

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 de Génie mécanique



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

Estimation numérique de la résistance mécanique au Flexion d'un microcomposant électronique (cas d'une puce retournée Flip-Chip)

Présenté Par :

- 1) M^r. BENALLAL Rachid
- 2) M^r. BOUDJEMAI Habib

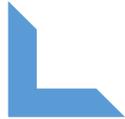
Devant le jury composé de :

Dr Bahram. K	DR	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr Belhenini .S	DR	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr Djebbar. N	DR	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Examineur
M ^r El Fatmi. I	DR	UAT.B.B (Ain Témouchent)	Co-encadrant

Année Universitaire 2021/2022



REMERCIEMENTS



Remerciements

Nos remerciements les plus chaleureux sont adressés à notre encadreur, Docteur BELHENINI Soufyane, pour son aide précieuse, son soutien moral, sa disponibilité ainsi que son professionnalisme. Et sa patience avec nous à tout moment et en toutes circonstances, Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans le caractère judicieux de ses orientations et la rigueur de ses conseils.

Nous adressons également nos sincères remerciements au meilleur collègue et professeur que nous ayons connu ces derniers jours, le professeur El Fatmi. Imad qui nous ne pouvons pas rembourser le travail qu'il a fait pour que nous réussissions.

Nous signifions également notre profonde reconnaissance à tous les enseignants du Département de Génie Mécanique qui ont œuvré à notre formation durant notre parcours de licence et de Master.

Nous remercions également les membres du jury qui ont bien voulu examiner notre travail. Qu'ils en soient ici vivement remerciés.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à nos proches, familles, amis pour leur soutien indéfectible tout au long de la durée de préparation de notre mémoire de fin d'études.



RÉSUMÉ
ABSTRACT ملخص

Résumé

Les microcomposants électroniques sont présentés comme étant des solutions prometteuses pour participer à la miniaturisation des appareils électriques du quotidien. A cause de leurs utilisations généralisées dans des environnements hostiles, les microcomposants doivent résister à des sollicitations différentes. La tenue mécanique des microcomposants est importante car une défaillance mécanique engendre forcément une défaillance électrique. Plusieurs types d'essais ont été proposés pour évaluer la tenue mécanique des composants. La flexion trois point est une des techniques couramment employée. Les simulations numériques sont présentées comme des solutions alternatives pour estimer la tenue mécanique des microcomposants. Dans ce travail, nous avons simulé en utilisant le code de calcul par éléments finis Abaqus, la flexion trois point d'un circuit imprimé (PCB) doté d'un microcomposant de petite taille. L'effet de la flexion du PCB sur la réponse mécanique du composant a été étudié. Des comparaisons qualitatives et quantitatives ont été réalisées afin d'identifier les zones critiques à risque de rupture dans le composant. Nous avons également étudié l'effet de l'épaisseur de la puce sur sa tenue mécanique globale. Cette étude doit être complétée par d'autres analyses pour mieux cerner les paramètres influents sur la tenue mécanique des microcomposants.

Abstract

The electronic microcomponents are presented as promising solutions for participating in the miniaturization of everyday electrical devices. Because of their widespread use in hostile environments, microcomponents must withstand different stresses. The mechanical strength of the microcomponents is important because a mechanical failure necessarily generates an electrical failure. Several types of tests have been proposed to evaluate the mechanical strength of components. Three-point bending is one of the techniques commonly used. Numerical simulations are presented as alternative solutions to estimate the mechanical strength of microcomponents. In this work, we simulated using the finite element

calculation code Abaqus, the three-point bending of a printed circuit (PCB) with a small microcomponent. The effect of PCB bending on the mechanical response of the component has been studied. Qualitative and quantitative comparisons were carried out in order to identify the critical areas at risk of failure in the component. We also studied the effect of chip thickness on its overall mechanical strength. This study must be supplemented by other analyzes to better identify the parameters influencing the mechanical strength of the microcomponents.

ملخص

يتم تقديم المكونات الإلكترونية الدقيقة كحلول واعدة للمشاركة في تصغير الأجهزة الكهربائية اليومية. بسبب استخدامها على نطاق واسع في بيئات معادية، يجب أن تتحمل المكونات الدقيقة ضغوط مختلفة. تعتبر القوة الميكانيكية للمكونات الدقيقة مهمة لأن العطل الميكانيكي يؤدي بالضرورة إلى حدوث عطل كهربائي. تم اقتراح عدة أنواع من الاختبارات لتقييم القوة الميكانيكية للمكونات. الانحناء ثلاثي النقاط هو أحد الأساليب الشائعة الاستخدام. يتم تقديم عمليات المحاكاة العددية كحلول بديلة لتقدير القوة الميكانيكية للمكونات الدقيقة. في هذا العمل، قمنا بالمحاكاة (PCB) ، الانحناء ثلاثي النقاط لدائرة مطبوعة Abaqus باستخدام كود حساب العناصر المحدودة بمكون صغير. تمت دراسة تأثير ثنائي ثنائي الفينيل متعدد الكلور على الاستجابة الميكانيكية للمكون. تم إجراء مقارنات نوعية وكمية من أجل تحديد المجالات الحرجة المعرضة لخطر الفشل في المكون. درسنا أيضاً تأثير سماكة الرقاقة على قوتها الميكانيكية الكلية. يجب استكمال هذه الدراسة بتحليلات أخرى لتحديد المعلمات التي تؤثر على القوة الميكانيكية للمكونات الدقيقة بشكل أفضل.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé	5
Abstract	5
ملخص	6
Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
Introduction générale	13

CHAPITRE I

Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service

I. Généralités sur les microcomposants.....	15
I.1. Domaine d'utilisation des microcomposants électroniques.....	16
I.2. Catégories des microcomposants électroniques.....	17
I.3. Fabrication des microcomposants électroniques.....	19
I.4. Assemblage des microcomposants électroniques.....	20
II. Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants en service.....	21
III. Estimation de la résistance mécanique des microcomposants électroniques.....	22
III.1 Estimation par l'expérimentation.....	22
III.2. Présentation de l'essai de chute.....	23
III.3 Estimation numériques par la méthode des éléments finis.....	24
IV. Présentation du microcomposant de l'étude.....	24
IV.1. Présentation du test normalisé.....	25
IV.2. Présentation de l'approche numérique de l'étude.....	26

CHAPITRE II

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

I. II.1. Introduction.....	28
I.2. Présentation du logiciel choisi pour l'étude.....	28
I.3. Présentation de la géométrie.....	29

I.4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés.....	31
I.5. Conditions aux limites et de chargement.....	32
I.6. Maillage.....	34
I.7. Technique de calcul (explicite).....	36
I.8. Résultats attendus de la simulation.....	36

CHAPITRE III

Résultats numériques, discussions et perspectives

III.1. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans les éléments constituant le microcomposant.....	38
III.2. Effet de l'épaisseur de la puce.....	41
III.2.1. Sur les contraintes équivalentes du PCB.....	41
III.2.2. Sur les contraintes équivalentes du Si.....	44
III.2.3. Sur les contraintes équivalentes du cuivre.....	46
III.2.4. Sur les contraintes équivalentes du SAC.....	47
III.3. Répartition des déformations plastiques dans les éléments élastoplastiques SAC.	
III.3.1. PE-Sac.....	48
III.3.2. Effet de l'épaisseur de la puce sur les déformations plastiques de PE-Sac.....	50
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques.....	53

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I-1 : Composant monté en surface.....	15
Figure I-2 : Fusibles de différentes formes	17
Figure I-3 : Photodiode, boîtier ouvert	17
Figure I-4 : Les composants actifs.....	18
Figure I-5 : Plaquette de silicium.....	19
Figure I-6 : Assemblage de circuits imprimés clé en main OEM ODM et fabrication de composants électroniques.....	20
Figure I-7 : L'assemblage en TAB.....	20
Figure I-8 : Montage en puce retournée (flip-chip)	21
Figure I-9 : exemples d'exigence en fiabilité des composants électroniques dans plusieurs domaines d'utilisation.....	23
Figure I-10 : machine d'essai pour le test de chute.....	24
Figure I-11 : Dessin d'assemblage du microcomposant.....	26

CHAPITRE II

Figure II-1 Interface de Abaqus.....	28
Figure II-2 : Assemblage PCB/puce.....	29
Figure II-3 : Assemblage de la structure.....	29
Figure II-4 : représentation des conditions aux limites et des symétries suivant X et Y.....	33
Figure II-5 : Technique de calcul sur Abaqus.....	36

CHAPITRE III

Figure III-1 : Contraintes équivalentes de Von Mises du PCB.....	38
Figure III-2 : Déplacement du modèle complet.....	39
Figure III-3 : Etat de contraintes VM du silicium.....	39
Figure III-4 : Etat de contraintes VM du cuivre.....	40
Figure III-5 : Etat de contraintes VM du Sac.....	41
Figure III-6 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM du PCB.....	44
Figure III-7 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM du silicium.....	46

Figure III-8 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM du Cuivre.....	47
Figure III-9 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM du Sac.....	48
Figure III-10 : Histogramme de Influence quantitatif de l'épaisseur des puces sur les contraintes VM dans la PCB, Si, Cu.....	49
Figure III-11 : déformation plastique du PE-Sac.....	49
Figure III-12 : Influence qualitatif de l'épaisseur de la puce sur la répartition des déformations plastique de cisaillement du PE-Sac.	50
Figure III-13 : Histogramme de Influence quantitatif de l'épaisseur de la puce sur les déformations plastique decisaillement du PE-Sac.....	51

Liste des tableaux

CHAPITRE I

/

CHAPITRE II

Tableau II-1 les géométries des éléments constituant notre modèle numérique.....	30
Tableau II-2 : propriétés des matériaux introduites dans les modèles numériques.....	32
Tableau II-3 représentée le maillage des différentes pièces.....	34

CHAPITRE III

Introduction générale

Introduction générale

La microélectronique est une spécialité du domaine de l'électronique qui s'intéresse à l'étude et à la fabrication de composants électroniques à l'échelle micrométrique. Ces composants sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs (comme le silicium) au moyen de diverses technologies dont la photolithographie. Cette technologie permet l'intégration de nombreuses fonctions électroniques sur un même morceau de silicium (ou autre semi-conducteur) et donc à un coût de fabrication moins élevé. Les circuits ainsi réalisés sont appelés puces ou circuits intégrés. Ils peuvent être standards ou spécifiques à une application (ils sont alors nommés ASIC : application-specific integrated circuit). Tous les composants électroniques discrets : les transistors, les condensateurs, les inductances, les résistances, les diodes et les isolants et les conducteurs ont leur équivalent en microélectronique.

La fabrication des microcomposants se développe de plus en plus depuis des années. Le développement de nouveaux microcomposants se fait par la conjugaison d'efforts de plusieurs intervenants notamment les mécaniciens qui doivent s'assurer de la bonne tenue mécanique de l'assemblage Microcomposant/Circuit Imprimé. Le travail présenté dans ce mémoire entre dans ce contexte. En effet, nous avons mené des simulations numériques pour estimer la réponse mécanique d'un microcomposant de type Flip-Chip. La sollicitation mécanique imposée est le choc mécanique.

Le présent travail comporte trois chapitres.

Un premier chapitre consacré à des recherches bibliographiques sur les microcomposants, les techniques de leur fabrication ainsi que les sollicitations mécaniques et subies par les microcomposants de type flip-chip.

Le deuxième chapitre présente l'approche numérique développée pour estimer la réponse mécanique d'un assemblage microcomposant/circuit imprimé face à un choc mécanique.

Le troisième chapitre regroupe les nombreux résultats obtenus avec des comparaisons qualitatives et quantitatives sous forme de graphiques.

Notre mémoire comporte à la fin une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants électroniques en service

I. Généralités sur les microcomposants :

Un composant électronique est un élément destiné à être assemblé avec d'autres afin de réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques. L'électronique est une discipline née de la physique et dédiée à la manipulation des signaux électriques. Elle permet, au moyen de divers éléments appelés « composants », de construire des appareils capables de gérer ses signaux électriques dans le but de transmettre ou de recevoir des informations. La microélectronique désigne l'ensemble des technologies de fabrication de composants, qui utilisent des courants électriques pour transmettre, traiter ou stocker des informations, à l'échelle micrométrique. Elle est en grande partie à l'origine des formidables progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de l'informatique, des télécommunications et de l'imagerie, entre autres. [1] (La figure 1). Montre quelques composants et microcomposants assemblés sur un circuit imprimé.

