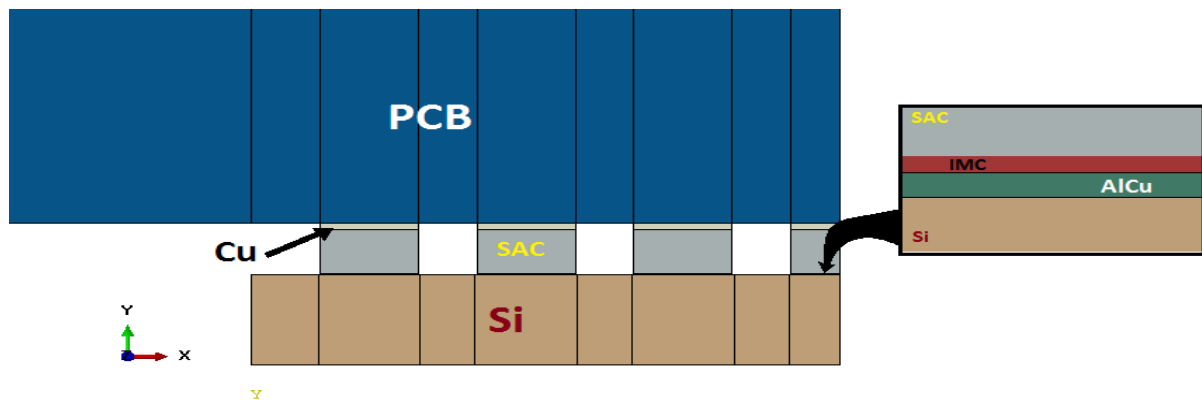
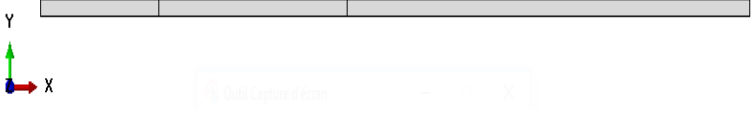
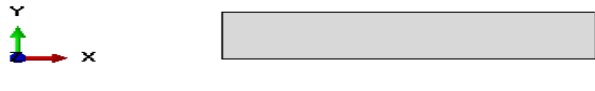





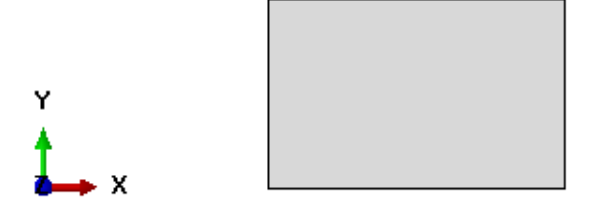


Figure 16: présentation de modèle 2D étudié

Le tableau 2 montre les pièces qui forment notre modèle simplifié et leurs dimensions.

Tableau 2: Géométrie des éléments de la structure

Pièces	Images	Dimensions (mm)
1/2 PCB		66 x 1

Si		1.5 x 0.3
		1.5 x 0.4
		1.5 x 0.5
AlCu		0.26 x 0.0015
IMC		0.25 x 0.001
Cu		0.25 x 0.02
SAC		0.25 x 0.148

4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés :

Les principales propriétés des matériaux introduites dans les simulations sont résumées sur le tableau 3. Le SAC est un matériau de brasage couramment employé en électronique pour remplacer l'alliage classique étain-plomb. Ainsi :

- SAC105 est constitué de 98% d'étain (Sn) de 1% d'argent (Ag) et de 0,5% de cuivre.

Chapitre II : Simulation numérique d'un essai de flexion sur des microcomposants électroniques montés sur un PCB normalisé

- SAC305 est constitué de 96.5% d'étain (Sn) de 3% d'argent (Ag) et de 0,5% de cuivre.
- SAC105 est constitué de 95.5% d'étain (Sn) de 4% d'argent (Ag) et de 0,5% de cuivre.

Tableau 3: Propriétés mécaniques des éléments de la structure

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
SAC305	39,5	0.3	20	0
			35	0.004
			40	0.006
			48	0.04
SAC405	42	0.3	15	0
			30	0.003
			40	0.018
			43	0.055
Si	131	0.3		

IMC	92	0.33		
AlCu	71	0.33	280	0

5. Conditions aux limites et de chargement :

Nous avons imposé les conditions de symétrie suivant l'axe X et les charges verticales de flexion d'une valeur égale à -2mm suivant l'axe Y et une fixation des appuis sur le même axe comme les montres les figures suivantes :



Figure 17: Conditions aux limites (symétrie)

Un blocage en déplacement le long de l'axe y (flèche verte) et un déplacement imposé de 2mm (flèche rouge). :

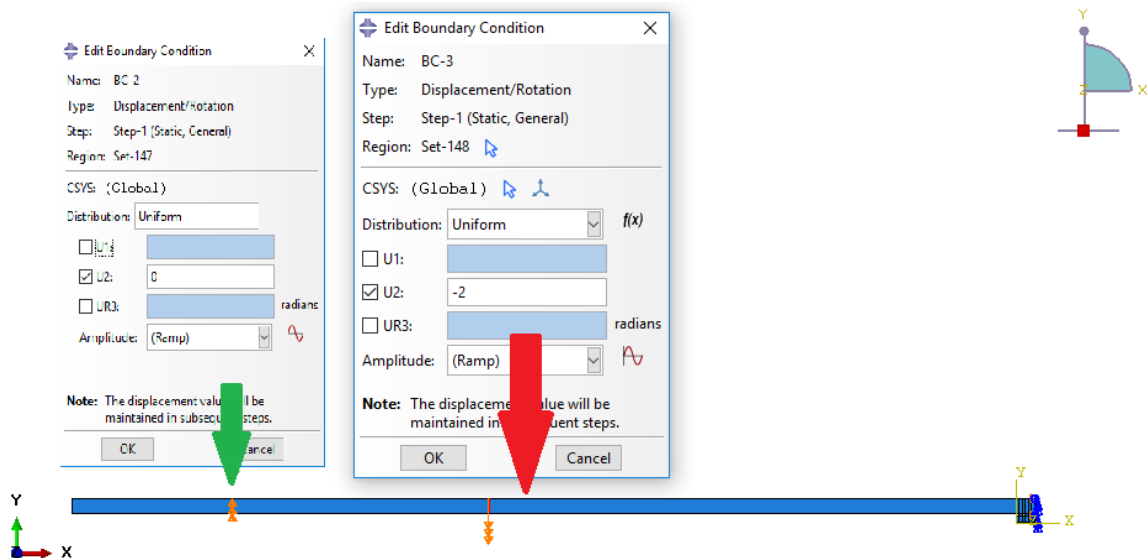


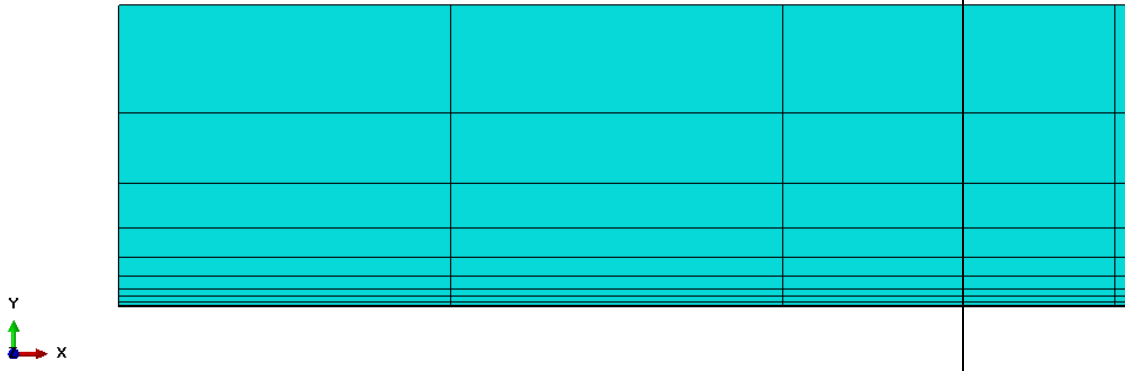
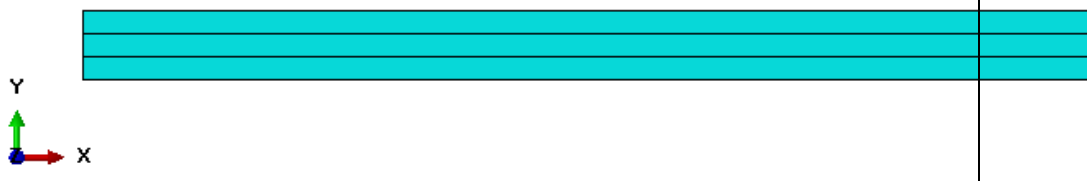
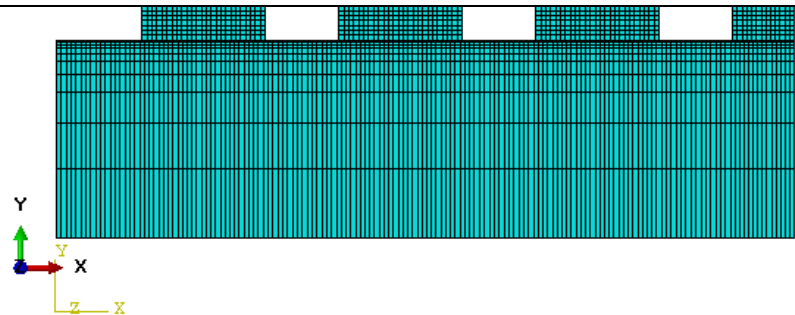
Figure 18: Déplacement imposé en flexion.

6. Maillage :

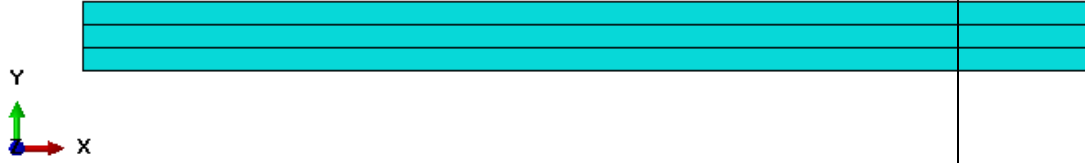
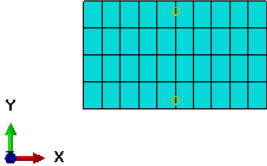
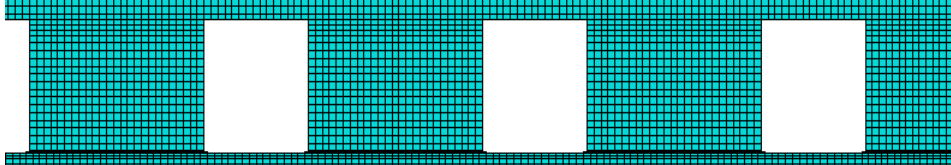
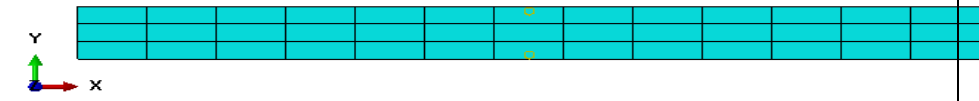
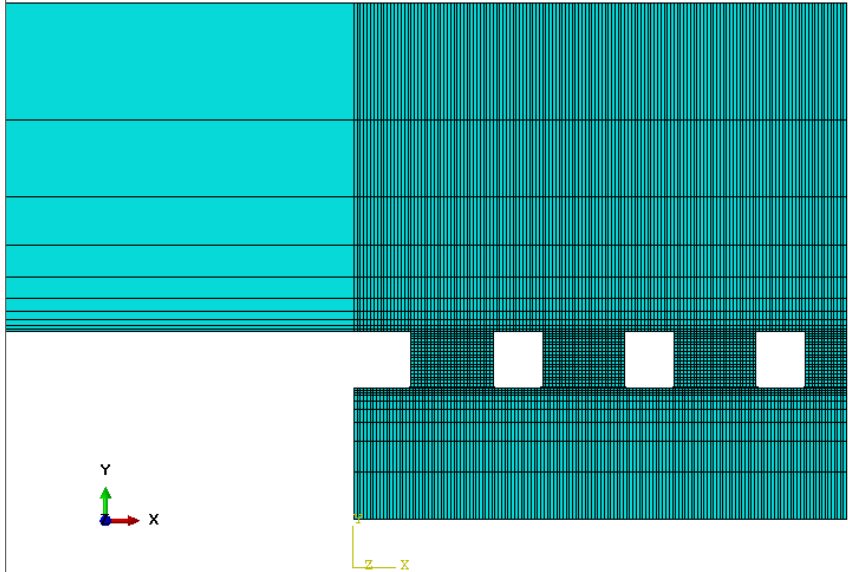
Dans le cadre de notre analyse, nous avons réalisé un maillage ciblé. Cela nous permet d'avoir plus de précision dans certaine zone de la structure. Des composantes de notre géométrie sont des couches minces de l'ordre du micron. Donc il est nécessaire d'utiliser un maillage approprié.

Ci-dessous un tableau qui représente les éléments et leurs maillages :

Tableau 4: Maillages des éléments de la structure.

Pièces	Maillages
PCB	 <p>The image shows a 2D mesh of a PCB layer. It consists of a grid of rectangular elements. The mesh is denser in the central region and becomes coarser towards the edges. A coordinate system is shown with the Y-axis pointing up (green arrow) and the X-axis pointing right (red arrow).</p>
AlCu	 <p>The image shows a 2D mesh of an AlCu layer, which is a thin horizontal strip. The mesh is composed of a few layers of rectangular elements. A coordinate system is shown with the Y-axis pointing up (green arrow) and the X-axis pointing right (red arrow).</p>
SI	 <p>The image shows a 2D mesh of a substrate (SI) layer. It features a dense grid of rectangular elements. The mesh is significantly denser in the upper portion, where there are several rectangular cutouts or features. A coordinate system is shown with the Y-axis pointing up (green arrow), the X-axis pointing right (red arrow), and the Z-axis pointing out of the page (yellow arrow).</p>

Chapitre II : Simulation numérique d'un essai de flexion sur des microcomposants électroniques montés sur un PCB normalisé

<p>IMC</p>	
<p>SAC</p>	 
<p>CU</p>	
<p>Structure assemblée</p>	

7. Interface

Nous avons fait le choix de considérer modèle comme étant une seule pièce constituée de plusieurs matériaux. L'approche « Merge instances » offerte par Abaqus a été employée. Les interfaces sont donc considérées en contact parfait.

8. Technique de calcul :

Le test de flexion préconisé par la norme JEDEC est un test répété. Pour se rapprocher le plus fidèlement de l'approche numérique, une simulation dynamique est nécessaire. La complexité de la microstructure et la non disponibilité des moyens adéquats (stations de calcul) nous a poussé à simplifier le calcul dynamique en calcul statique. Un seul cycle de chargement est donc modélisé. Ce choix de simplification n'impacte pas les résultats puisque nous menons des comparaisons entre plusieurs solution géométriques.

9. Résultats attendus de la simulation :

Nous avons étudié les effets suivants :

- Effet de l'épaisseur de la puce en Si ($e=0.3\text{mm}$; $e=0.4\text{mm}$ et $e=0.5\text{mm}$).
- Effet du matériau de la brasure (SAC105, SAC305 et SAC405).

Les effets de ces deux paramètres sur la réponse en flexion du microcomposant de l'étude sont mis en évidence par des comparaisons des contraintes équivalentes de Von Mises relevées sur les éléments élastiques. Des comparaisons des déformations plastiques des éléments dont le comportement est élastoplastique sont également menées.

Chapitre III : Résultats numériques, discussions et perspectives

1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus par les simulations numériques. Nous rappelons que trois épaisseurs de silicium sont modélisés (0.3, 0.4 et 0.5mm). Les modèles correspondants sont nommés Si0.3, Si0.4 et Si0.5. Trois matériaux de brasure sont également considérés (SAC105, SAC305 et SAC405).

2. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises

Les figures qui suivent présentes les répartitions des contraintes équivalentes de van mises dans tous les éléments de chaque modèle. Commençons par le Silicium de 0,3mm d'épaisseur avec tous les SAC puis le modèle Si0.4 et Si0.5.