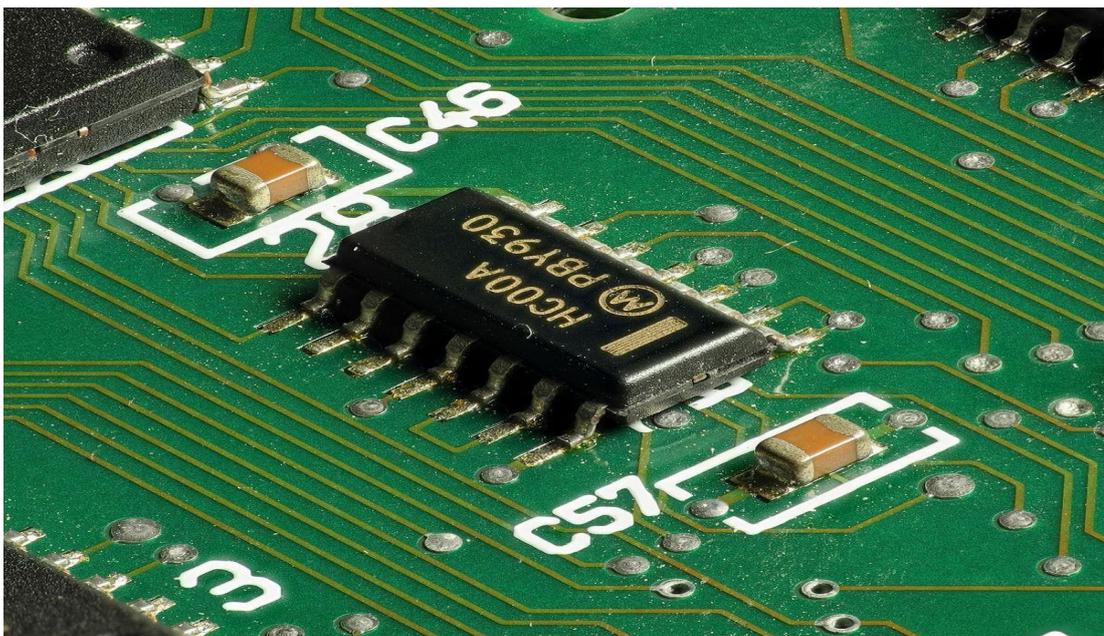


Figure I-1 : Composant monté en surface

I.1- Domaine d'utilisation des microcomposants électroniques :

On peut lister les composants électroniques en fonction de leur domaine d'application de prédilection. Cette classification est donnée à titre indicatif, car les domaines de l'électronique sont en général interdépendants. [2]

Capteur

- ❖ Caméra (figure.3)
- ❖ Capteur de pression fluide
- ❖ Capteur de champ magnétique Thermistance

Électrotechnique/électronique de puissance

- ❖ Fusible (rapide / lent) (figure.2)

Électronique analogique

- ❖ Condensateur
- ❖ Résistance

Électronique numérique

- ❖ Microprocesseur
- ❖ Microcontrôleur Mémoire informatique

Interface humaine

- ❖ Afficheur
 - à segments (affichage de réveils)
 - à Led (affichages défilants)
 - LCD (afficheurs de calculatrices)



Figure I-2 : Fusibles de différentes formes

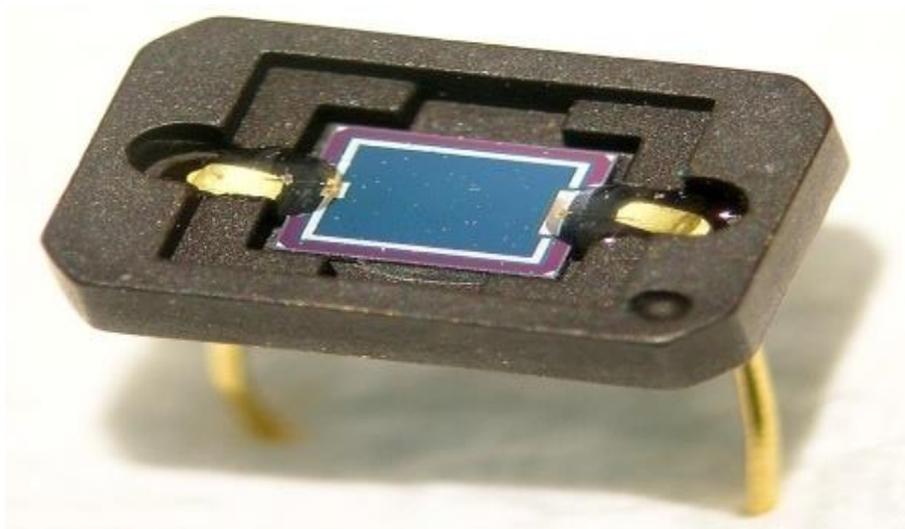


Figure I-3 : Photodiode, boîtier ouvert

1.2-Catégorie des microcomposants électroniques :

Comme les composants électroniques, les microcomposants électroniques peuvent comporter des systèmes actifs et des systèmes passifs. En plus de ces deux grandes classes et à la différence des composants, les microcomposants électroniques peuvent se présenter sous forme microsystèmes (électromécaniques).

Les composants actifs :

Ils constituent des dispositifs capables d'amplifier un signal électrique et de produire de l'énergie. Un composant actif fonctionne comme un circuit alternatif dans les appareils en les aidants à augmenter la puissance et la tension. Il peut effectuer ses opérations parce qu'il est alimenté par une source d'électricité. [2]

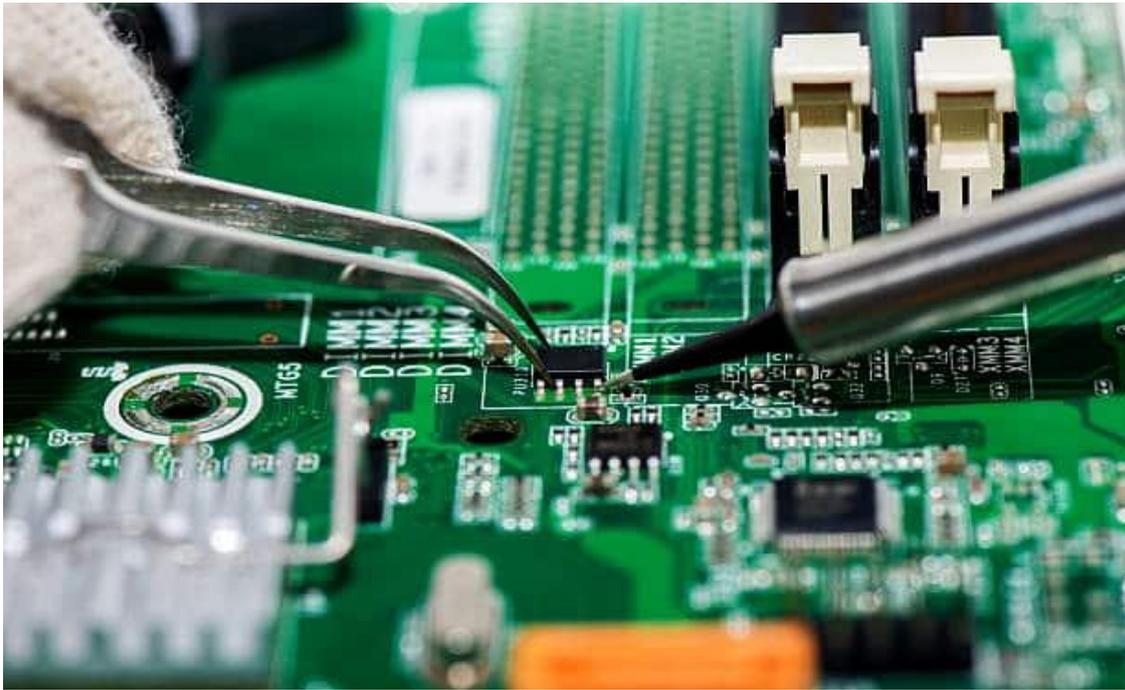


Figure I-4 : Les composants actifs

Les composants passifs :

Ces dispositifs ne peuvent pas introduire d'énergie dans le circuit. De même, ils ne dépendent pas d'une source d'énergie, à l'exception de celle fournie par le circuit sur lequel ils sont connectés. Par conséquent, ils ne permettent pas d'amplifier la puissance d'un signal, bien qu'ils puissent augmenter une tension ou un courant comme le fait un transformateur.

Les composants passifs incluent les éléments à deux bornes tels que les résistances, les condensateurs, les inductances et les transformateurs. [2]

Le composant électromécanique :

Ces composants utilisent un signal électrique pour générer un changement mécanique tel que la rotation d'un moteur. Normalement, ils se servent d'un courant électrique pour créer un champ magnétique qui entraîne un mouvement physique.

Tous les types de relais et d'interrupteurs font partie de cette catégorie. Quant aux dispositifs électromécaniques, ils comportent à la fois des processus électriques et mécaniques. Un interrupteur à commande manuelle constitue un composant électromécanique, puisque le mouvement mécanique provoque une sortie électrique. [2]

1.3-Fabrications des microcomposants électroniques :

Fabriquer un microcomposant électronique (appelé également puce électronique), c'est réaliser sur quelques centimètres carrés de surface et quelques microns d'épaisseur un assemblage d'une multitude de composants interconnectés simultanément, pour des centaines d'exemplaires identiques. A l'échelle d'une puce, un minuscule grain de poussière représente un rocher qui bouche les chemins dédiés à la circulation des électrons qui transmettent le signal donc l'information. C'est pour cela que la fabrication a lieu en « salle blanche ». L'air est constamment renouvelé et filtré. Il contient 100 000 à 1 million de fois moins de poussières que l'air extérieur.

Les opérateurs portent en permanence une combinaison qui les couvre presque des pieds à la tête, et retient les particules qu'ils génèrent naturellement.

C'est principalement sur des plaquettes de silicium que ces puces électroniques sont réalisées. Mais on travaille également sur d'autres matériaux comme des métaux, des polymères, du diamant, des matériaux qui émettent de la lumière, etc. [3]

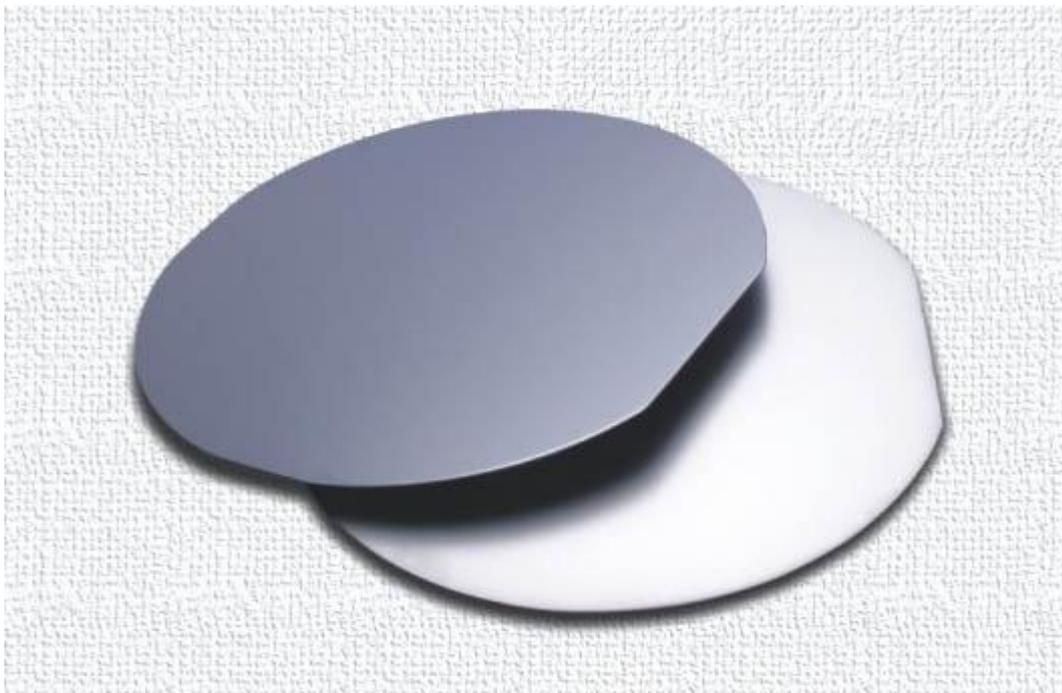


Figure I-5 : Plaquette de silicium

1.4-Assemblage des microcomposants électroniques :

Selon le type du microcomposant électronique, l'assemblage de ce dernier sur un circuit imprimé peut prendre plusieurs formes :



Figure I-6 : Assemblage de circuits imprimés clé en main OEM ODM et fabrication de composants électroniques

L'assemblage en TAB :

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 » comme le montre (la figure 7). [4]

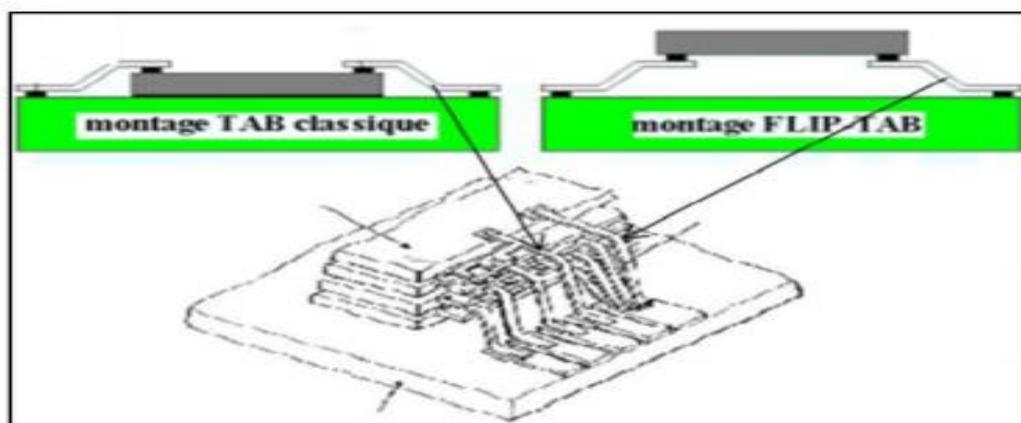


Figure I-7 : L'assemblage en TAB

L'assemblage en Flip Chip

Le concept du Flip Chip, où le semi-conducteur est assemblé face contre la carte, est idéal d'un point de vue encombrement, parce qu'il n'y a aucune surface supplémentaire nécessaire pour connecter ce composant.

La figure. 8 donne une schématisation d'un montage puce-retournée (Flip-Chip).

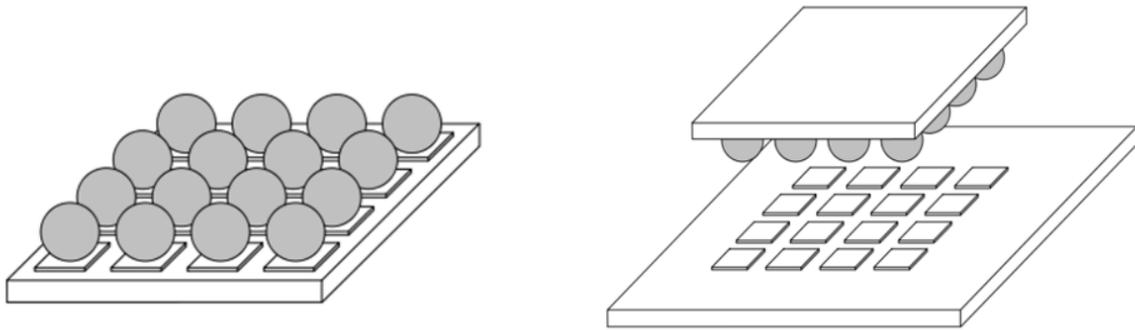


Figure I-8 : Montage en puce retournée (flip-chip)

II –Sollicitations mécaniques subies par les microcomposants en service :

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. Prenons pour exemple 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. Sur le même 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.

Les systèmes embarqués dans les avions par exemple subissent des cycles de températures, de vibrations et des conditions environnementales extrêmes, ainsi, les contraintes mécaniques que subissent les composants électroniques sont d'origine mixte.

En fonction de leurs intensités, leurs concentrations et des éventuelles répétitions, les contraintes mécaniques peuvent provoquer la défaillance des microcomposants électroniques. [4].

III. Estimation des résistances mécaniques des microcomposants électroniques :

Nous nous intéressons dans cette partie aux tests accélérés utilisés pour déterminer la fiabilité des microcomposants électroniques soumis à des sollicitations mécaniques. Nous nous intéressons aux essais de chutes qui permettent de donner une estimation de la résistance aux chocs des microcomposants électroniques [4].

III.1 Estimation par l'expérimentation :

Pour les composants électroniques, l'intervalle de temps dont le fonctionnement doit être garanti varie d'heures en années, en fonction du domaine d'application, comme indiqué sur la figure.10. La fiabilité est estimée par des tests qui devraient idéalement être effectués dans des conditions normales de fonctionnement. Cependant, cela peut prendre beaucoup de temps pour tomber en panne dans des conditions normales (par exemple, 40 ans pour l'aviation). En augmentant le niveau de contrainte reçu par les composants électroniques et en accélérant la détérioration, les données de défaillance peuvent être acquises rapidement. Pour être viables, les tests rapides doivent reproduire le même type d'erreur que le fonctionnement normal [4].

Les résultats de survie ainsi obtenus à partir de tests accélérés sont utilisés pour estimer la durée de vie dans des conditions normales de fonctionnement via des équations.

$$TTF_{use} = AF \times TTF_{stress} \quad (1.1)$$

Avec :

- ❖ TTF_{stress} : temps de défaillance obtenu durant les tests accélérés.
- ❖ TTF_{use} : temps de défaillance obtenu dans les conditions nominales de fonctionnement.
- ❖ AF : Facteur d'accélération

Le recours aux tests accélérés pour estimer la durée de vie des composants électroniques doit vérifier certaines hypothèses :

- ❖ Les types de défaillances obtenus par les tests accélérés doivent être les mêmes que ceux provoqués dans Les conditions normales d'utilisation.
- ❖ La forme de la distribution de la durée de vie issue des conditions accélérées doit être la même que celle des conditions normales d'utilisation. [4].

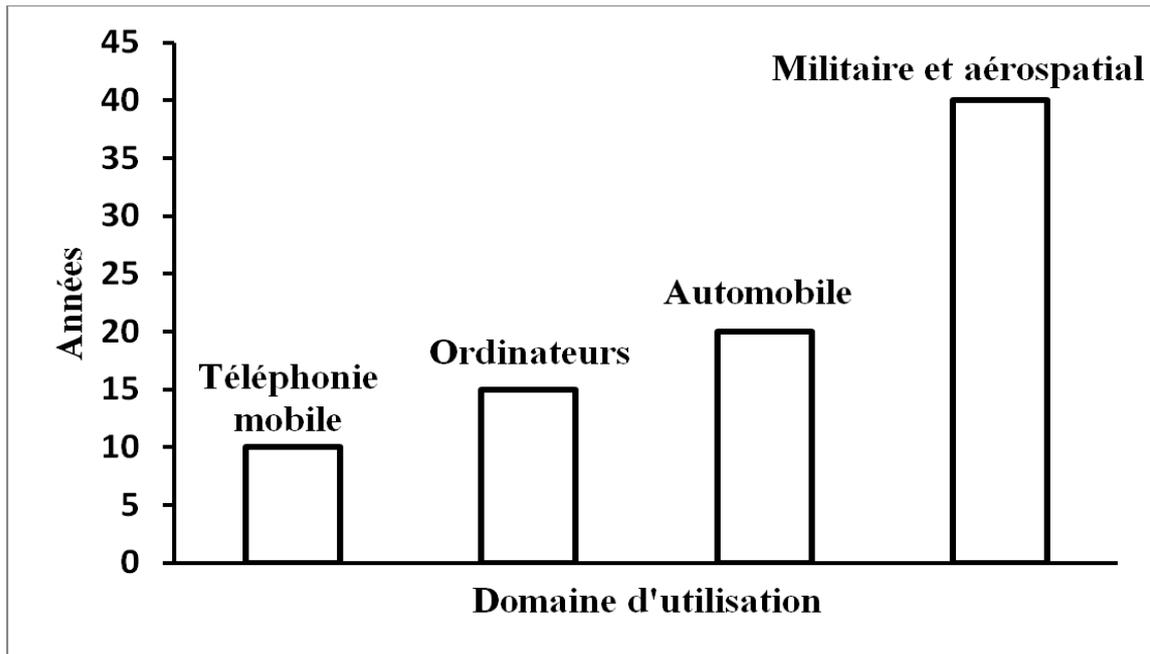


Figure I-9 : exemples d'exigence en fiabilité des composants électroniques dans plusieurs domaines d'utilisation [4].

III.2. Présentation de l'essai de chute

L'essai de chute des circuits imprimés contenant des composants électroniques « Board Level Drop Test » est utilisé pour reproduire dans un environnement accéléré les sollicitations mécaniques dynamiques causées par les chutes des appareils électroniques portatifs comme par exemple les téléphones mobiles, les caméras et les GPS. Il permet d'évaluer la fiabilité des composants électroniques au 2^{ème} niveau de packaging « Board Level Reliability ». Selon la norme JESD22-B111, l'objectif de l'essai est d'évaluer et de comparer les performances à la chute des composants électroniques.

L'essai de chute est réalisé sur un banc de test de chute présenté par la figure I.10.a. Le circuit imprimé contenant les composants est monté sur un support lié à la table de chute par des entretoises et des vis de serrage dont le nombre dépend des conditions de test. Les composants assemblés sur le PCB sont orientés vers la surface de l'impact comme le montre la figure I.10.b. La table coulissante glisse librement le long des tiges jusqu'à heurter la surface de contact provoquant ainsi un choc mécanique. Les conditions de tests se font selon des normes internationales ; dans notre étude nous avons opté pour la norme JESD22-B111 qui spécifie :

- ❖ La géométrie, les dimensions et les propriétés des circuits imprimés du modèle à tester
- ❖ Les positions et les répartitions des composants à tester sur les circuits imprimés
Les méthodes d'assemblages des composants à tester sur les circuits imprimés
- ❖ Les conditions de chutes comme l'accélération appliquée, la durée de pulsation, la hauteur de chute
- ❖ Les méthodes de détection de la défaillance à l'aide de chaîne de mesures électriques
- ❖ Les méthodes d'analyse de défaillance
- ❖ La présentation des résultats

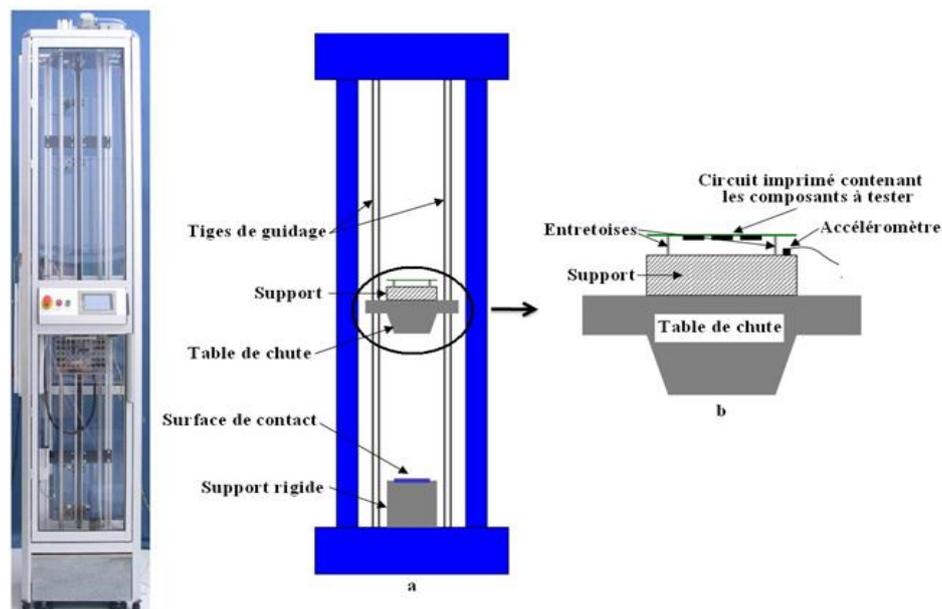


Figure I-10 : machine d'essai pour le test de chute

III.3_ Estimation numériques par la méthode des éléments finis :

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, cela permet par exemple 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 : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

La méthode des éléments finis fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact [4].