2.1. Le Si0.3

A) Avec SAC105 :

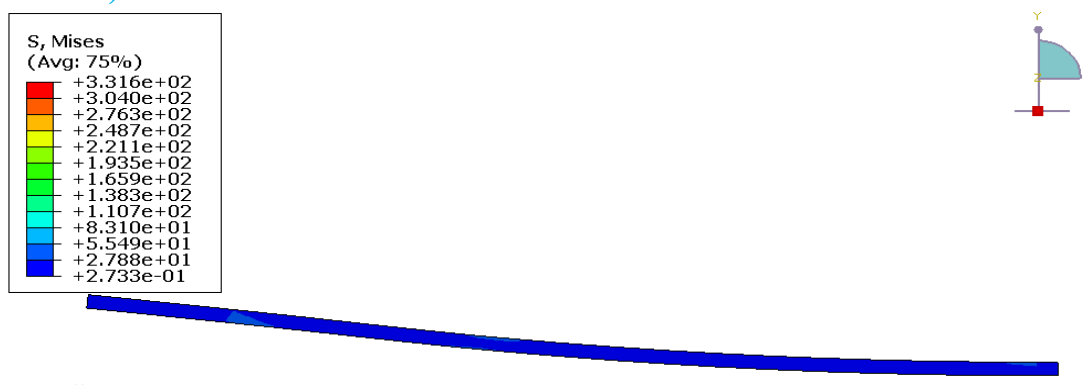


Figure 19: Contraintes V.Mises du PCB du modèle Si0.3-SAC105

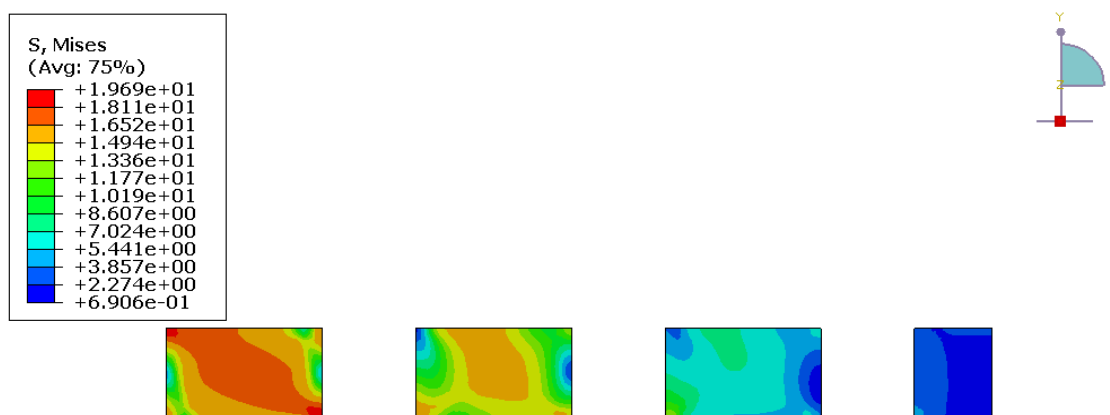


Figure 20: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC105

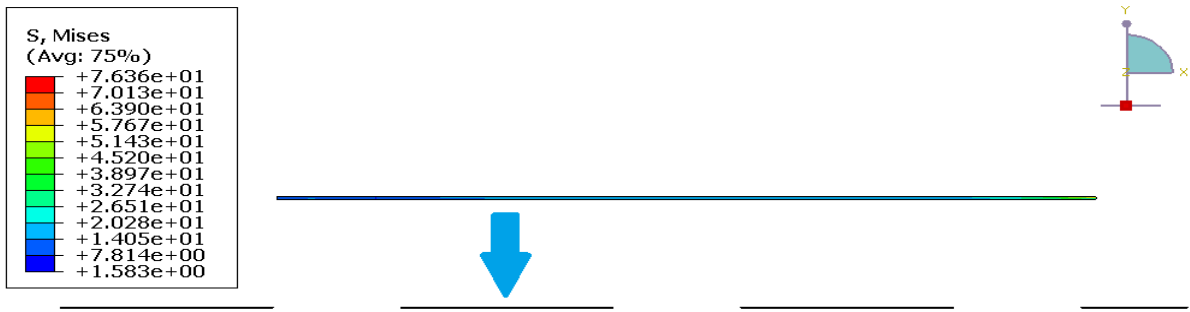


Figure 21: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC105

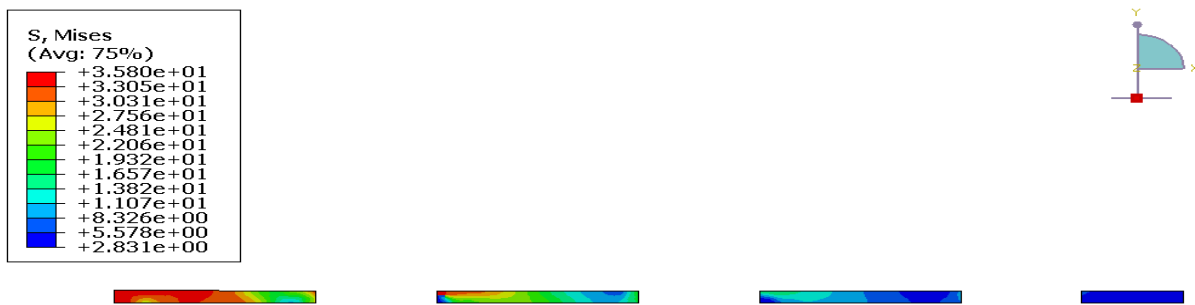


Figure 22: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC105

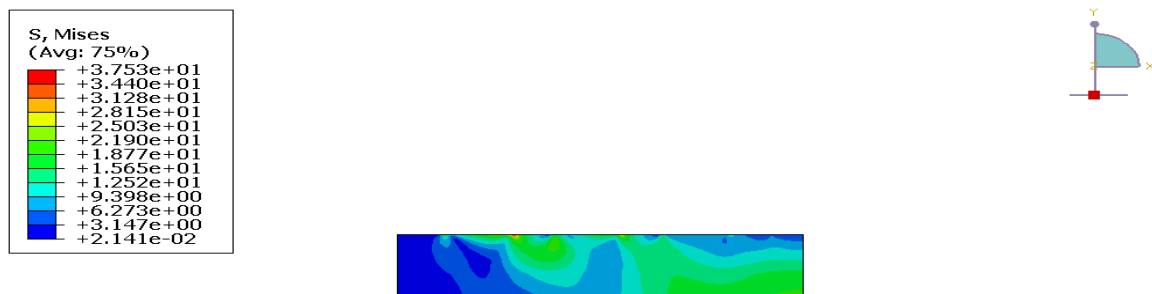


Figure 23: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC105

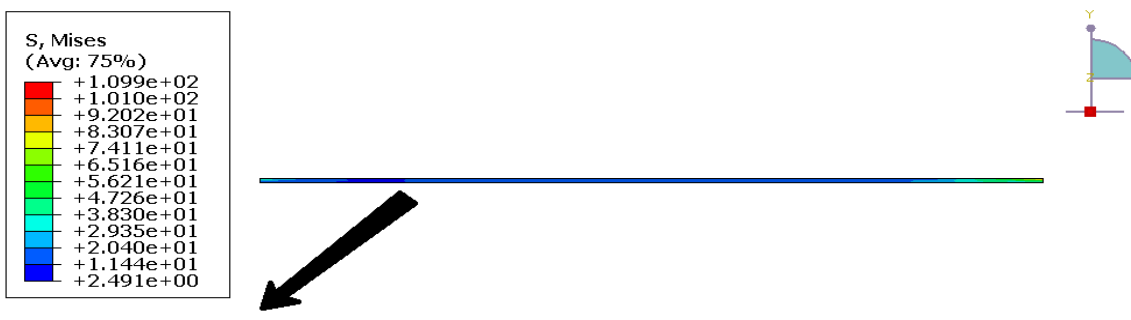


Figure 24: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC105

B) Avec SAC305 :

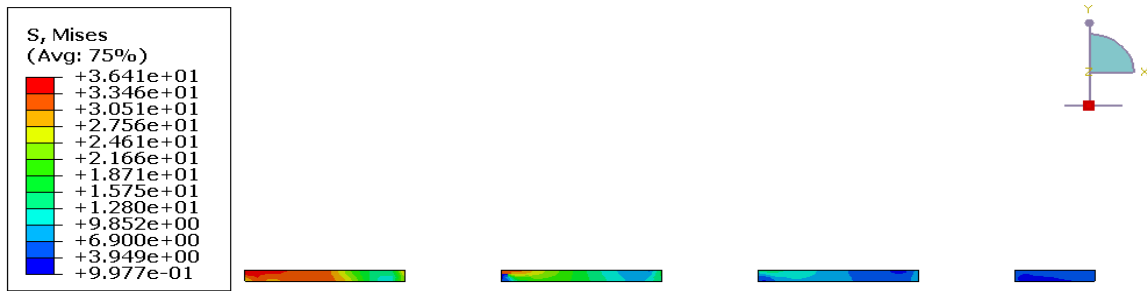


Figure 25: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC305

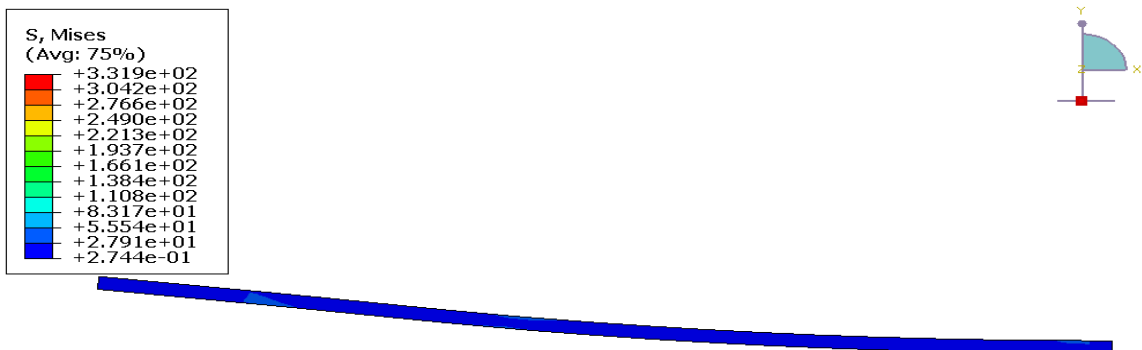


Figure 26: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.3-SAC305

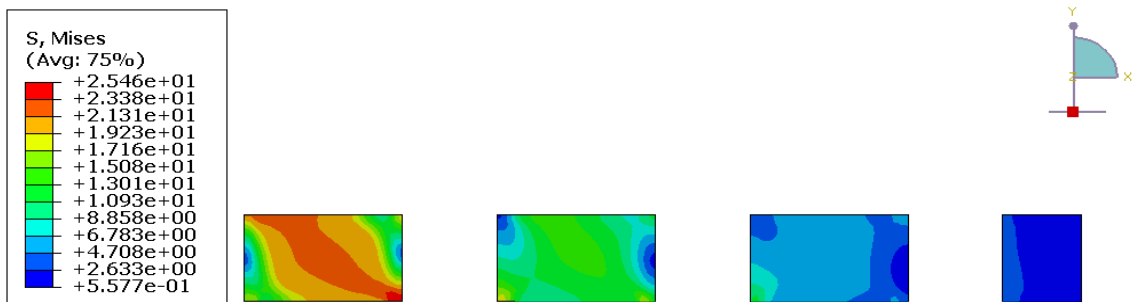


Figure 27: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC305

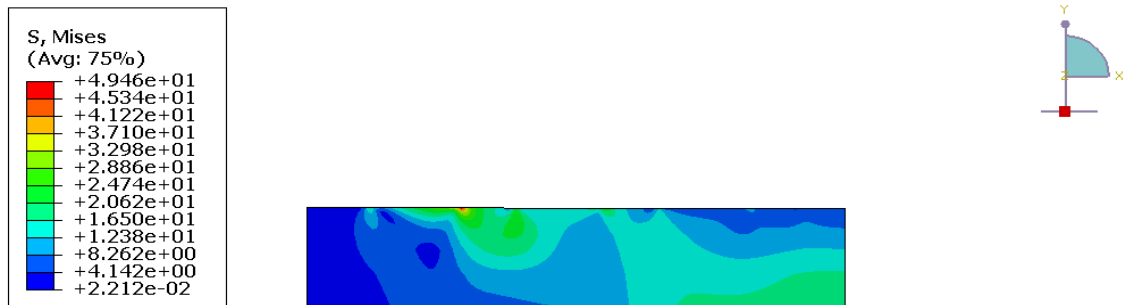


Figure 28: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC305

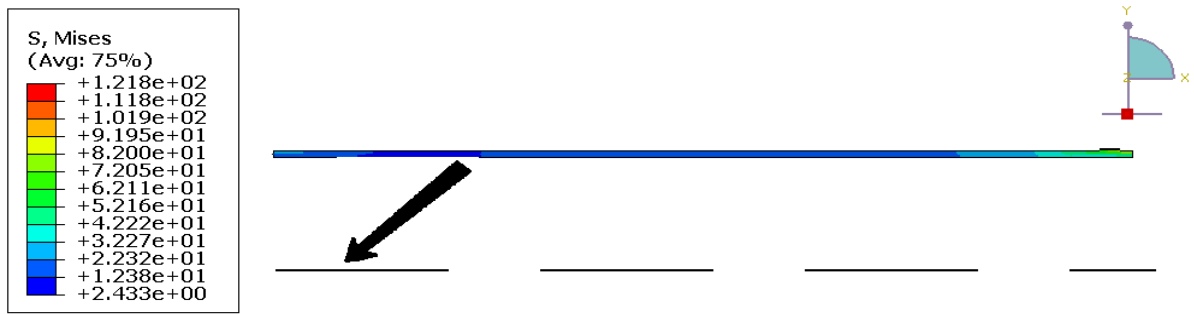


Figure 29: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC305

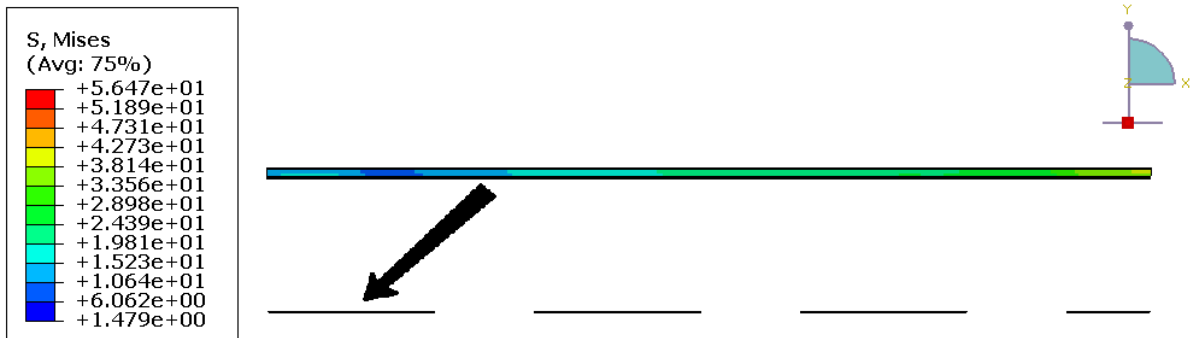


Figure 30: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC305

C) Avec SAC405 :

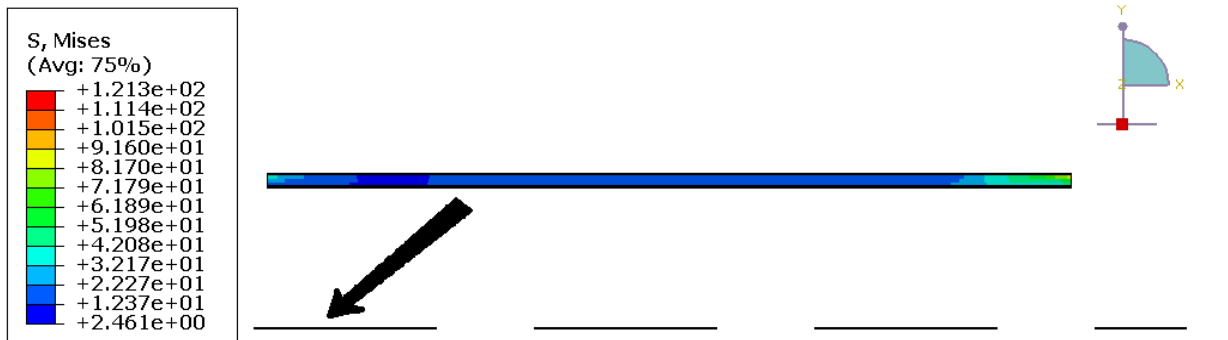


Figure 31: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.3-SAC405

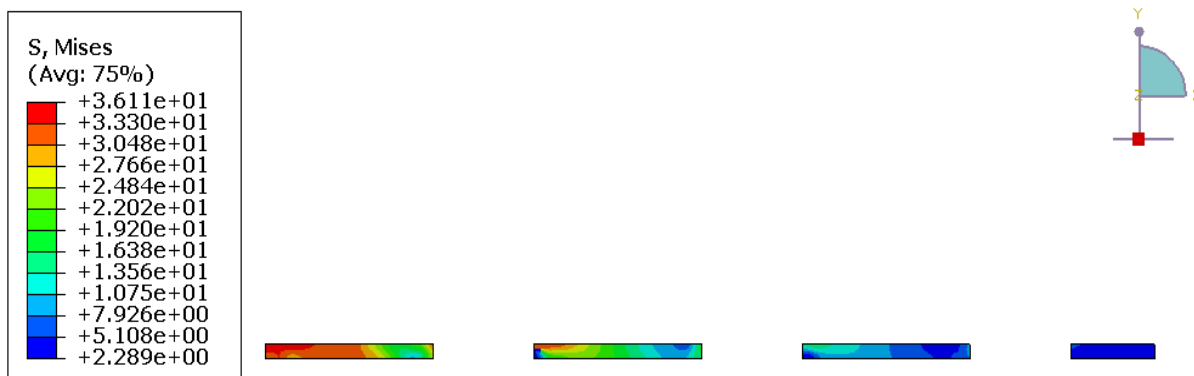


Figure 32: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.3-SAC405

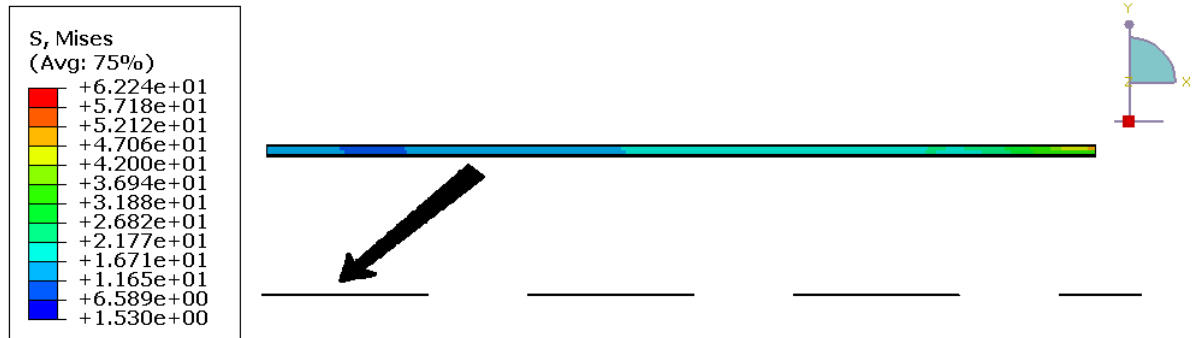


Figure 33: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.3-SAC405

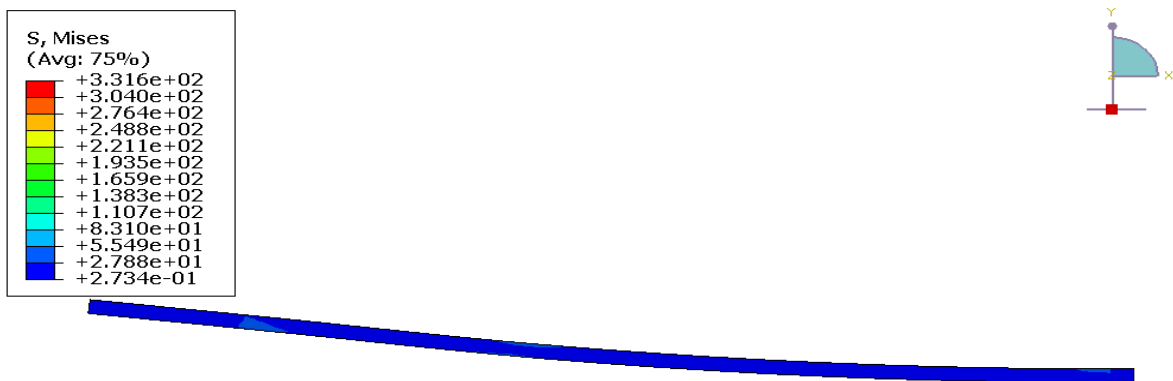


Figure 34: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.3-SAC405

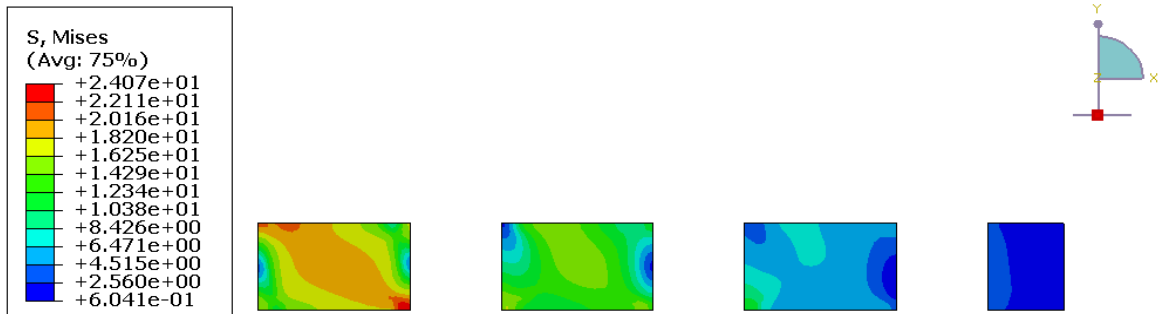


Figure 35: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.3-SAC405

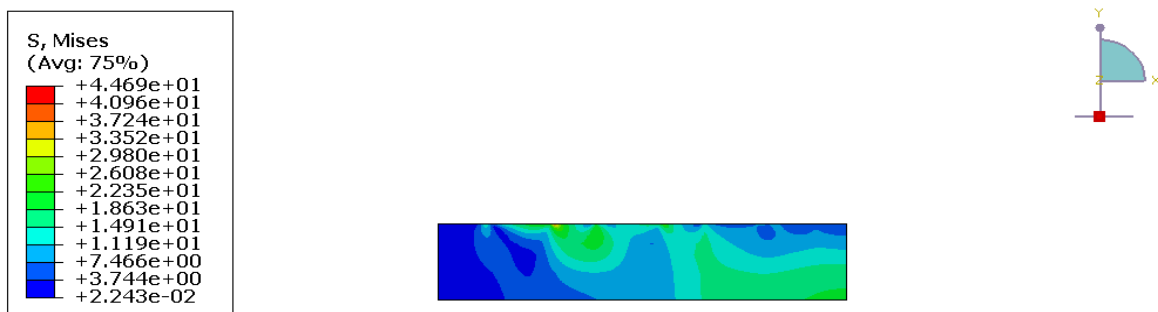


Figure 36: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.3-SAC405

2.2. Le Si0.4

A) Avec SAC105 :



Figure 37: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-SAC105

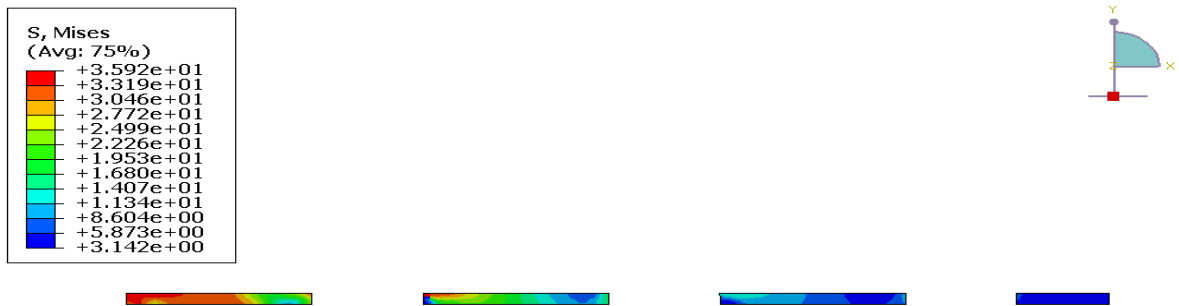


Figure 38: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-SAC105

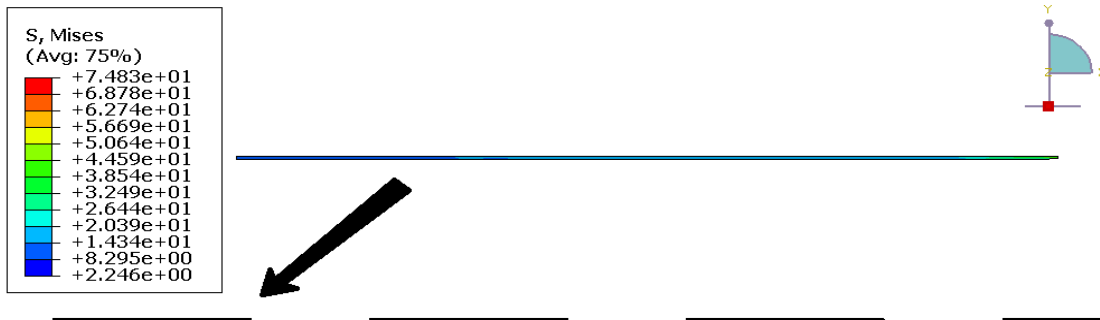


Figure 39: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-

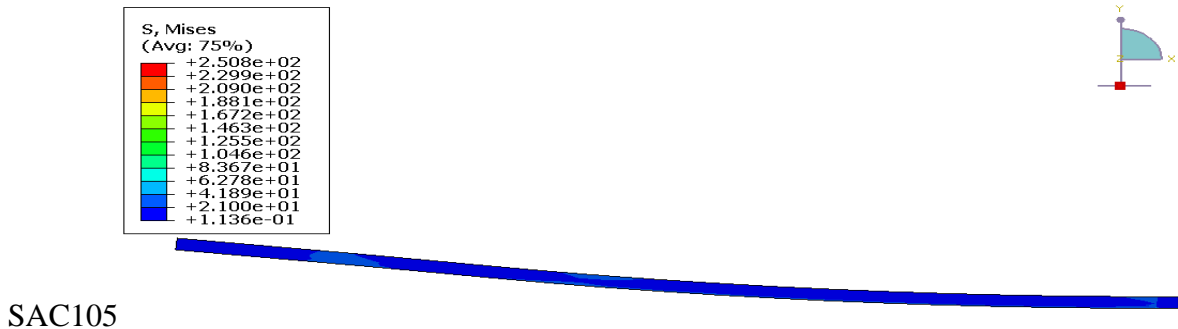


Figure 40: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC105

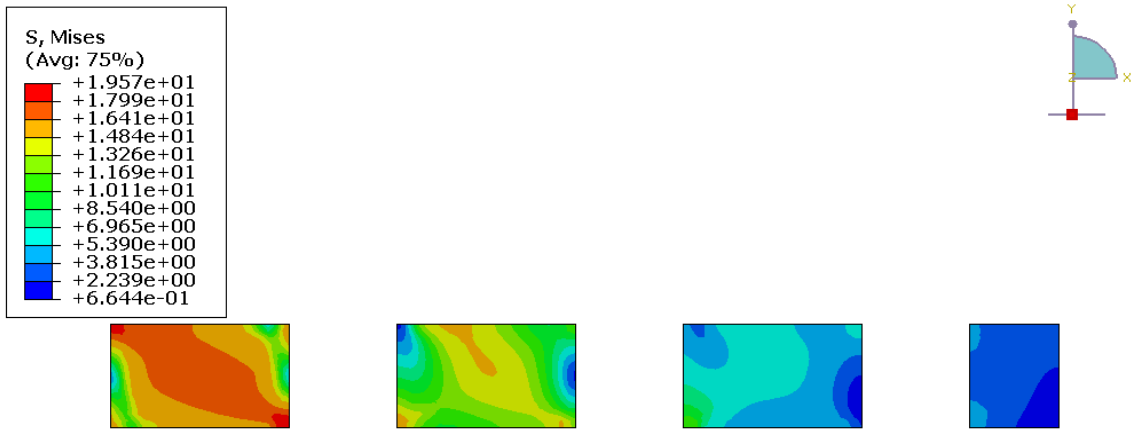


Figure 41: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC105

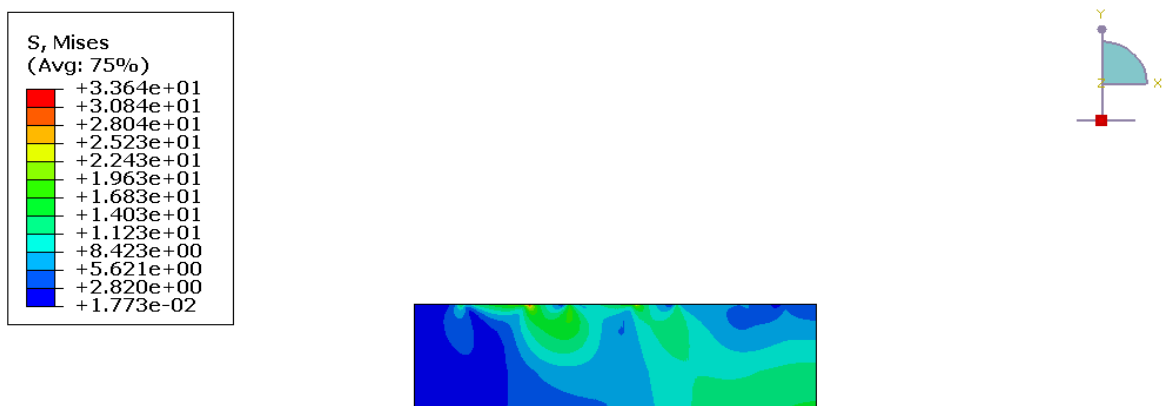


Figure 42: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC105

A) Avec SAC305 :