IV. Présentation du microcomposant de l'étude :

Le microcomposant électronique de l'étude est composé d'un empilement de couches minces électriques et diélectriques avec des billes de brasure pour assurer la connexion avec les circuits imprimés.

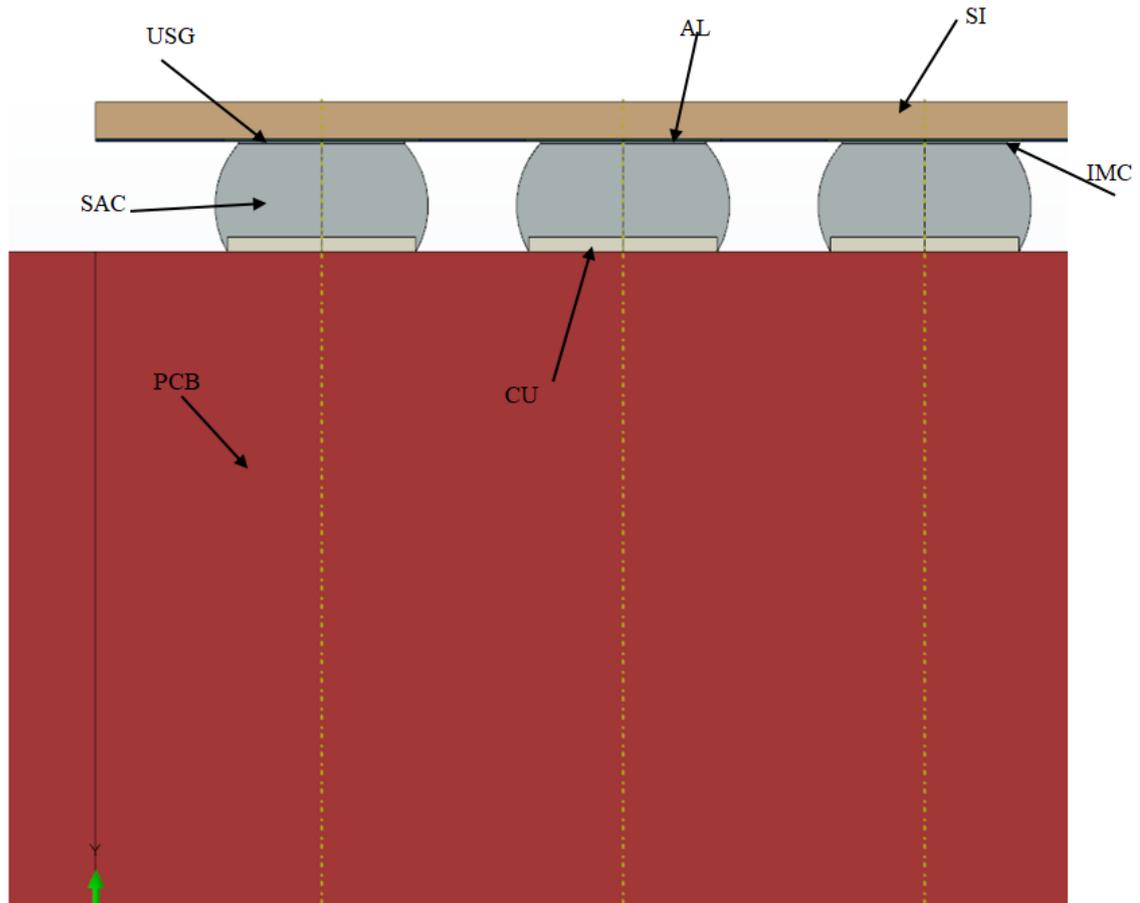


Figure I-11 : Dessin d'assemblage du microcomposant

V. Présentation de l'approche numérique de l'étude :

Les simulations numériques par éléments finis de l'essai de chute sont utilisées pour accéder aux informations locales concernant le comportement mécanique dynamique des différents éléments constituant les composants testés. Ainsi, cet accès aux données locales telles que les contraintes, les déformations, les déplacements et les énergies, rend possible la localisation des zones de concentration de contraintes et de déformations et de prévoir les risques de défaillance. Dans le cadre de notre travail, nous avons développé des modèles numériques dans le but de comparer le comportement mécanique durant le test de chute des différentes solutions architecturales du microcomposant. Les résultats numériques obtenus sont utilisés pour optimiser les « designs », analyser les effets des propriétés mécaniques des matériaux utilisés, proposer des solutions de protection des composants pour améliorer leur tenue mécanique et prédire la durée de vie des composants en utilisant des modèles de fatigue.

CHAPITRE II

Simulation numérique d'un essai de

Flexion sur des microcomposants

électroniques montés sur un PCB normalisé

II. Présentation du modèle numérique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédures suivies pour effectuer la simulation d'un test de chute sur un circuit imprimé comportant une puce retournée « Flip- Chip ». Dans cette phase de l'étude, nous présentons, la modélisation géométrique, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et de chargement, les maillages ainsi que les contacts entre les différents éléments.

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

II. 2. Présentation du logiciel choisi pour l'étude

Un logiciel de calcul développé par ABAQUS, Inc. C'est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. Dans cette étude, nous avons utilisé Abaqus/CAE.

ABAQUS a été créé en 1978 et est l'un des principaux fournisseurs de logiciels et de services d'analyse par éléments finis au monde. La série de logiciels ABAQUS est réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Il est devenu un élément indispensable du processus de conception d'entreprises de renommée mondiale dans tous les domaines industriels. ABAQUS fournit les meilleures solutions pour les problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, fournissant un grand nombre d'alternatives impliquant l'exploitation de plusieurs fournisseurs et produits. [7]

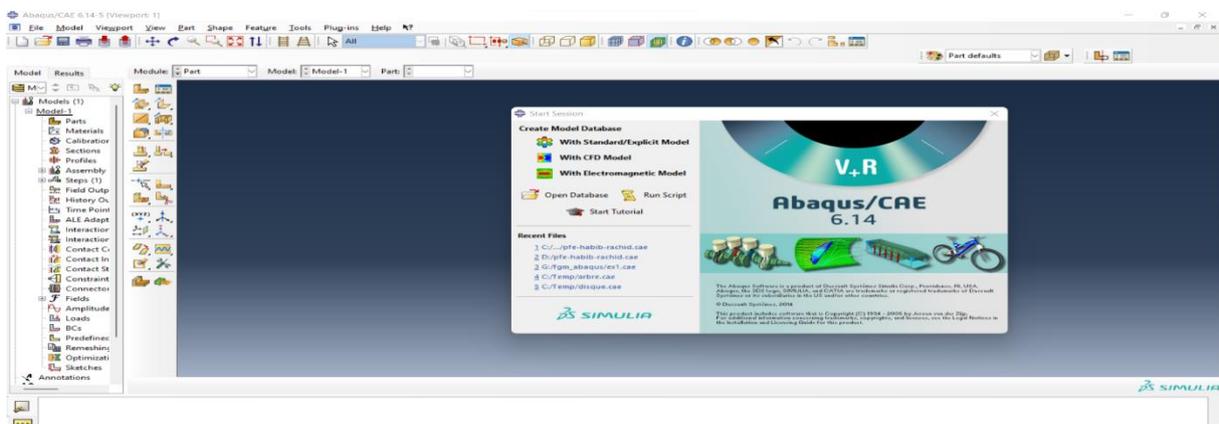


Figure II-1 Interface de Abaqus

II. 3. Présentation de la géométrie

Les cartes normalisées sur lesquelles sont montés les composants sont rectangulaire. Le composant occupe la position centrale ce qui nous fait deux plans de symétries. En exploitant ces plans de symétries on peut réduire notre géométrie au quart de la structure globale comme le montre la figure II-2