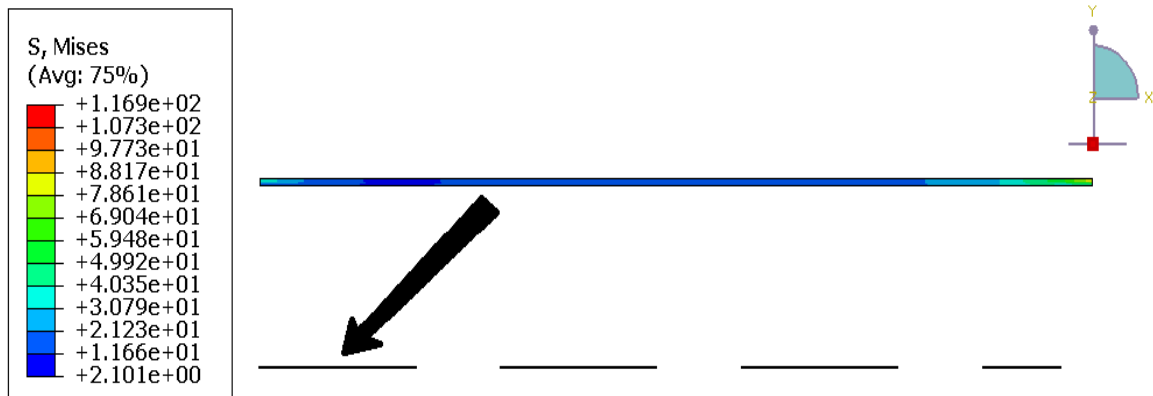


Figure 43: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-SAC305

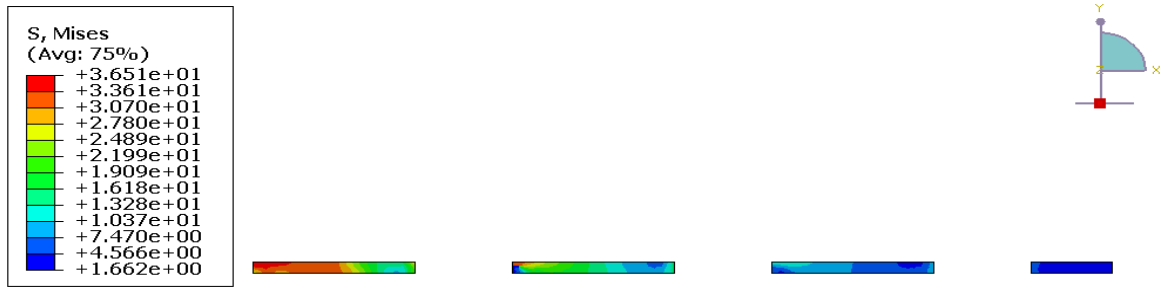


Figure 44: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-SAC305

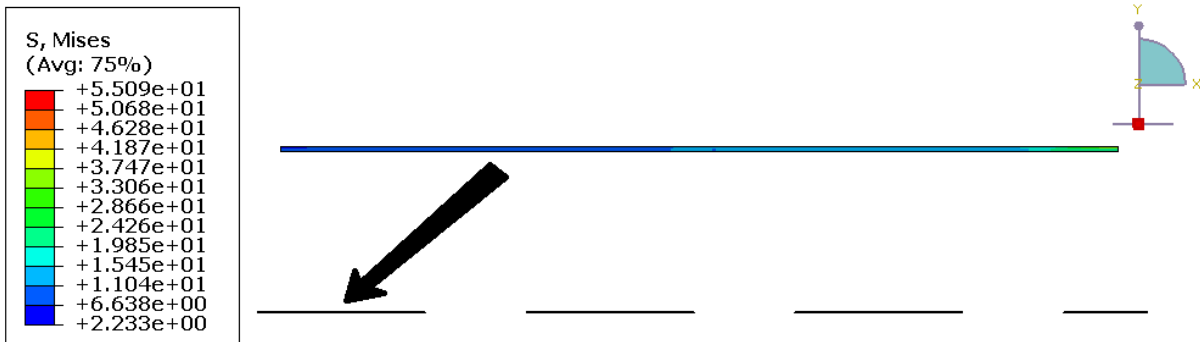


Figure 45: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-SAC305

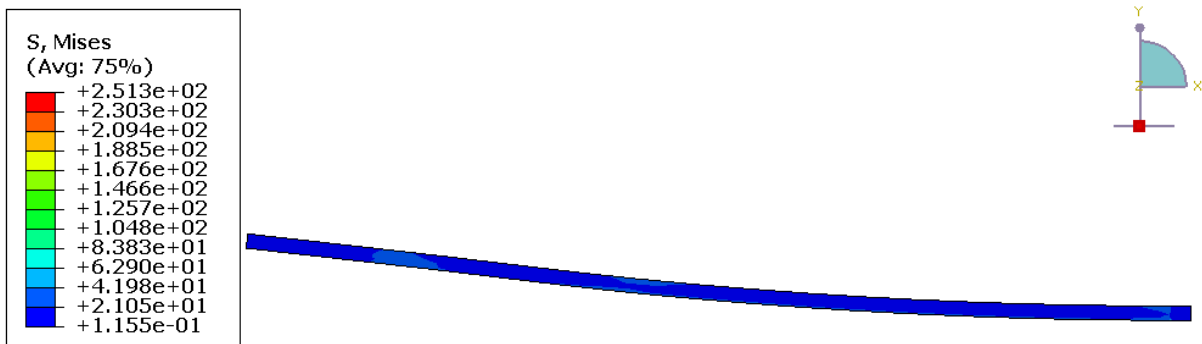


Figure 46: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC305

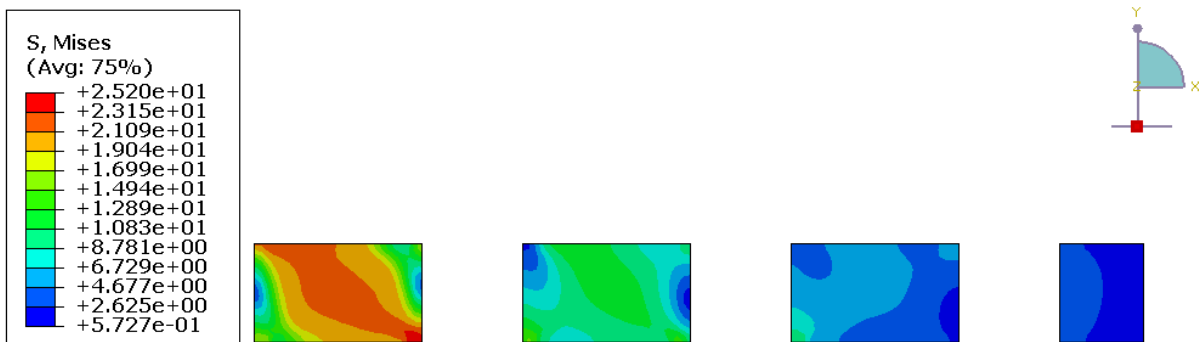


Figure 47: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.4-SAC305

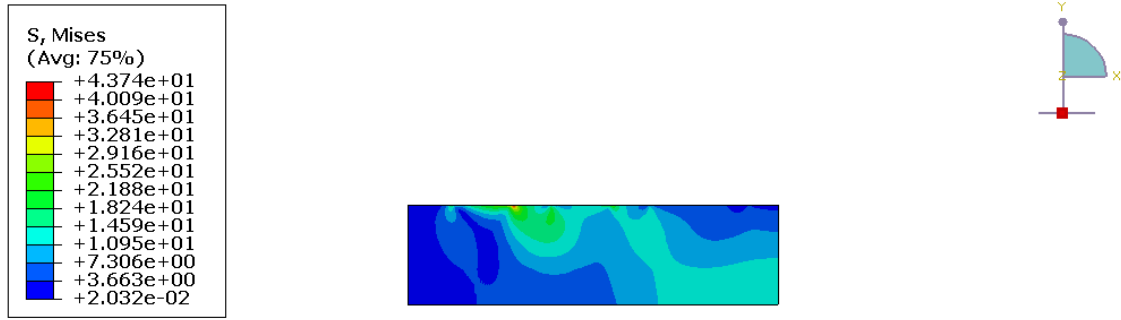


Figure 48: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC305

B) Avec SAC 405 :

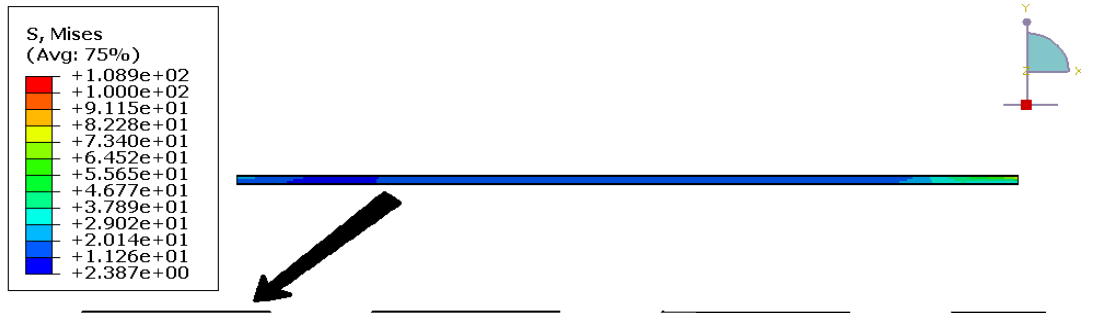


Figure 49: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.4-

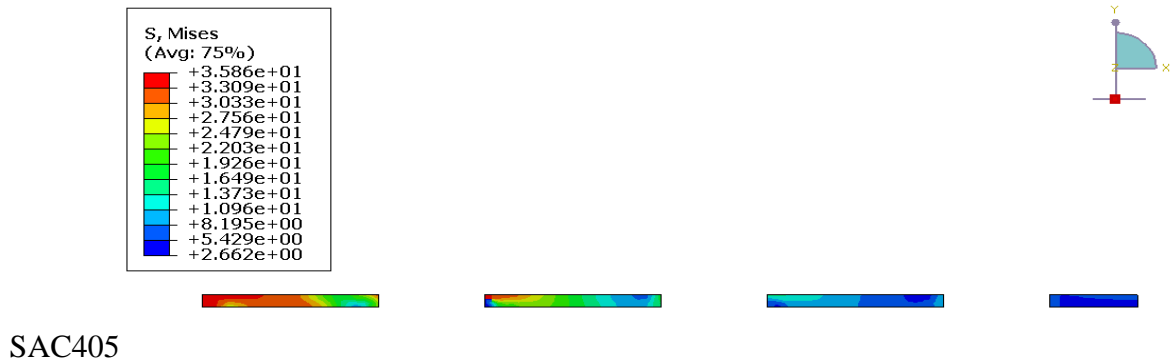


Figure 50: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.4-

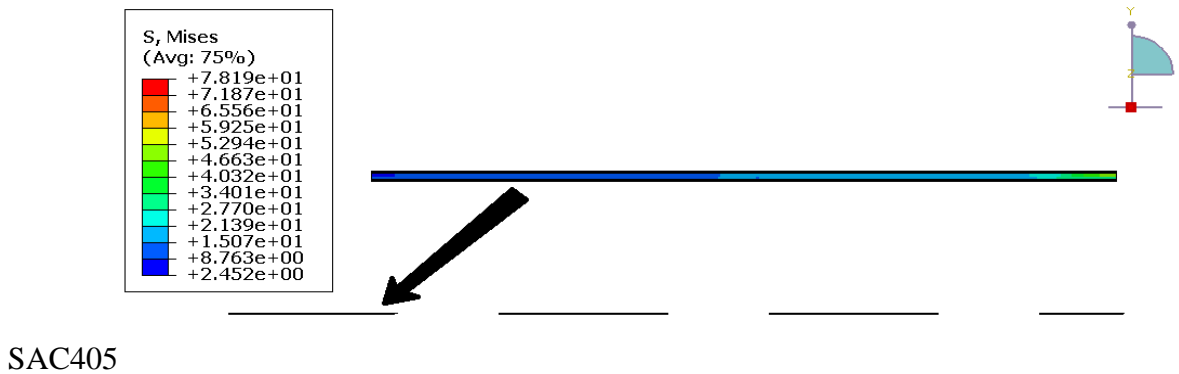


Figure 51: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.4-SAC405

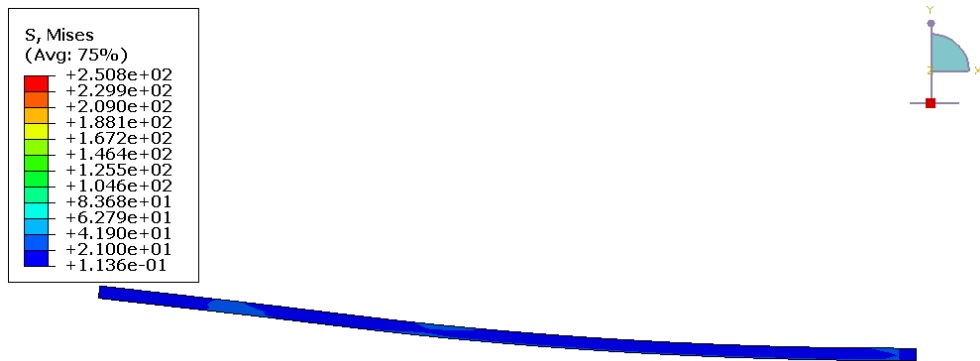


Figure 52: Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.4-SAC405

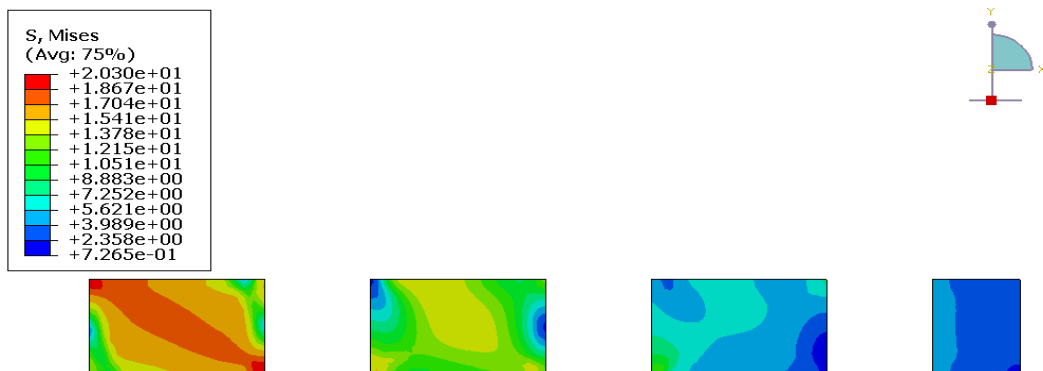


Figure 53: Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.4-SAC405

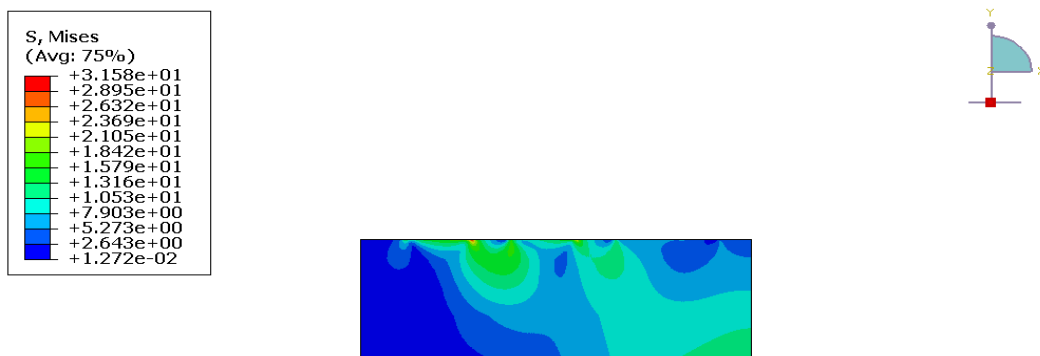


Figure 54: Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.4-SAC405

2.3. Le Si0.5

A) Avec SAC105 :