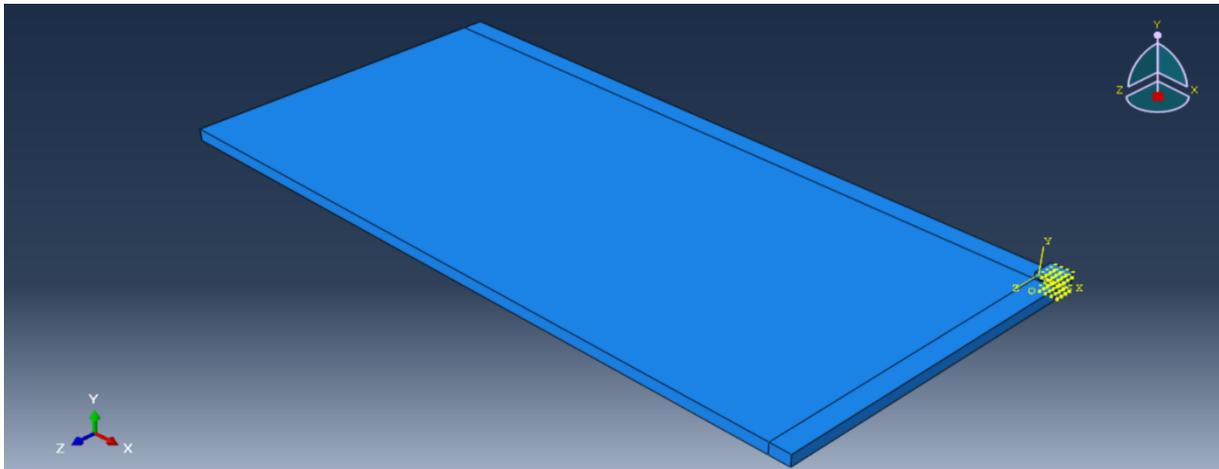


Figure II-2 : Assemblage PCB/puce

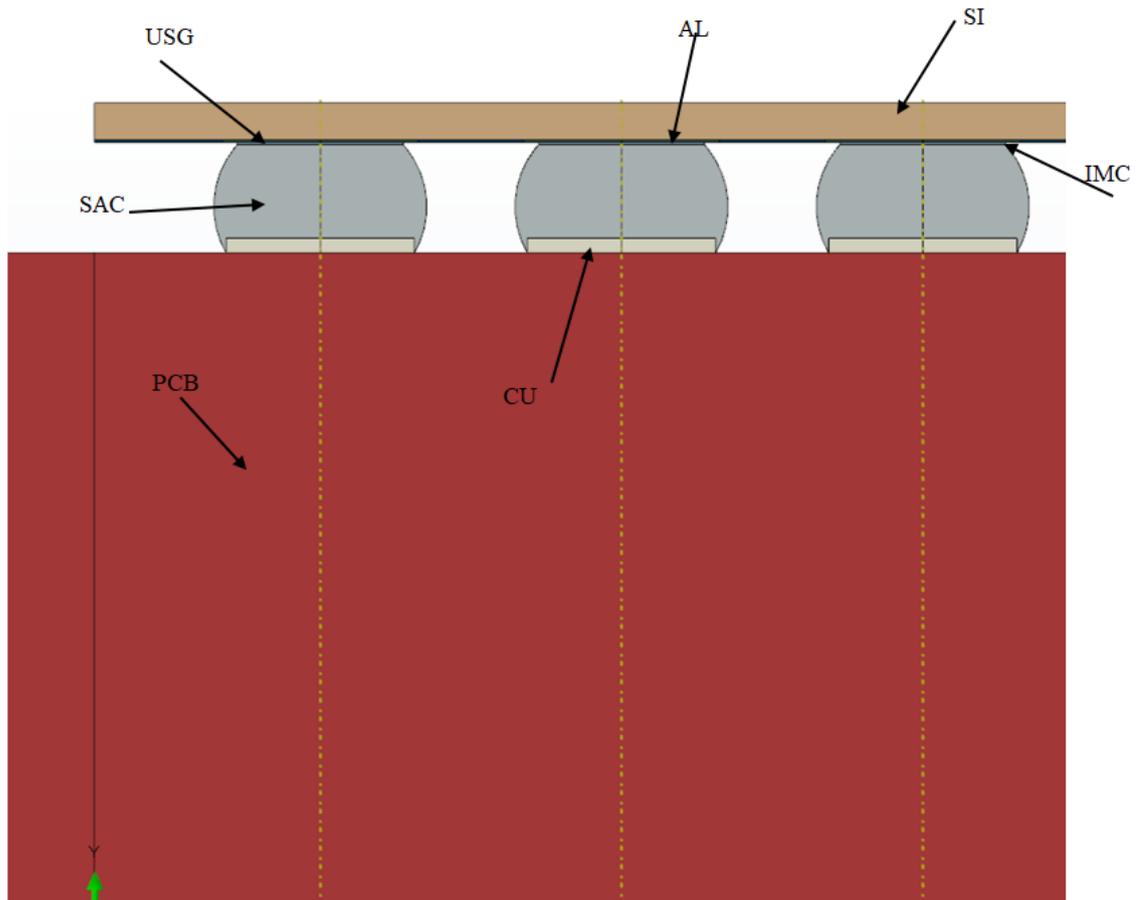
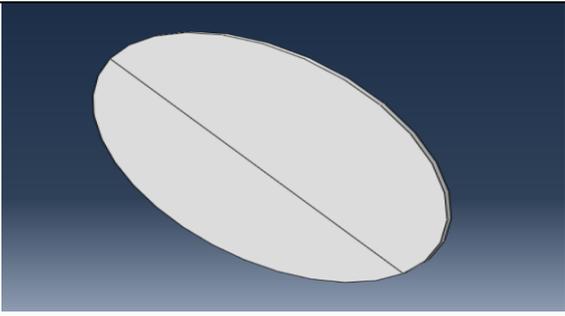
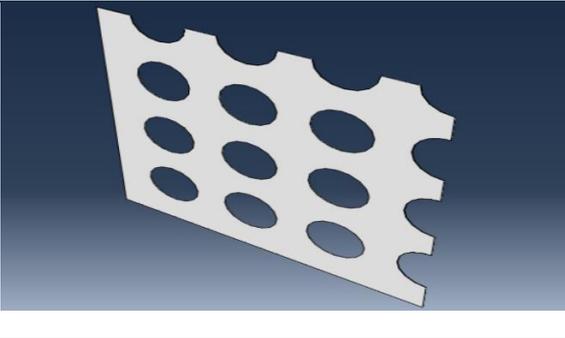
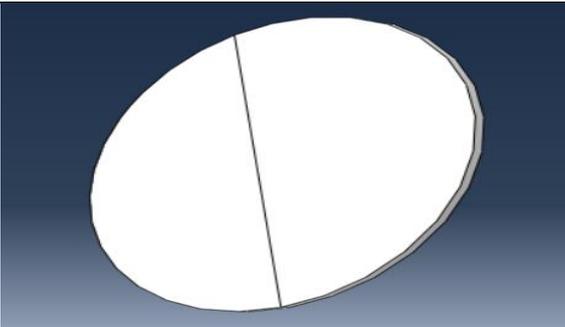
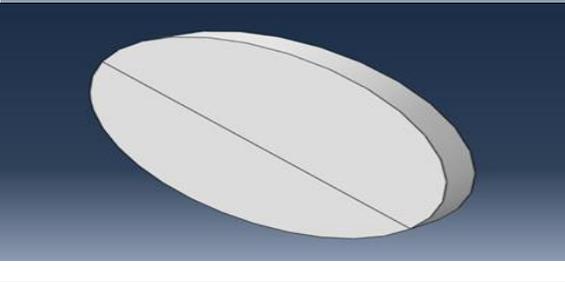
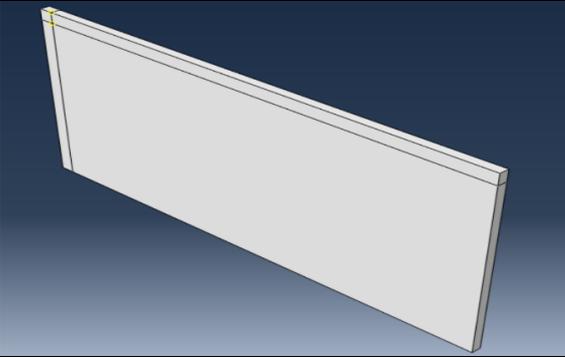
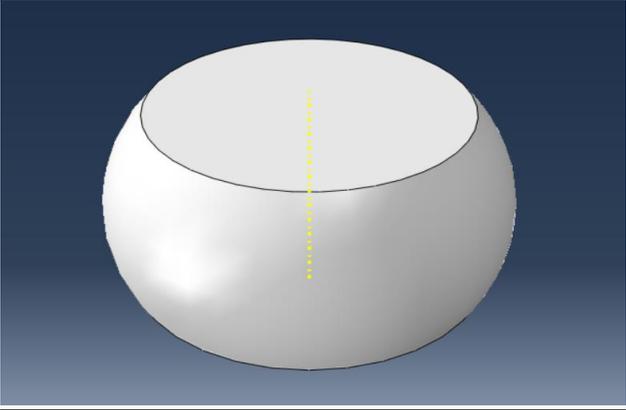
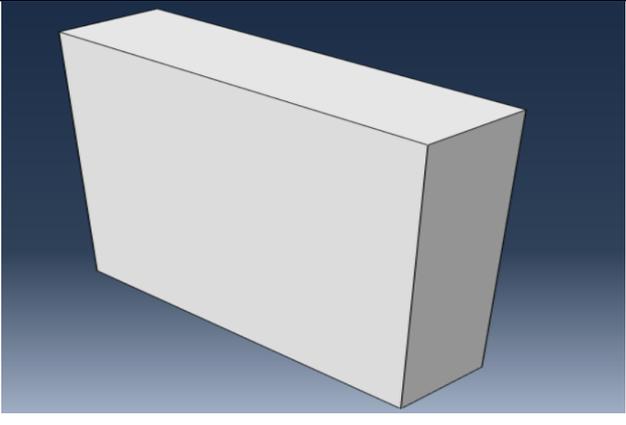


Figure II-3 : Assemblage de la structure

Tableau II-1 les géométries des éléments constituant notre modèle numérique.

<p>AL</p>		<p>Rayon = 0.13mm Epaisseur = 1.5um</p>
<p>USG</p>		<p>Hauteur = 1.5mm Largeur = 1.5mm Epaisseur = 3um</p>
<p>IMC</p>		<p>Rayon = 3mm Epaisseur = 0.001mm</p>
<p>CU</p>		<p>Rayon = 0.125mm Epaisseur = 0.02mm</p>
<p>PCB</p>		<p>Hauteur = 24mm Largeur = 50.5mm Epaisseur = 1mm</p>

<p>SAC</p>		<p>Hauteur =0.15um</p> <p>Rayon =0.13um</p>
<p>SI</p>		<p>Hauteur =1.5mm</p> <p>Largeur =1.5mm</p> <p>Epaisseur = varie de 0.05 à 0.4mm</p>

II.4. Propriétés mécaniques des matériaux utilisés

Les principales propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau II.2.

Les matériaux utilisés dans nos modèles numériques et leurs propriétés mécaniques sont résumés dans le tableau II-2.

Matériaux	E [GPa]	Coeff.Poisson	Comportement Plastique	
			Constraint [MPa]	Deformation plastique
PCB	20	0.28	-	-
Cuvier	110	0.34	33	0
			210	0.6
SAC	45	0.3	15	0
			25	0.006
			29	0.019
			30	0.052
USG	90	0.3		
Al	71	0.33	280	0
IMC	92	0.33	-	-
Si	131	0.3	-	-

Tableau II-2 : propriétés des matériaux introduites dans les modèles numériques. [4]

II.5. Conditions aux limites et de chargement

L'essai de chute est modélisé en imposant une accélération normalisée sur l'assemblage, la simulation est donc dynamique. Nous avons tenté de faire cette approche mais le nombre important de matériaux, d'interfaces de contact et discontinuités géométriques nous a posé un énorme défi. En effet, toutes les machines de calculs dont nous disposons étaient incapables de mener ces calculs faute de puissance et de mémoire. Nous nous sommes donc tournés vers des simplifications.

Sachant que l'essai de chute provoque un déplacement du PCB qui à son tour provoque des tensions sur les billes de brasure provoquant leurs déformations plastique. Cette constatation a été mesurée expérimentalement et estimée numériquement par les travaux de BELHENINI. [4]

Nous avons donc remplacé la simulation dynamique en imposant une accélération par une approche statique en imposant le déplacement mesuré expérimentalement. Le problème revient donc à résoudre un système de flexion 3 points.

Les conditions dans lesquelles nous avons travaillé dans la simulation de la flexion 3 points :

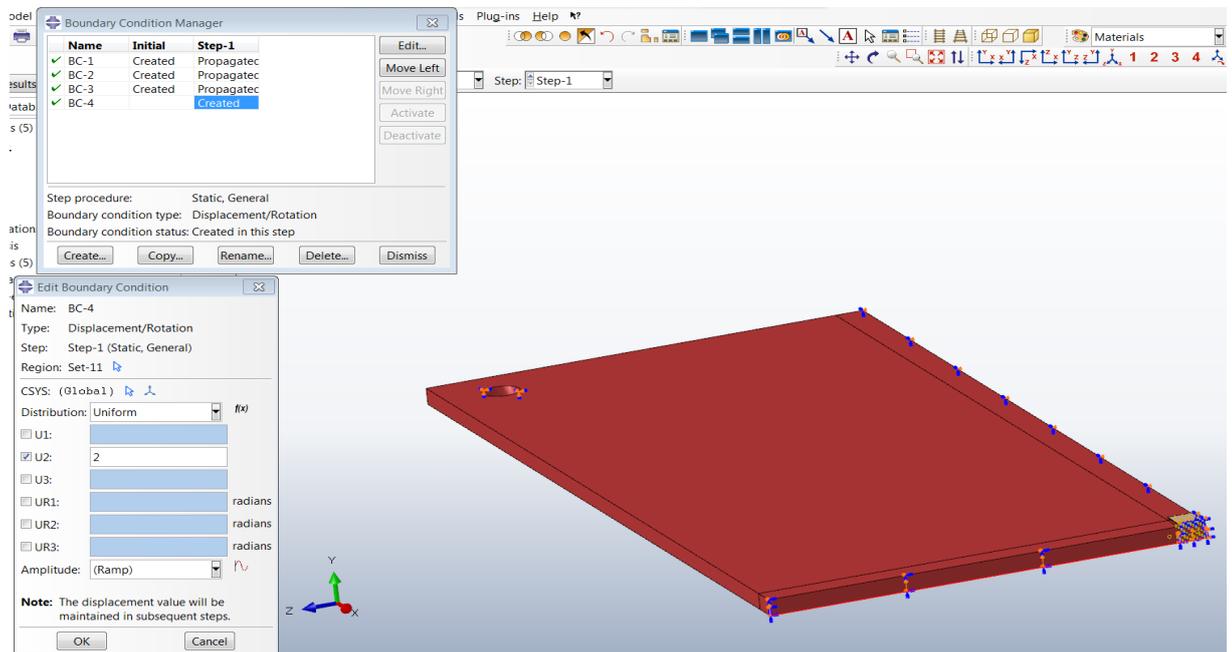
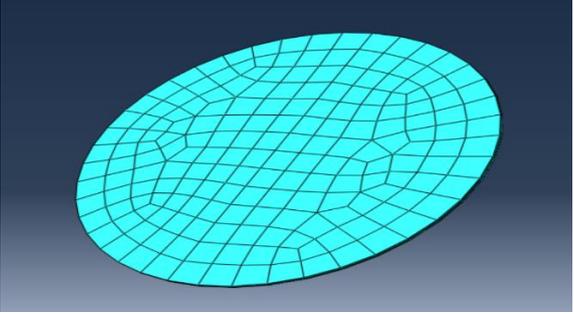
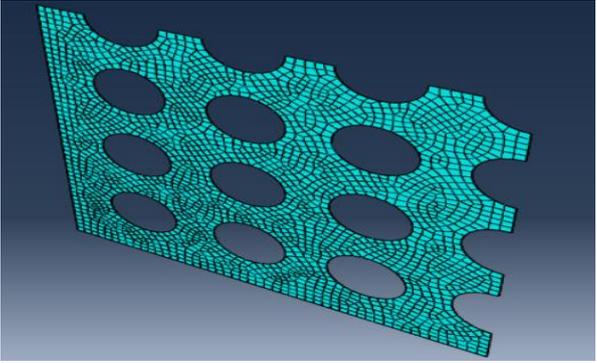
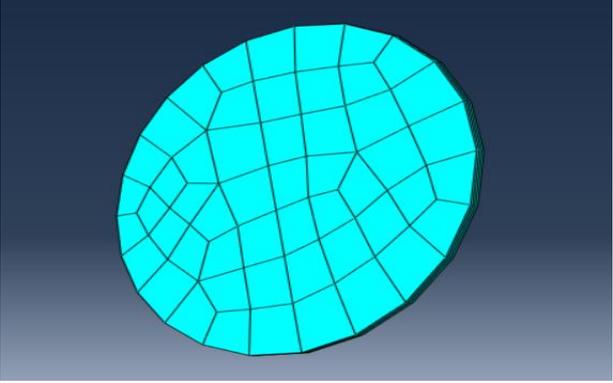
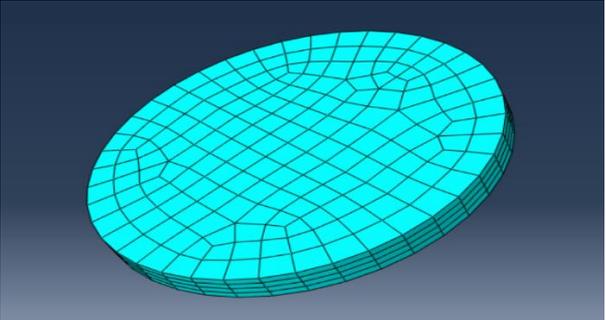
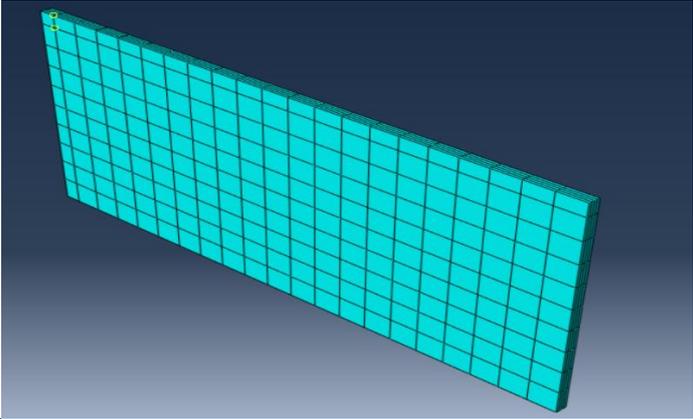
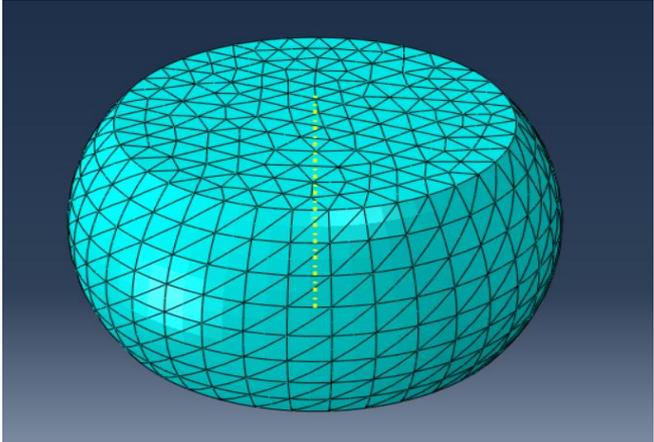
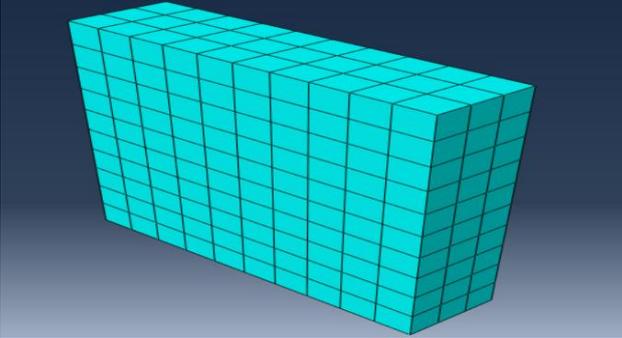
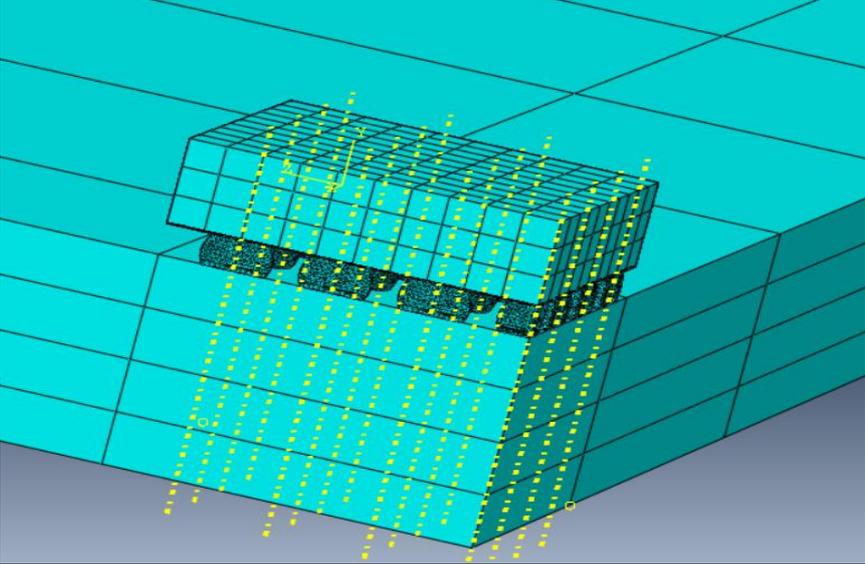


Figure II-4 : représentation des conditions aux limites et des symétries suivant X et Y

II.6. Maillage

Le Tableau II-3 représentée le maillage des différentes pièces.

Pièce	Image du maillage
AL	
USG	
IMC	
CU	

<p>PCB</p>	
<p>SAC</p>	
<p>SI</p>	
<p>Assemblage final</p>	

II.7. Technique de calcul

Sur Abaqus nous avons employé la méthode explicite afin de réduire le temps de calcul Sachant qu'un modèle simplifié (la méthode directe) parce que cette méthode il gagne le temps et coût sur la simulation afin de simplifier notre modèle et en plus Nous venons de prendre $\frac{1}{4}$ de modèle globale.

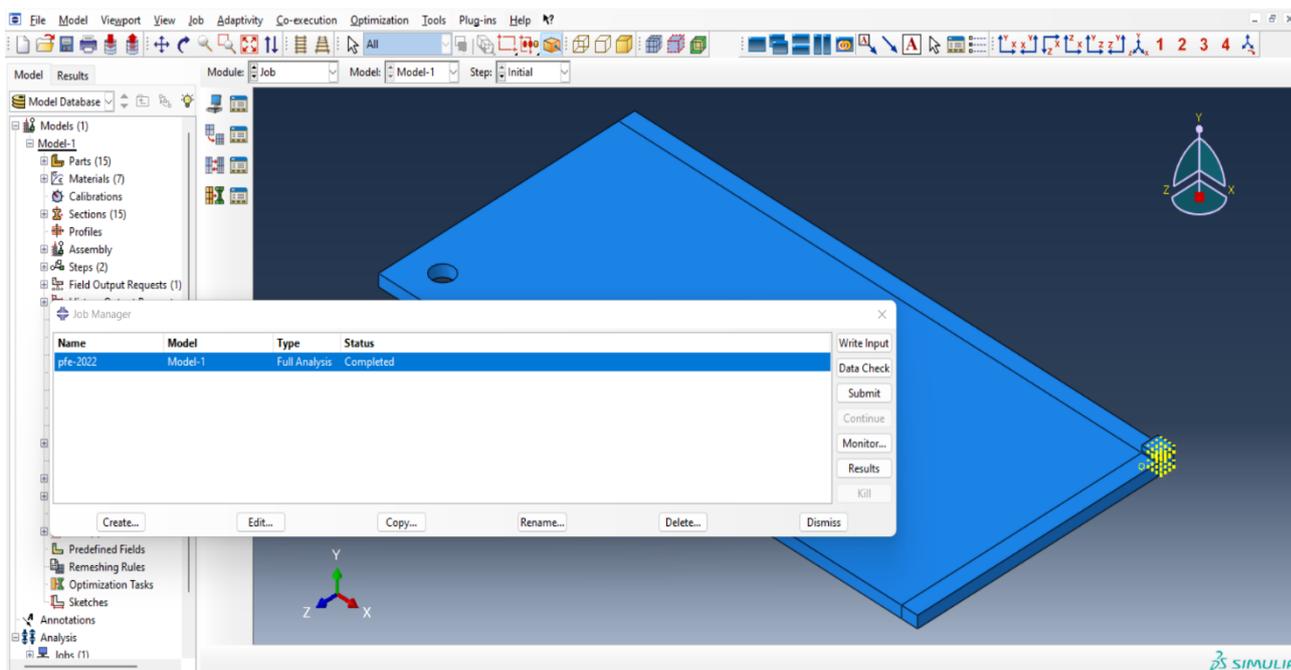


Figure II-4 : Technique de calcul sur Abaqus

II.8. Résultats attendus de la simulation.

Le but de notre simulation est de déterminer la contrainte de Von Mises et la déformation plastique des éléments constituant l'assemblage. Les effets de l'épaisseur de la puce ainsi que celui du matériau de la brasure sont étudiés.

CHAPITRE III

Résultats numériques, discussions et perspectives

Chapitre III : Résultats numériques, discussions et perspectives

III.1. Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans les éléments constituant le microcomposant.

Un déplacement de 2 mm est imposé au PCB durant la simulation de la flexion trois points. La réponse, en contrainte équivalente de Von Mises, de ce dernier est présentée par la figure III-1. Nous constatons que le déplacement maximal est enregistré au centre du PCB. Notre choix de maitre une puce au milieu est donc justifiée car cette zone est la plus critique. La contrainte équivalente maximale est de 286,9 MPa enregistrée au niveau de l'encastrement.