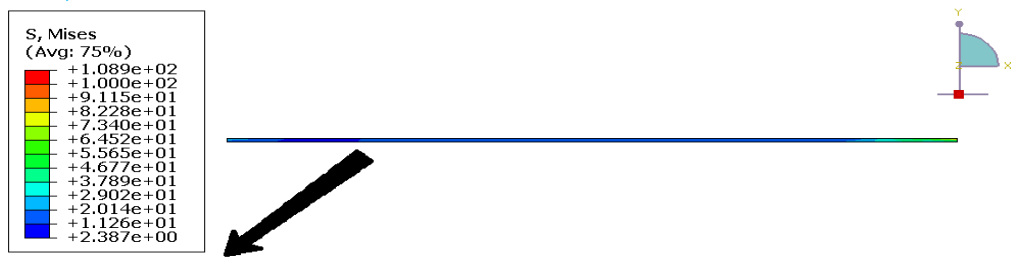


Figure 55: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105

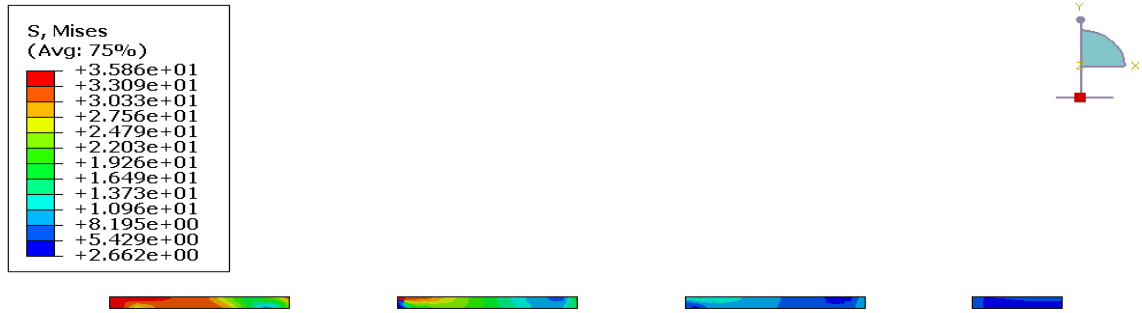


Figure 56: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC105

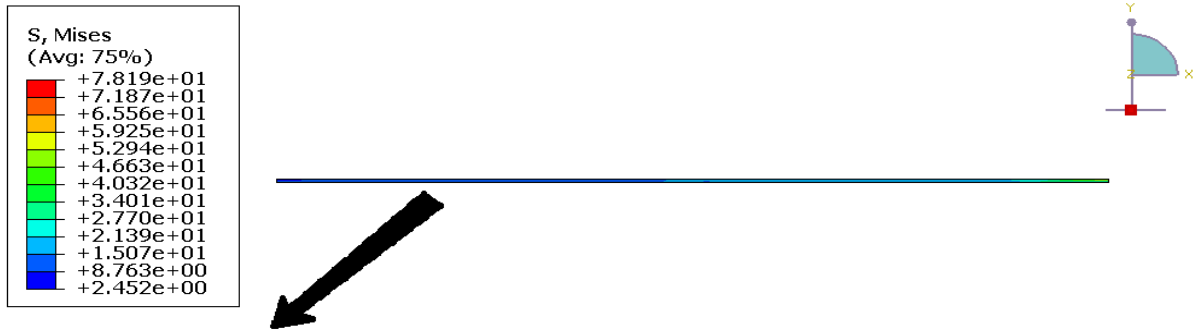


Figure 57: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105

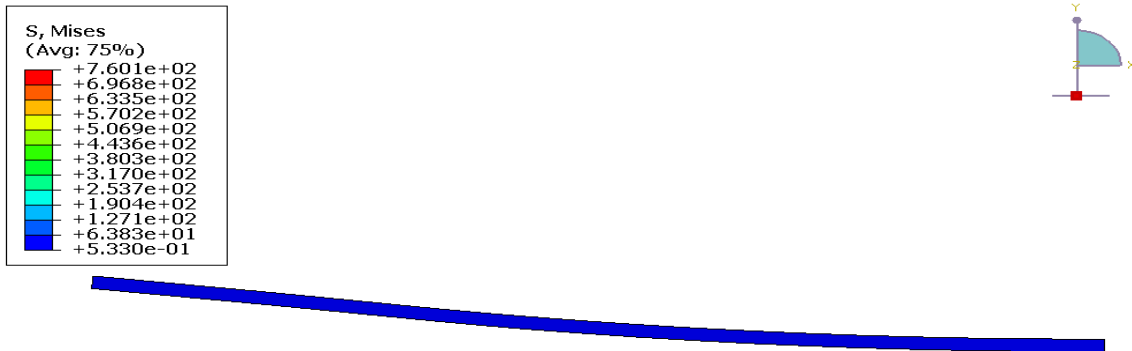


Figure 58: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-

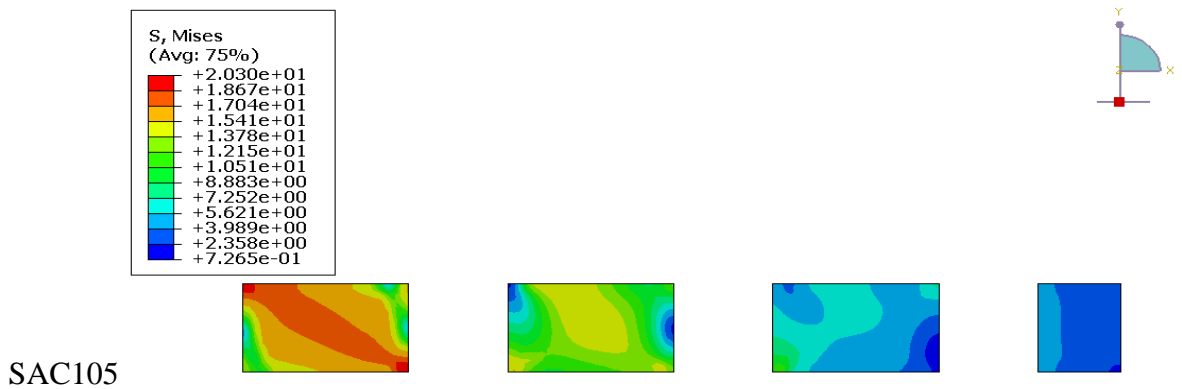


Figure 59: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105

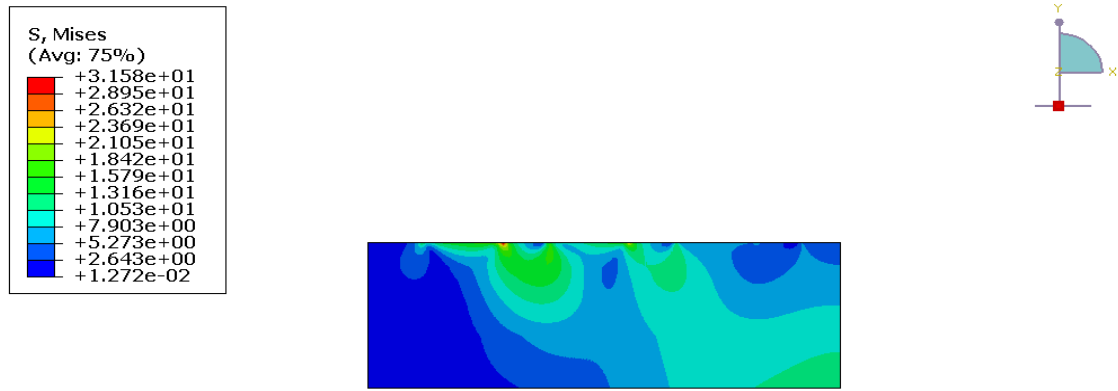


Figure 60: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC105

B) Avec SAC305 :

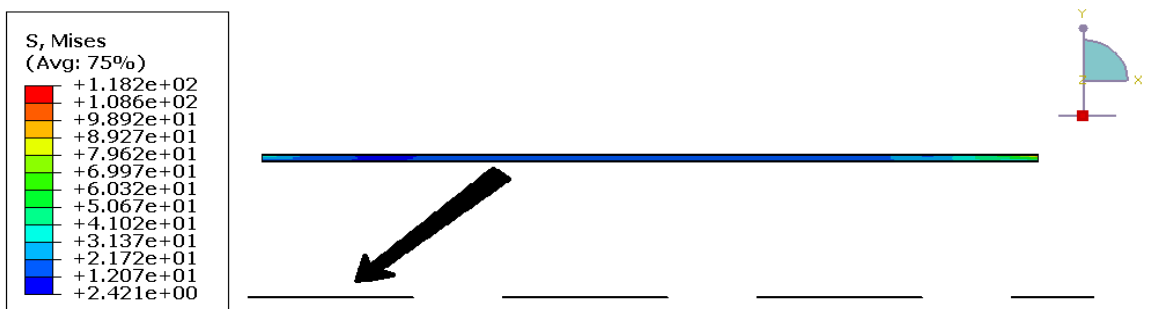


Figure 61: Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC305

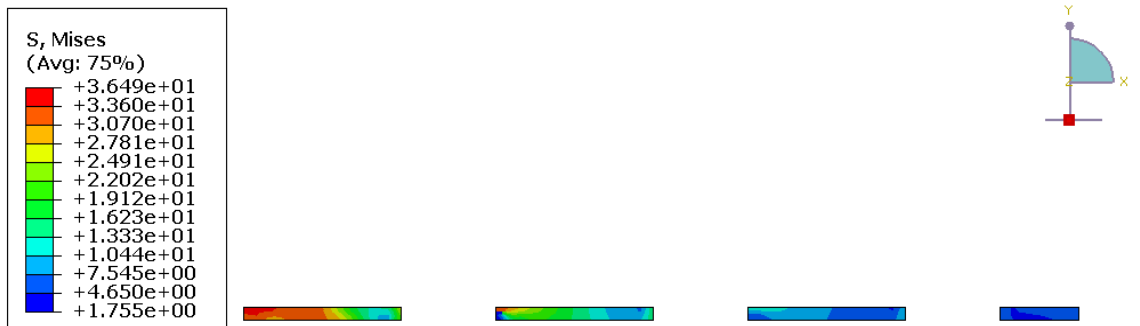


Figure 62: Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC305

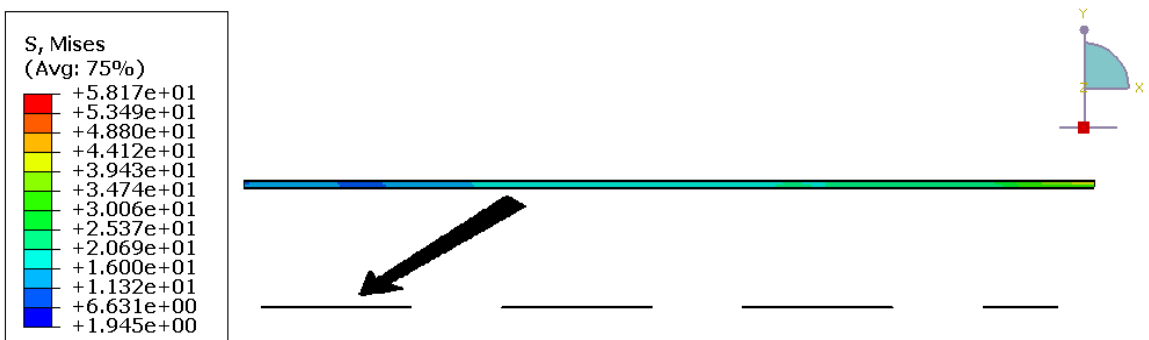


Figure 63: Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.5-SAC305

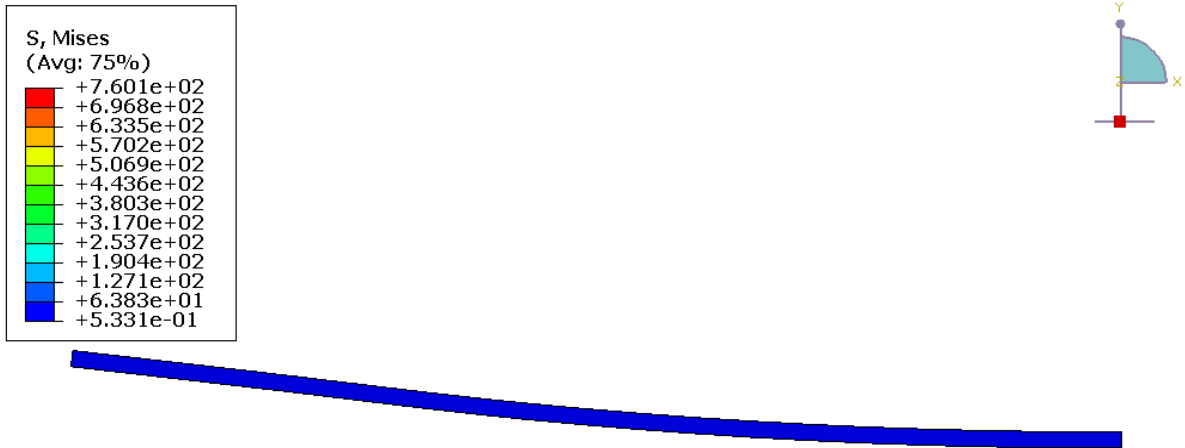


Figure 64 : Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.5-SAC305

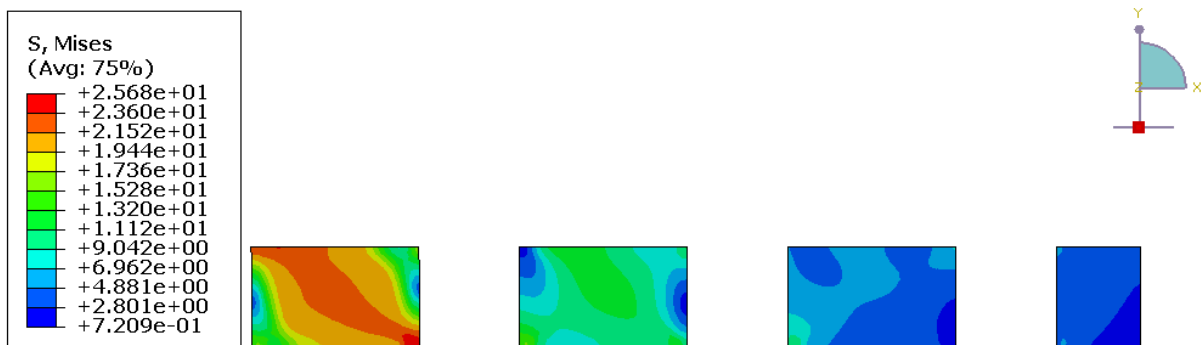


Figure 65 : Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.5-SAC305

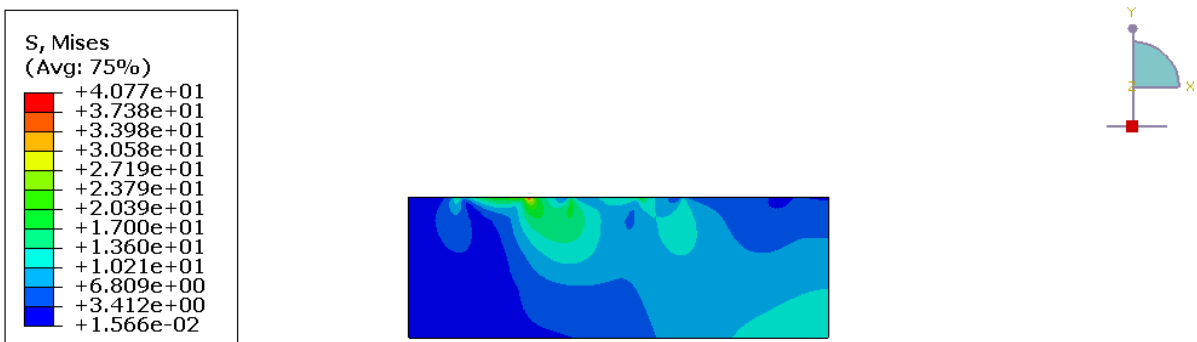


Figure 66 : Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.5-SAC305

C) Avec SAC 405 :