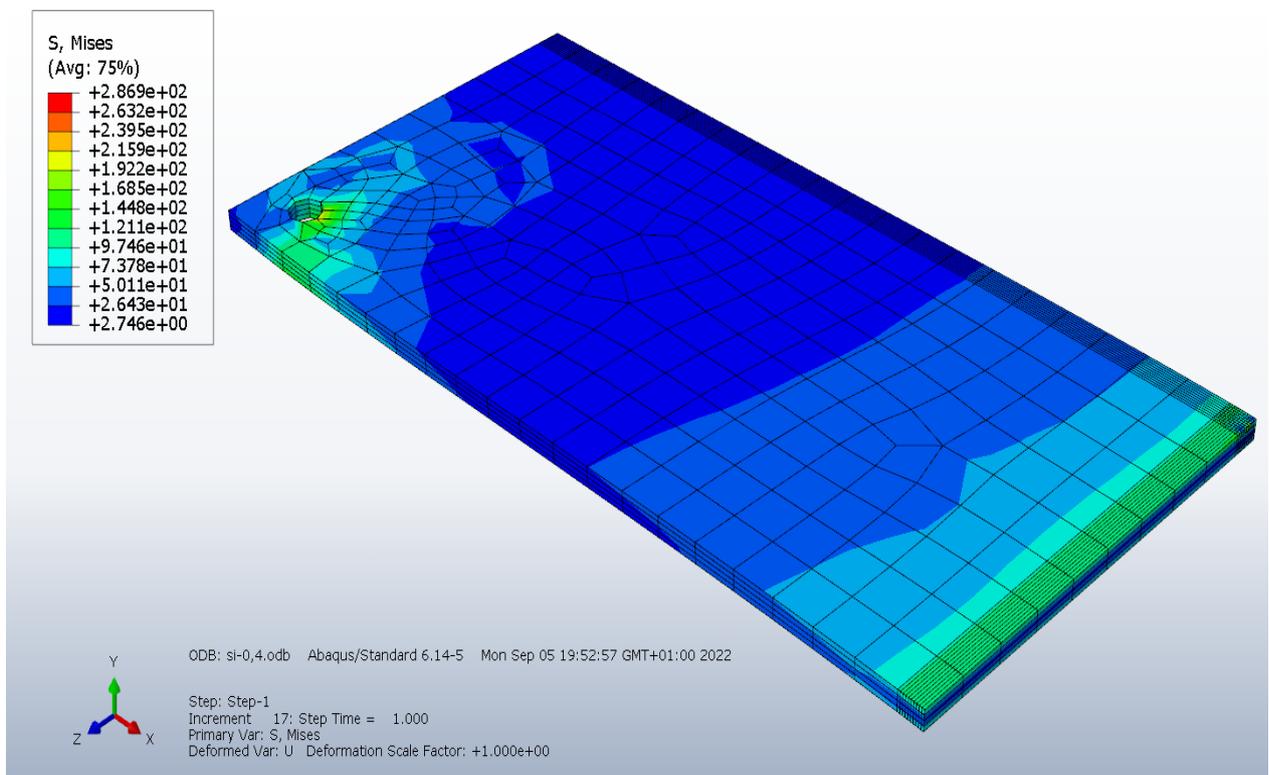


Figure III-1 : Contraintes équivalentes de Von Mises du PCB.

La figure III.2 montre le déplacement maximal du PCB. Ce dernier est enregistré au niveau du centre du PCB là où la puce est placée.

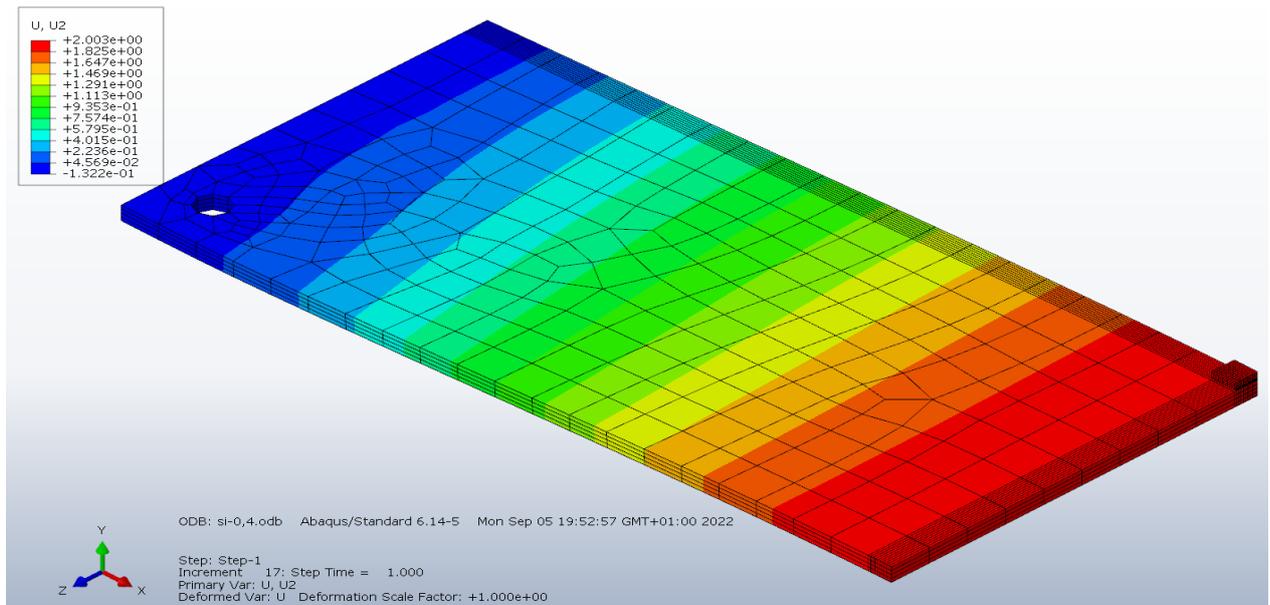


Figure III-2 : Déplacement du modèle complet

Le silicium de la puce

Le silicium de la puce présente de faibles valeurs de contraintes concentrées au centre de la puce. Une valeur maximale de 95.2 MPa est estimée. Cette valeur reste loin de la résistance à la rupture du silicium, qui, rappelons-le, est une céramique très dure.

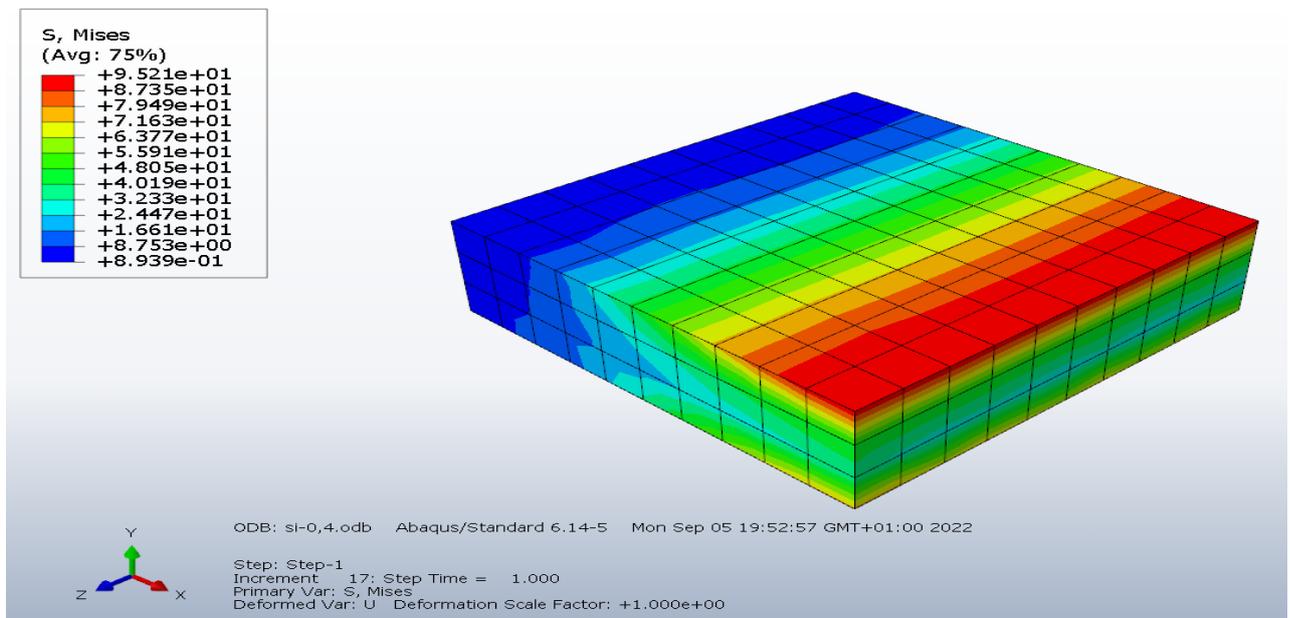


Figure III-2 : Etat de contraintes du silicium.

Cuivre

Les plots de cuivre sont des éléments de liaison entre les billes d'interconnexions et le PCB. Sous l'effet de la flexion du PCB, le cuivre présente l'état de contrainte illustré par la figure III-3. Nous remarquons que la valeur maximale de la contrainte équivalente de Von mises est de 314.3 MPa.

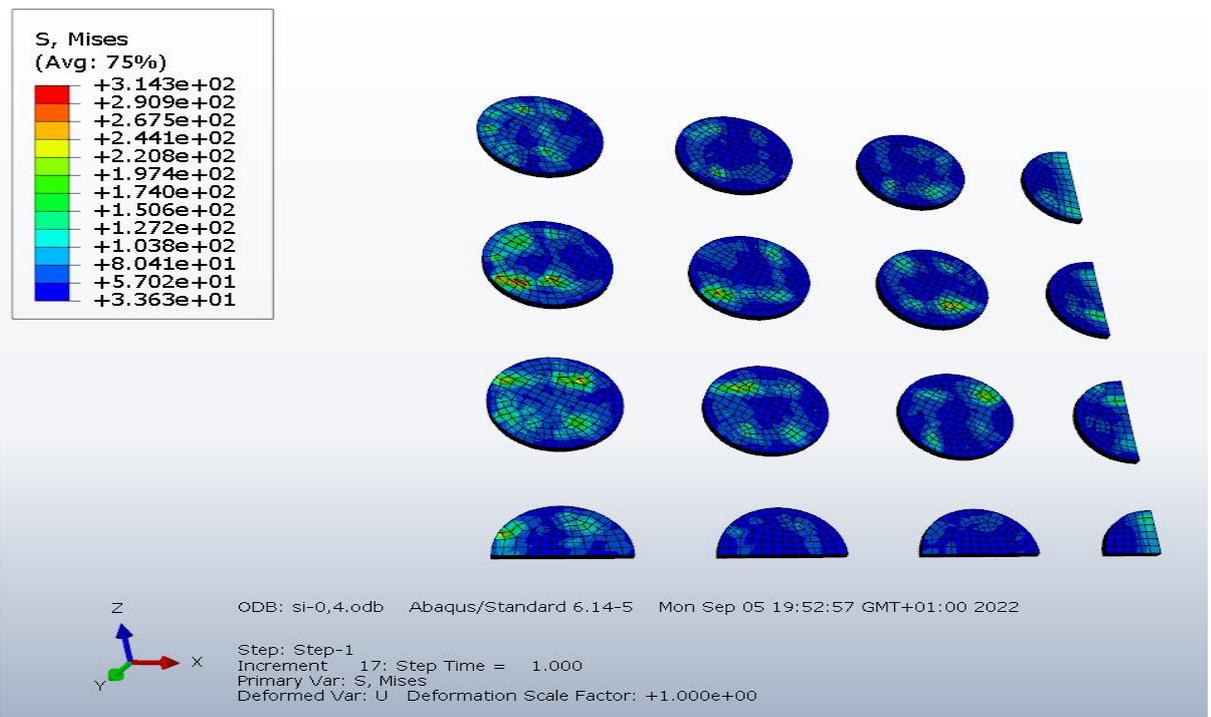


Figure III-3 : Etat de contraintes équivalentes dans le cuivre.

La brasure

Les billes de brasure sont les éléments qui assurent deux rôles ; une liaison électrique entre la

puce et la PCB et une liaison mécanique entre ces deux éléments. L'estimation de la réponse mécanique de ces éléments est importante pour l'estimation de la fiabilité de l'assemblage.

La figure III-4 montre l'état de la contrainte des billes de brasure et sa valeur est estimée à 30 MPa.