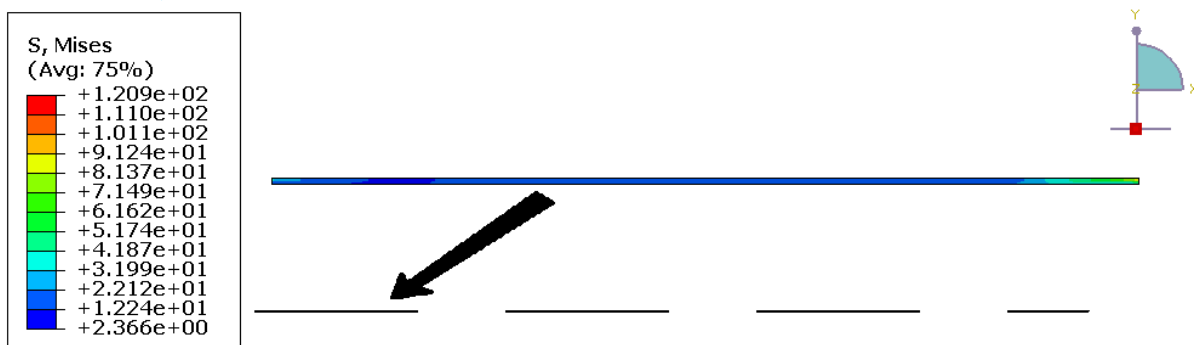


Figure 67 : Contraintes V.Mises de AlCu du modèle Si0.5-SAC405

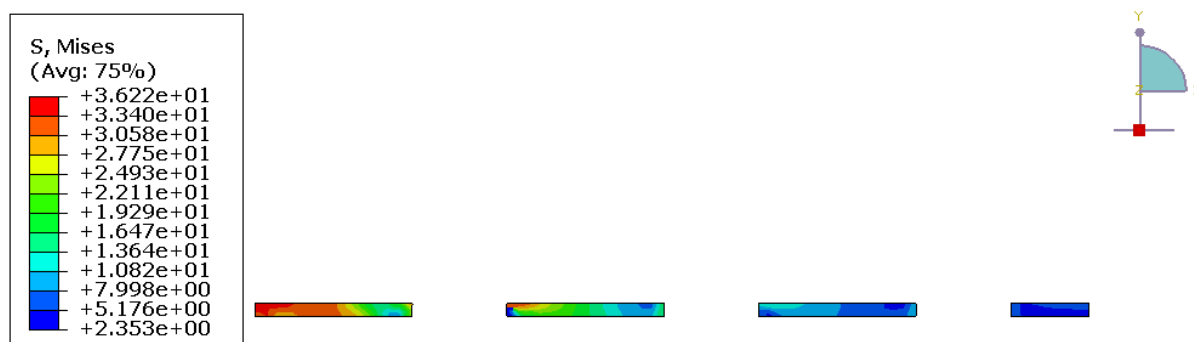


Figure 68 : Contraintes V.Mises de Cu du modèle Si0.5-SAC405

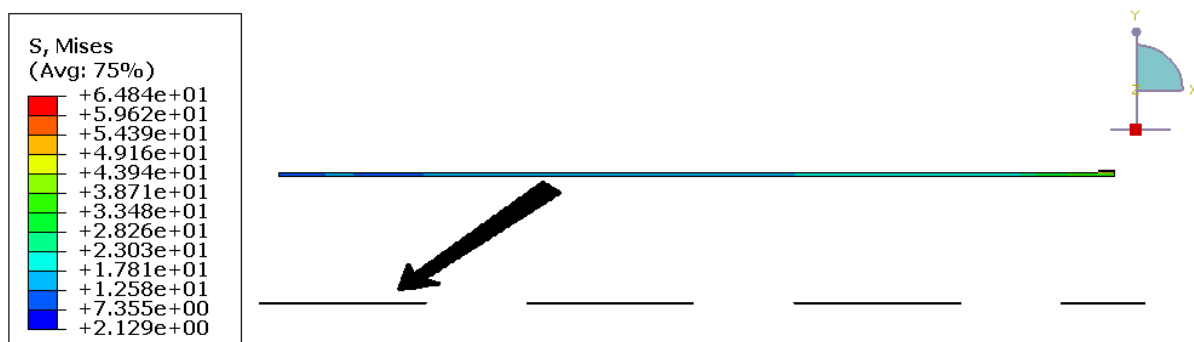


Figure 69 : Contraintes V.Mises de IMC du modèle Si0.5-SAC405

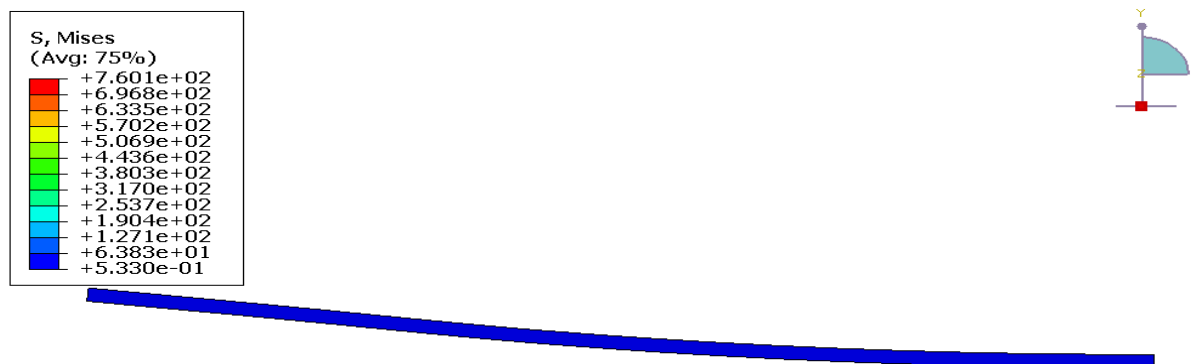


Figure 70 : Contraintes V.Mises de PCB du modèle Si0.5-SAC405

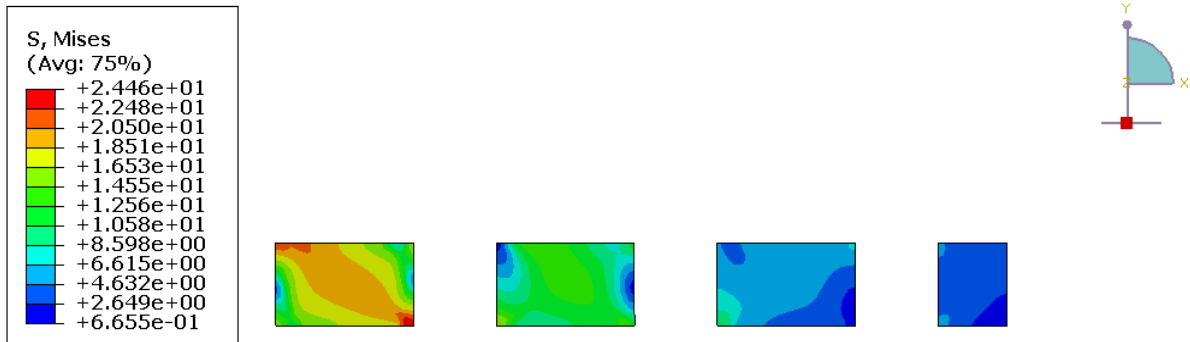


Figure 71 : Contraintes V.Mises de SAC du modèle Si0.5-SAC405

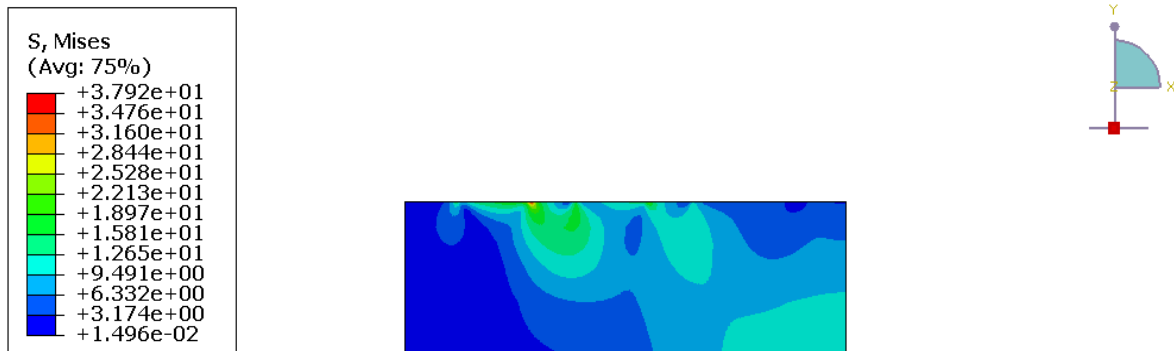


Figure 72 : Contraintes V.Mises de Si du modèle Si0.5-SAC405

Les répartitions des contraintes équivalentes maximales de Von Mises dans les éléments constituant l'assemblage montrent clairement que :

- L'épaisseur des puces ne présente pas d'impact significatif sur les zones présentant les valeurs maximales de contraintes (zones rouges). Quel que soit l'épaisseur de la puce, les zones à forte concentration de contrainte demeurent identiques pour l'ensemble des éléments (PCB, IMC, AlCu, Cu et SAC).
- Les valeurs des contraintes maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce.
- Le matériau de la brasure ne présente pas d'impact significatif sur les zones présentant les valeurs maximales de contraintes (zones rouges). Quel que soit le matériau de la brasure (SAC105, SAC305 et SAC405), les zones à forte concentration de contrainte demeurent identiques pour l'ensemble des éléments (PCB, IMC, AlCu, Cu et SAC).
- Les valeurs des contraintes maximales sont sensibles au matériau de la brasure.

3. Répartition des déformations plastiques (cuivre et SAC)

Parmi les six matériaux qui constituent le modèle, il y a juste le Cuivre et le SAC qui ont un comportement plastique. Les figures suivantes illustrent les effets de l'épaisseur de la puce et le matériau de la brasure sur les déformations plastiques maximales exprimées en pourcentage [%].

3.1. Le Si 0.3

D) Avec SAC105 :

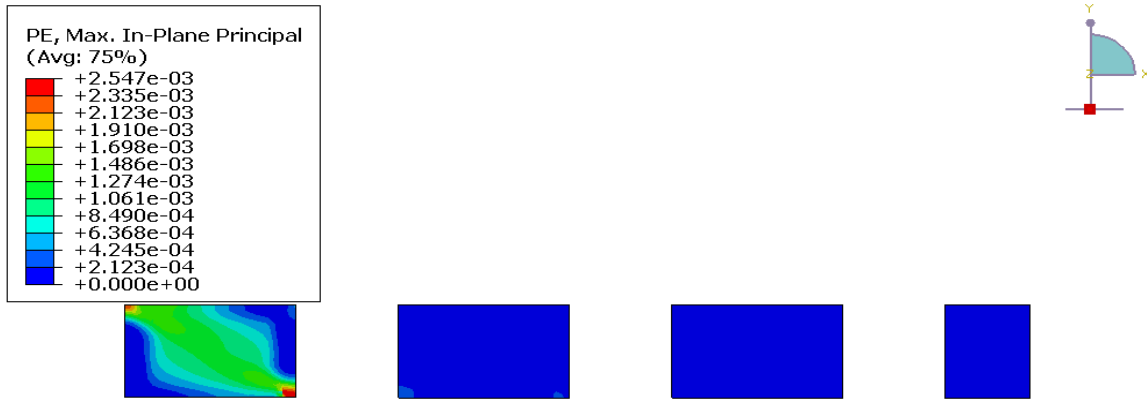


Figure 73: Déformation plastique du SAC105 avec Si0.3

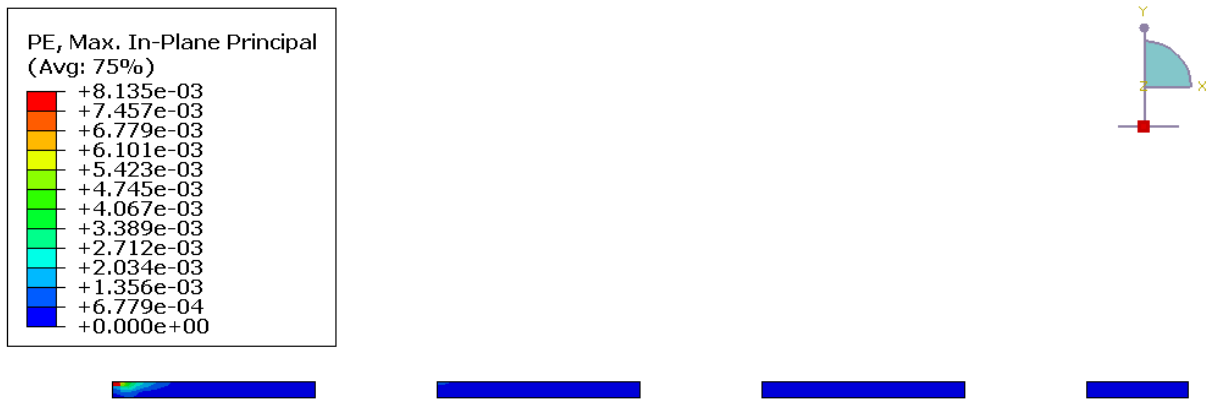


Figure 74: Déformation plastique du Cuivre avec Si0.3-(SAC105)

E) Avec SAC305 :

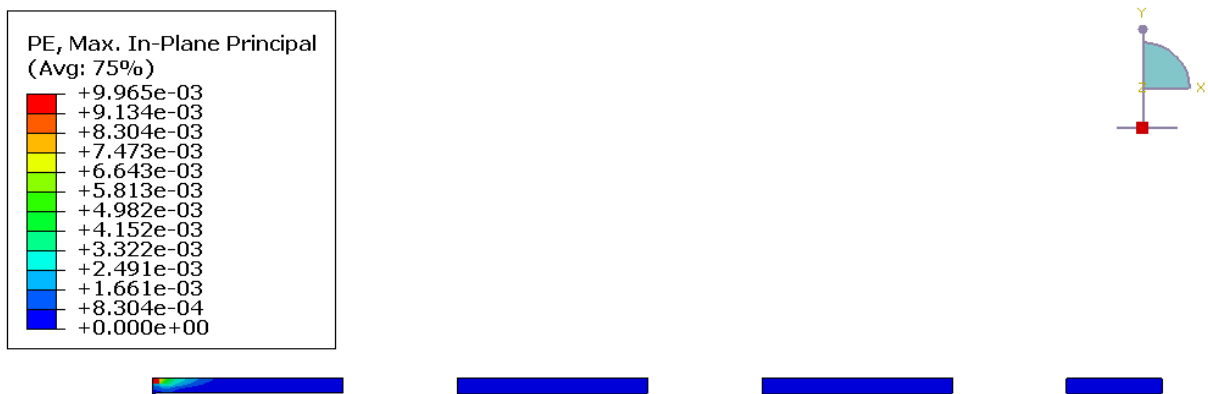


Figure 75: Déformation plastique du Cuivre avec Si0.3-(SAC305)

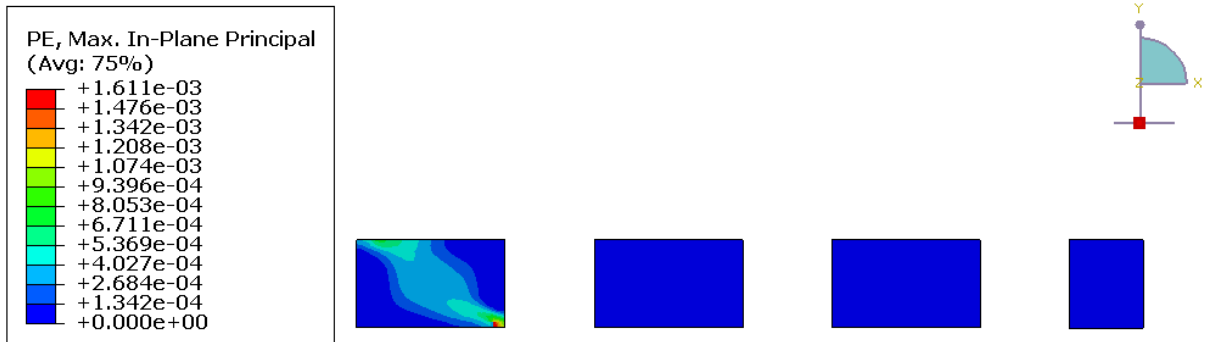


Figure 76: Déformation plastique du SAC305 avec Si0.3

F) Avec SAC405 :

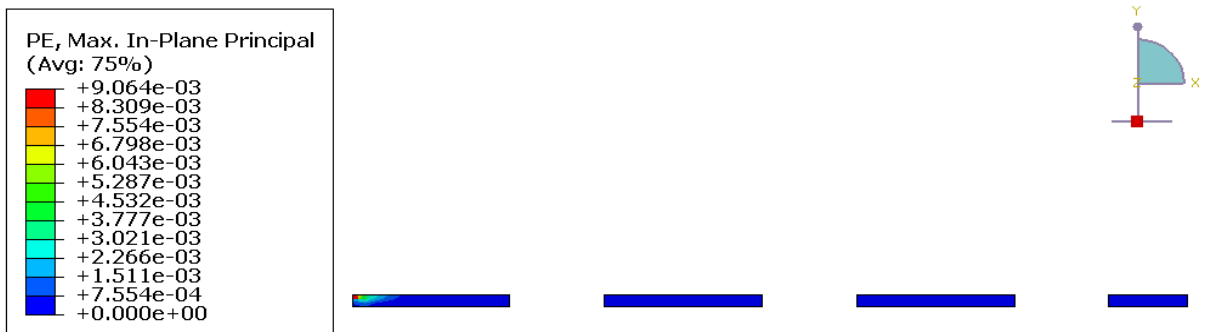


Figure 77: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.3-(SAC405)

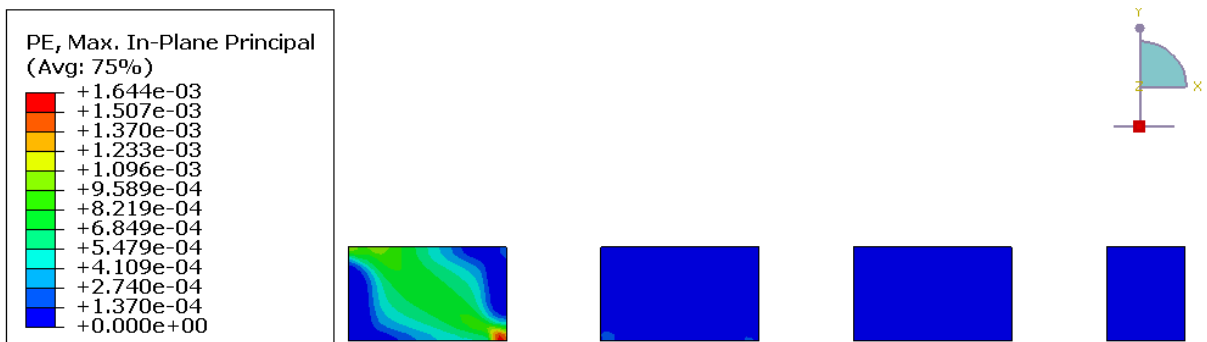


Figure 78: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.3

3.2. Le Si0.4

A) Avec SAC105:

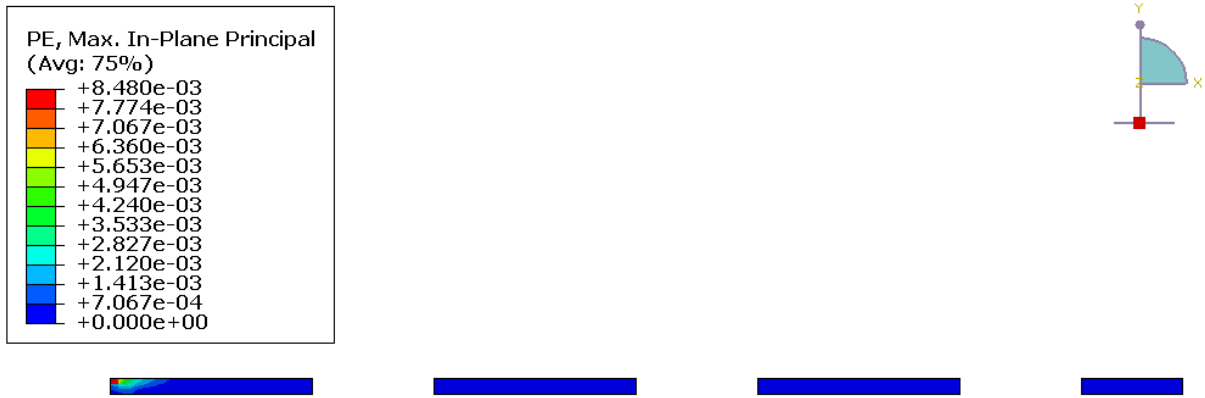


Figure 79: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC105)

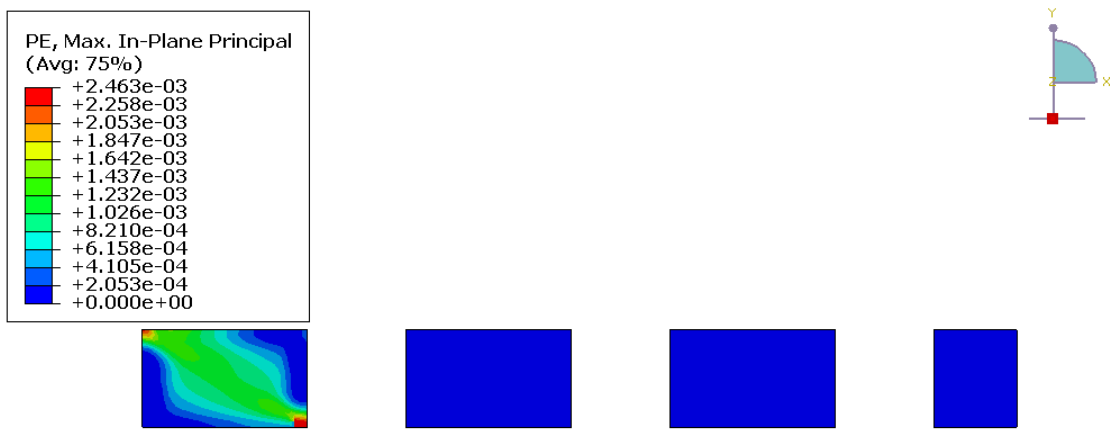


Figure 80: Déformation plastique de SAC105 avec Si0.4

B) Avec SAC305

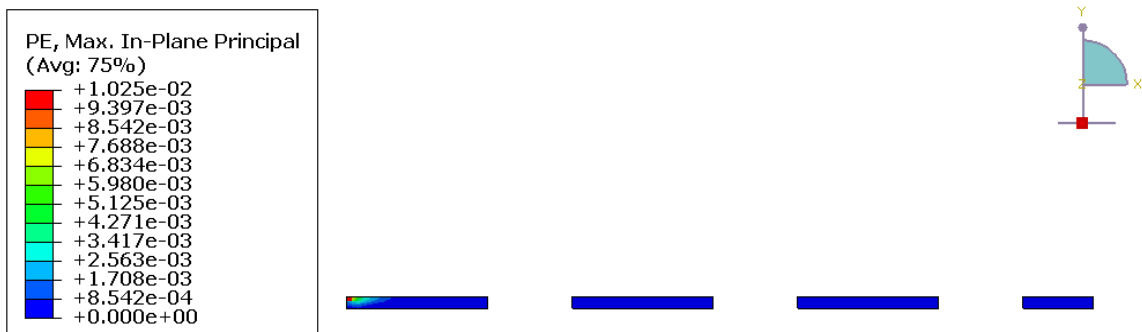


Figure 81: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC305)

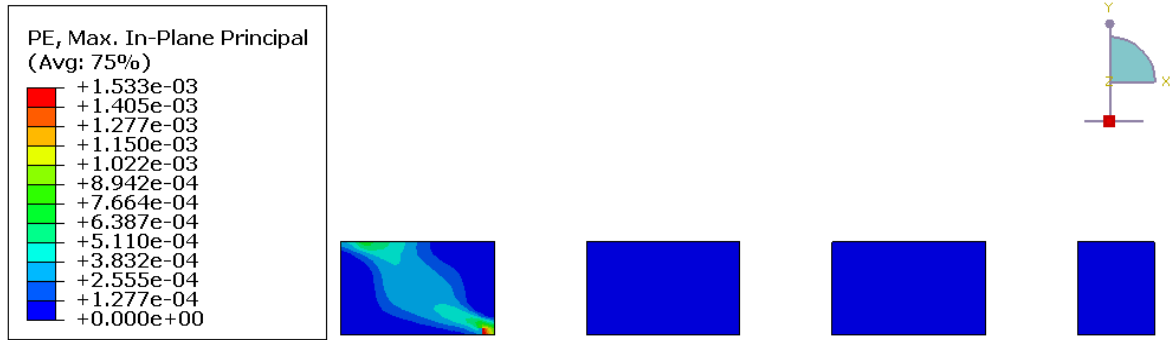


Figure 82: Déformation plastique de SAC305 avec Si0.4

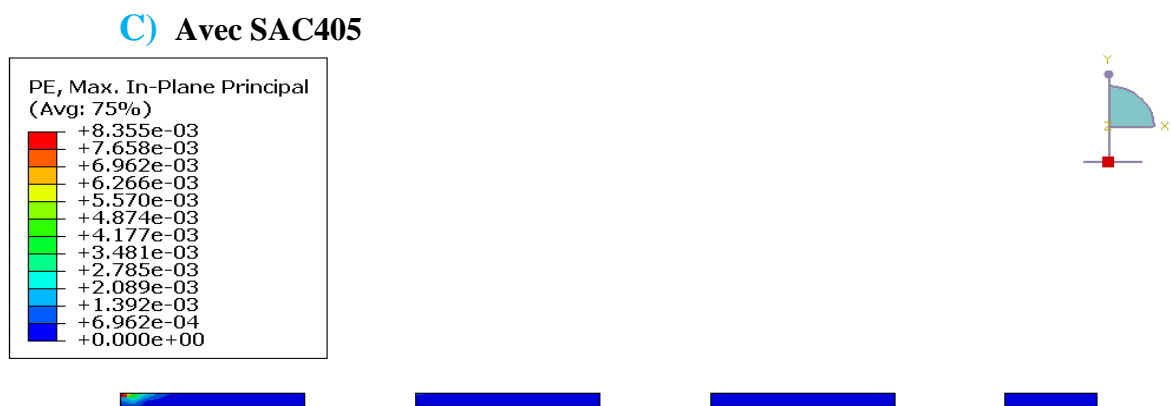


Figure 83: Déformation plastique de Cuivre avec Si0.4-(SAC405)

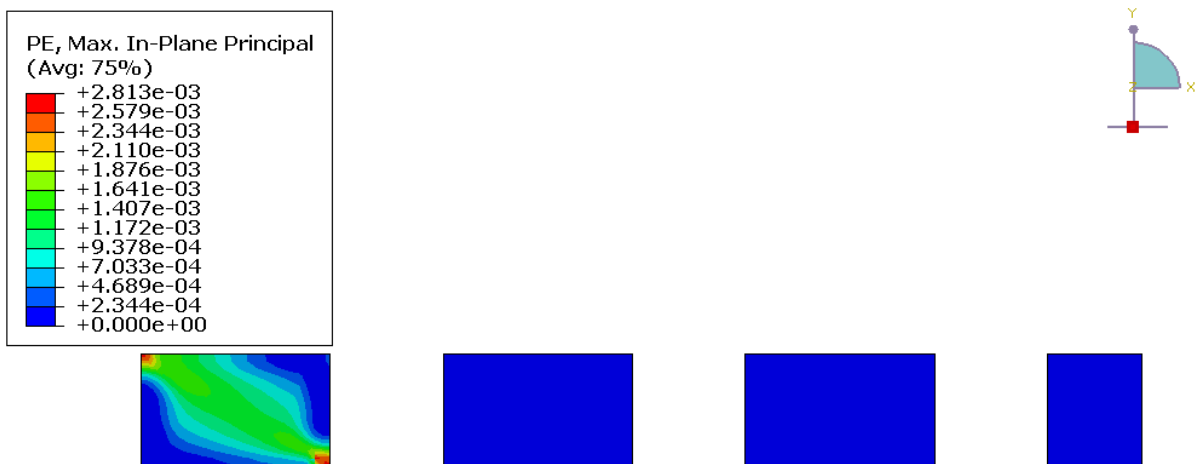


Figure 84: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.4

3.3. Le Si0.5

A) Avec SAC105

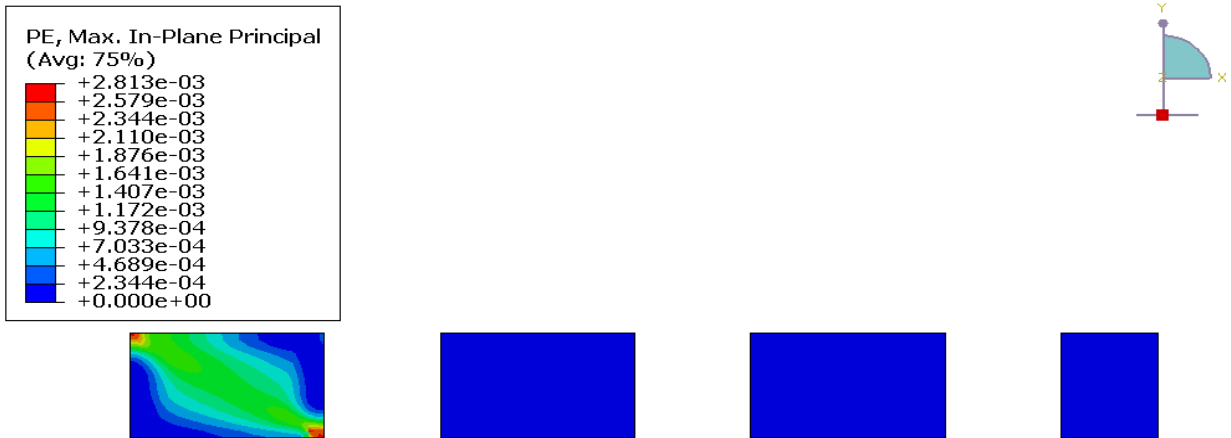


Figure 85: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC105)

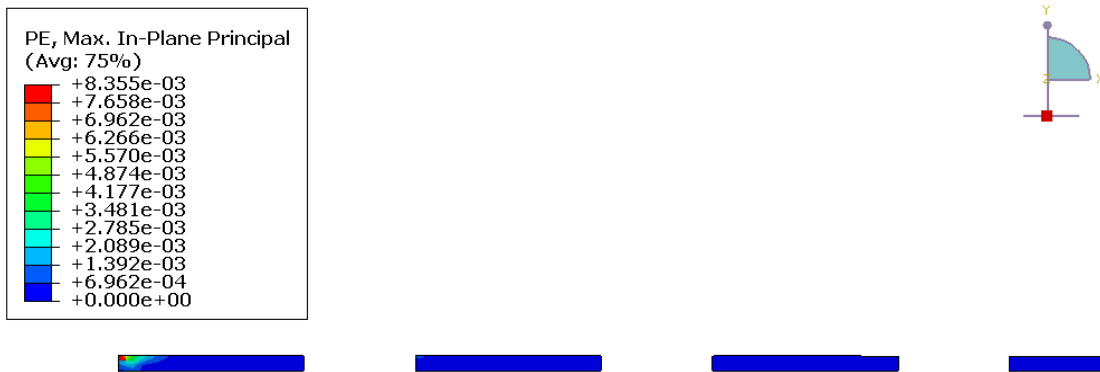


Figure 86: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC105)

B) Avec SAC305 :

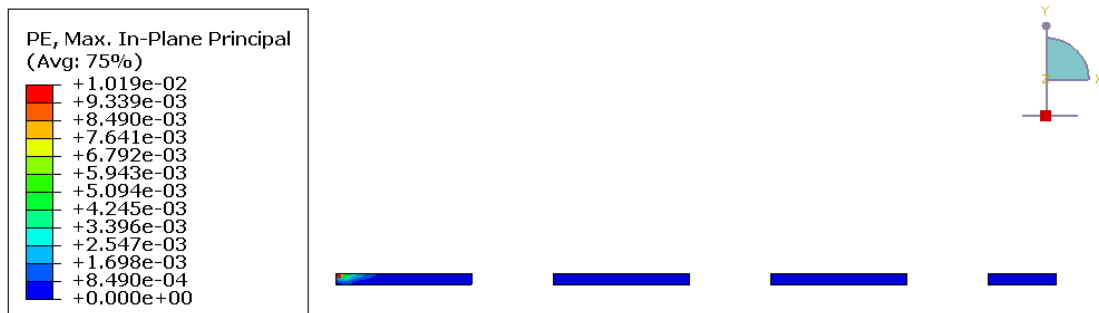


Figure 87: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC305)

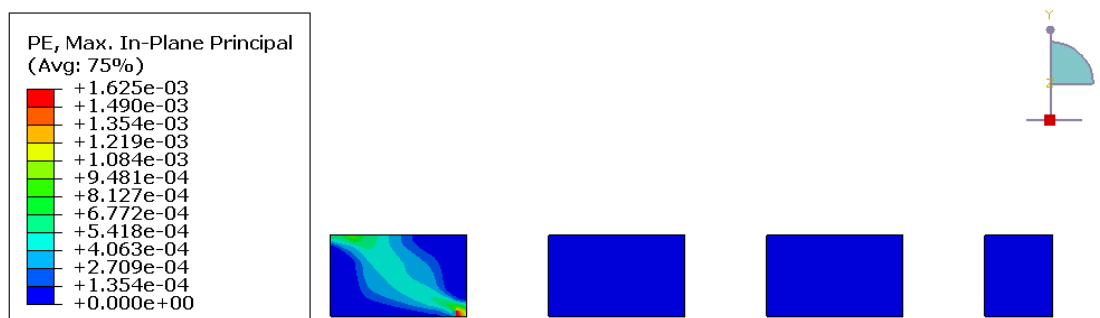


Figure 88 : Déformation plastique de SAC305 avec Si0.5

C) Avec SAC405 :

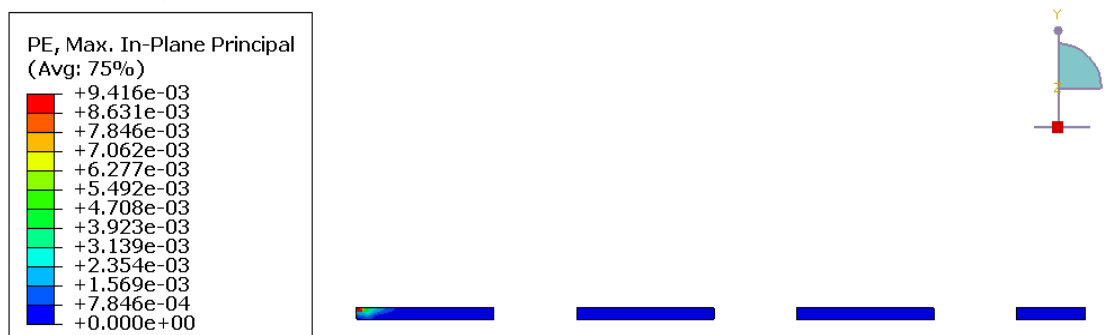


Figure 89: Déformation plastique de cuivre avec Si0.5-(SAC405)

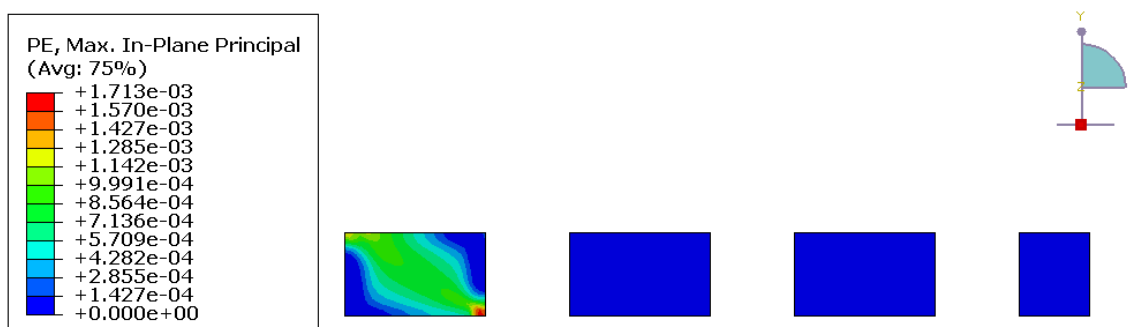


Figure 90: Déformation plastique de SAC405 avec Si0.5

Les répartitions des déformations plastiques maximales dans le cuivre et le SAC l'assemblage montrent clairement que :

- L'épaisseur des puces ne présente pas d'impact significatif sur les zones présentant les valeurs maximales des déformations plastiques (zones rouges). Quel que soit l'épaisseur de la puce, les zones à forte concentration de déformation plastique demeurent identiques pour les éléments Cu et SAC.
- Les valeurs des déformations maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce.
- Le matériau de la brasure ne présente pas d'impact significatif sur les zones présentant les valeurs maximales des déformations plastiques (zones rouges). Quel que soit le

matériau de la brasure (SAC105, SAC305 et SAC405), les zones à forte concentration de déformation plastique demeurent identiques pour le Cu et le SAC.

- Les valeurs des déformations plastiques maximales sont sensibles au matériau de la brasure.

4. Comparaisons quantitatives des résultats

Les résultats précédents donnant les répartitions des contraintes et des déformations plastiques ont montré la sensibilité des valeurs maximales des contraintes et des déformations aux paramètres étudiés à savoir l'épaisseur de la puce et le matériau de la brasure. Pour une meilleure présentation de ces effets, nous avons choisi de mener des comparaisons sous forme d'histogrammes.

4.1. L'effet sur les contraintes équivalentes de Von Mises

Les valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises sont présentées par les figures 91, 92 et 93.

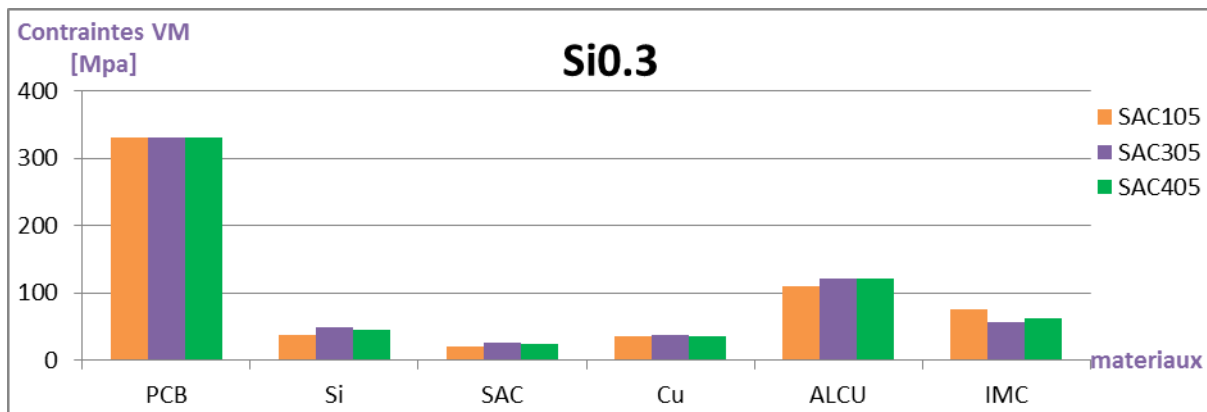


Figure 91: variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.3 du Silicium

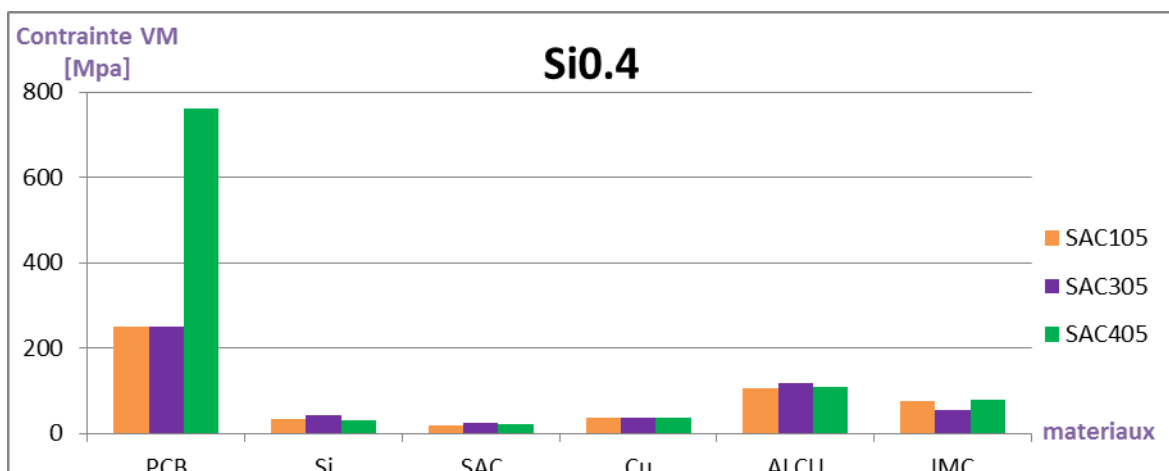


Figure 92: Variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.4 du Silicium

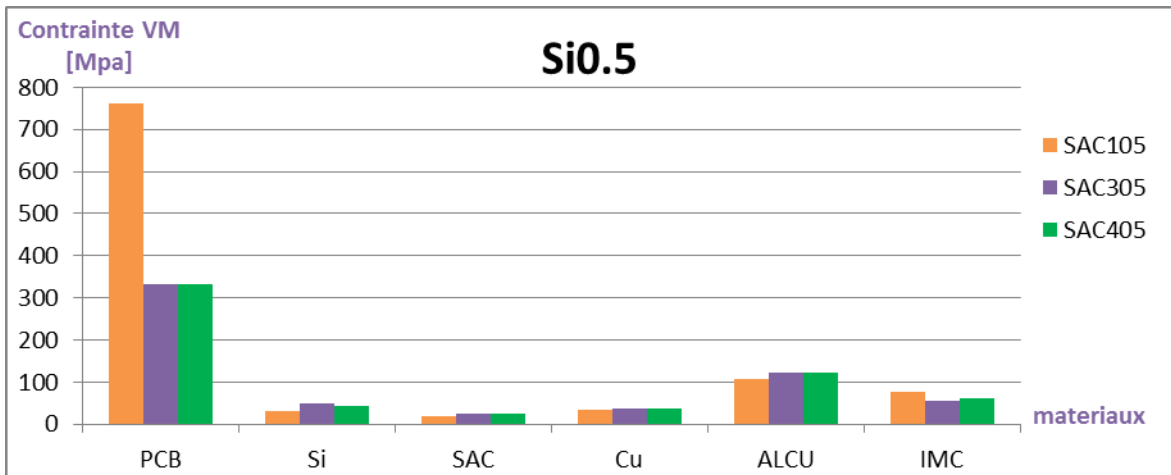


Figure 93: Variation des contraintes V.Mises des matériaux avec l'épaisseur 0.5 du Silicium

On constate que :

- Les valeurs les plus importantes de contraintes sont enregistrées pour le PCB.
- L'influence du matériau de la brasure sur les valeurs des contraintes équivalentes est faible.
- Le SAC 105 est le matériau présentant les faibles valeurs de contraintes.
- L'épaisseur 0.3 est le plus optimal.

4.2. L'effet sur les déformations plastiques (PE) :

Les valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises sont présentées par les figures 91. 92 et 93.

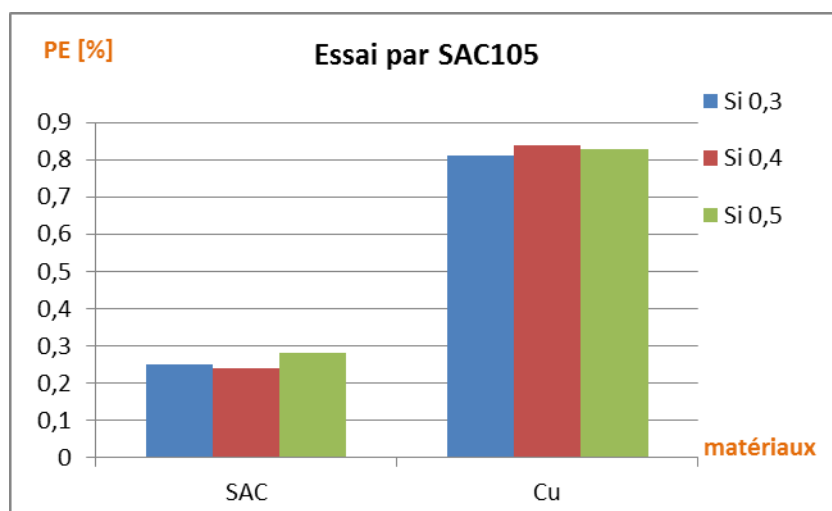


Figure 94: Comparaison des déformations plastiques par le SAC105

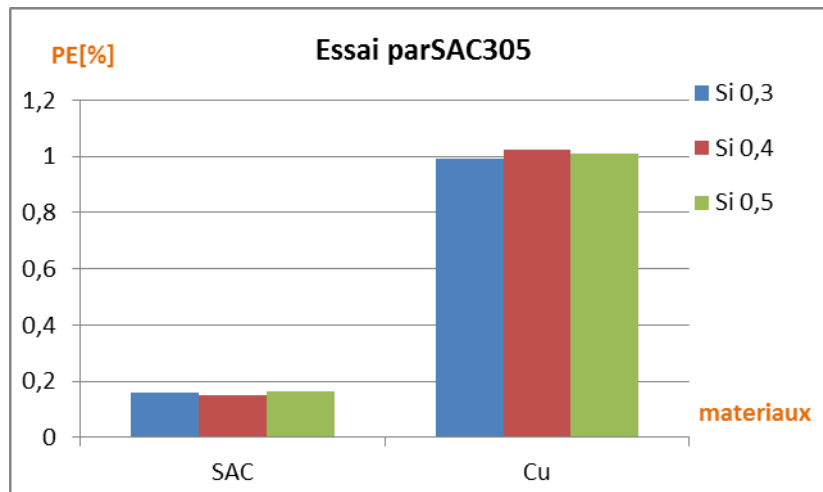


Figure 95: Comparaison des déformations plastiques par le SAC305

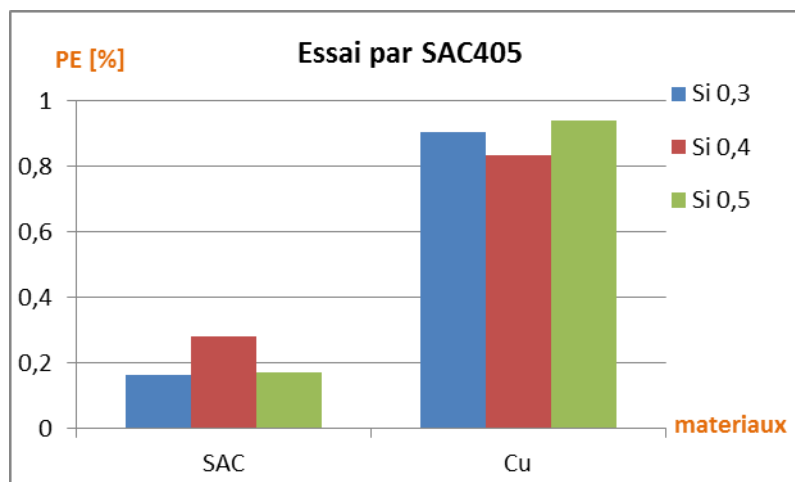


Figure 96: Comparaison des déformations plastiques par le SAC405

On constate que :

- Les valeurs les plus importantes des déformations plastiques sont relevées sur le Cu.
- L'influence du matériau de la brasure sur les valeurs des déformations plastiques est visible.
- Le SAC 105 est le matériau présentant les faibles valeurs de déformations plastiques.
- L'épaisseur 0.3 est le plus optimal.

5. Conclusion :

Les résultats numériques présentés dans ce chapitre montre clairement que :

- La variation de l'épaisseur de la puce ne présente pas d'effet sur la localisation des zones à forte concentration de contraintes.
- La variation de l'épaisseur de la puce ne présente pas d'effet sur la localisation des zones à forte concentration de déformations plastiques.
- Les valeurs des contraintes équivalentes maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce. Ainsi, le Si0.3mm présente les valeurs les plus faibles.
- Les valeurs des déformations plastiques maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce. Ainsi, le Si0.3mm présente les valeurs les plus faibles.
- Les approches numériques peuvent être utilisées comme moyen fiable pour mener des comparaisons avant de se lancer dans le production de microcomposants électroniques.

Conclusion Générale

La course à la miniaturisation des composants électronique a poussé les chercheurs à développer des composants de plus en plus petits avec des fonctionnalités multiples. Cette miniaturisation s'est accompagnée par un passage de l'électronique à la microélectronique voire la nanoélectronique.

Le développement de nouveaux microcomposants doit s'accompagner par des tests de fiabilité comme le test des chocs mécaniques, des vibrations, de la flexion répétée, de cisaillement des interconnexions...etc. nécessitent des moyens financiers important et présentent un obstacle au développement.

Les simulations numériques par éléments finis de ces tests de fiabilités sont présentées comme étant une alternative prometteuse visant à étudier la réponse des microcomposants avant la phase de conception.

La présente étude s'est intéressée à la réponse mécanique d'un microcomposant électronique monté sur un circuit imprimé par la technique de la puce-retournée (Flip-Chip). Des modélisations numériques utilisant la méthode des éléments finis ont été développées pour étudier les effets de l'épaisseur de la puce et du matériau de la brasure sur la réponse mécanique en flexion du microcomposant.

Les résultats, présentés sous formes de comparaisons quantitatives et qualitatives, peuvent être résumés dans les points suivants :

La variation de l'épaisseur de la puce ne présente pas d'effet sur la localisation des zones à forte concentration de contraintes.

- La variation de l'épaisseur de la puce ne présente pas d'effet sur la localisation des zones à forte concentration de déformations plastiques.
- Les valeurs des contraintes équivalentes maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce. Ainsi, le Si0.3mm présente les valeurs les plus faibles.
- Les valeurs des déformations plastiques maximales sont sensibles à l'épaisseur de la puce. Ainsi, le Si0.3mm présente les valeurs les plus faibles.
- Les approches numériques peuvent être utilisées comme moyen fiable pour mener des comparaisons avant de se lancer dans le production de microcomposants électroniques.

La présente étude peut être complétée par :

- L'étude de l'influence de la position des billes de brasure sur la réponse mécanique en flexion du microcomposant.
- L'étude de l'influence de la température sur la réponse mécanique en flexion du microcomposant.
- Une étude dynamique de la flexion répétée pour étudier la fatigue des billes de brasure.

Références bibliographiques

- [1] « Tout savoir sur le composant actif », in *Techniques de l'ingénieur*, [En ligne]. Disponible sur:
https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwigj-T_z9v_AhUAAAAAHQAAAAAQAg&url=https%3A%2F%2Fwww.techniques-ingenieur.fr%2Fglossaire%2Fcomposant-actif&psig=AOvVaw2tOOPXtw2v2vuRCkgAP_7e&ust=1687686274758364&opi=89978449
- [2] J. Bony et V. BOSSENEC, « Microélectronique : Technologie de fabrication des circuits intégrés ».
- [3] G. Bhatt, K. Patel, P. Suryavanshi, et C. Panchal, *Optimization of Ultrasonic and Thermosonic Wire-Bonding Parameters on Au/Ni Plated PCB Substrate*. 2015.
- [4] D. Shepherd et P. Grant, « Microelectronic Wire Bonds in Long Term Exposure to Harsh Environments », 2010.
- [5] W. Kpobie, « Modélisation 3D d'assemblages flip chip pour la fiabilisation des composants électroniques à haute valeur ajoutée de la famille "More than Moore" ». Université de Lorraine. France, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751249>
- [6] J. Lee, M. S. Abdul Aziz, M. H. H. Ishak, et C. Y. Khor, « A review on numerical approach of reflow soldering process for copper pillar technology », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 121, août 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09724-w.
- [7] 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>
- [8] JEDEC22-B105C, « Board Level Cyclic Bend Test Method for Interconnections ». JEDEC. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/22B113.pdf>