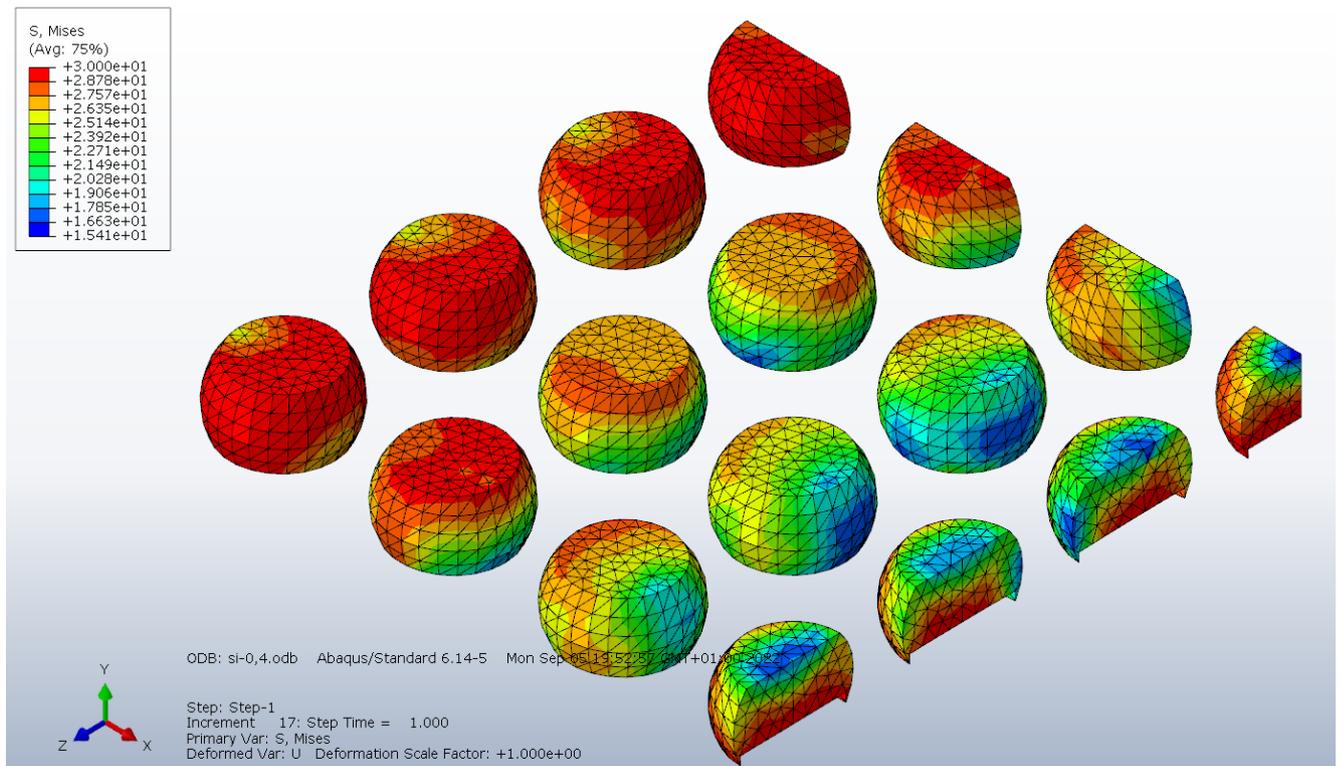


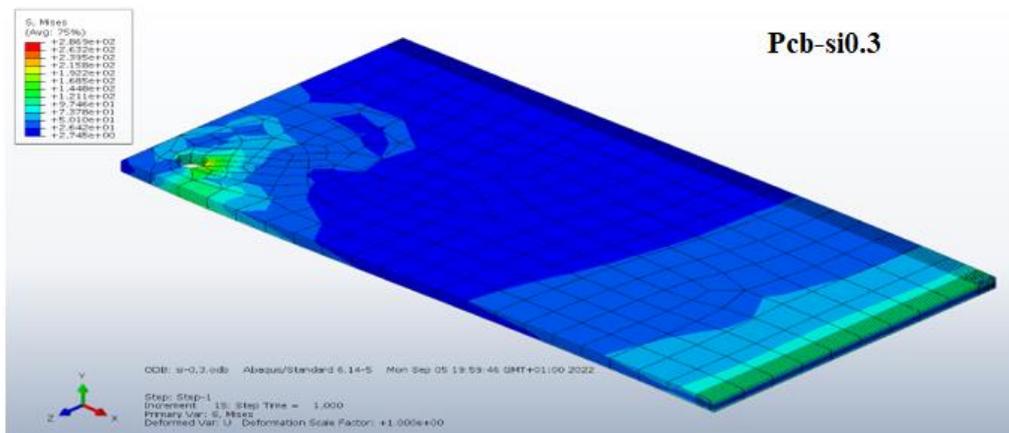
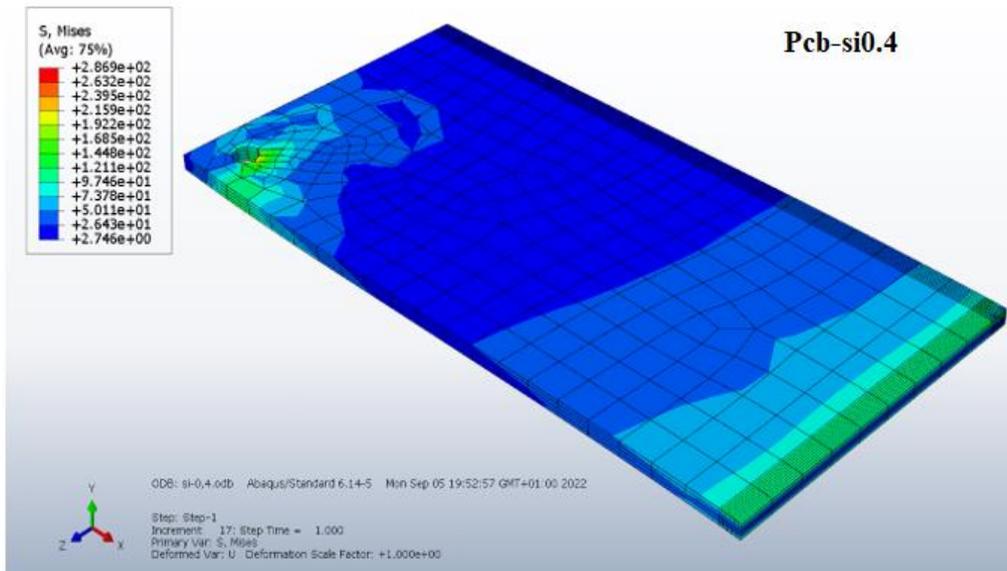
Figure III-4 : Etat de contraintes équivalentes dans le Sac.

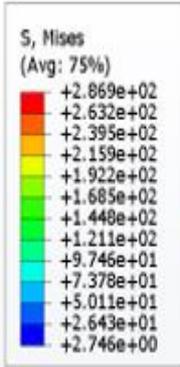
III.2. Effet de l'épaisseur de la puce

Le monde de la microélectronique se dirige vers des puces de plus en plus petites. De ce fait, nous avons tenté de comprendre l'effet de l'épaisseur de la puce sur la réponse mécanique des éléments constituant le microcomposant. Une variation de 0.05 à 0.4 mm de l'épaisseur du Si est étudiée.

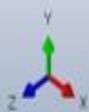
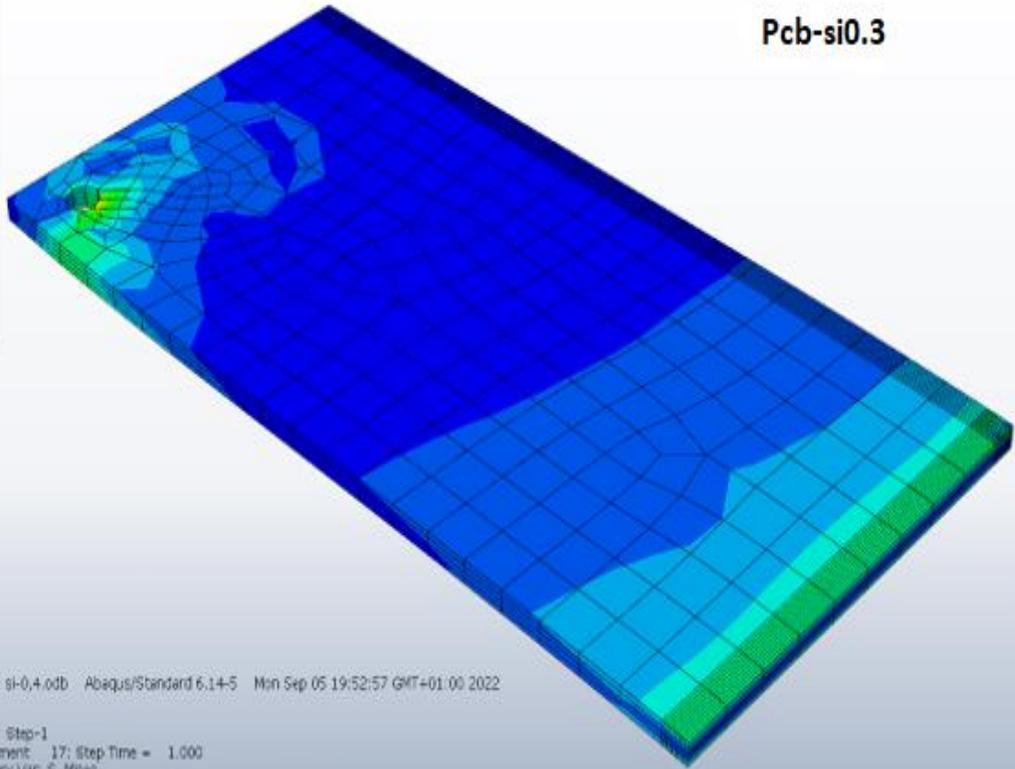
III.2.1. Sur les contraintes équivalentes du PCB

La répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le PCB reste inchangée quel que soit l'épaisseur de la puce en Si (Figure III.6). La valeur de la contrainte équivalente avoisine les 287 MPa.



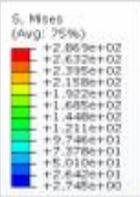


Pcb-si0.3

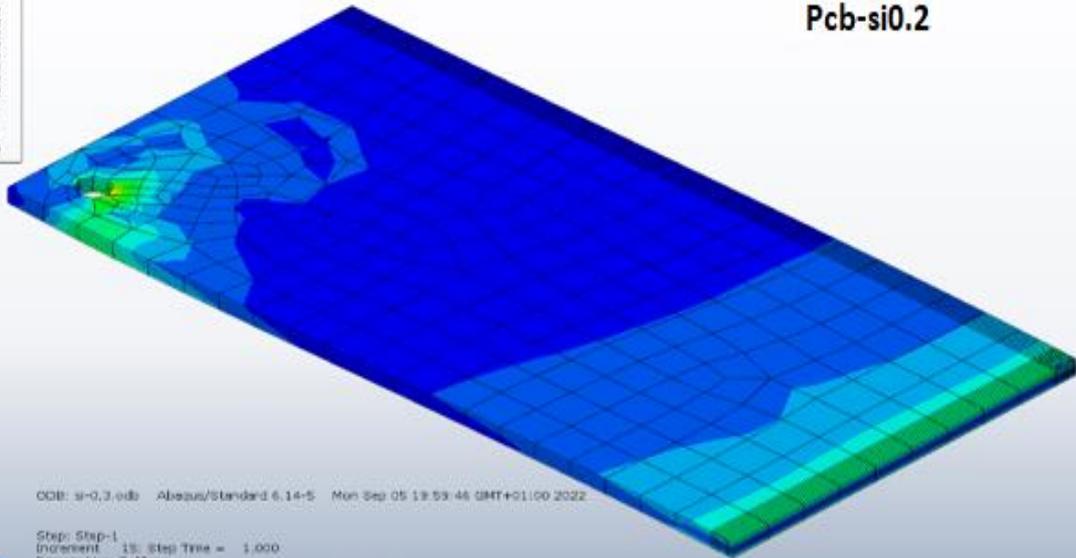


ODB: si-0,4.odb Abaqus/Standard 6.14-5 Mon Sep 05 19:52:57 GMT+01:00 2022

Step: Step-1
Increment: 17; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Pcb-si0.2



ODB: si-0,3.odb Abaqus/Standard 6.14-5 Mon Sep 05 19:59:46 GMT+01:00 2022

Step: Step-1
Increment: 13; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

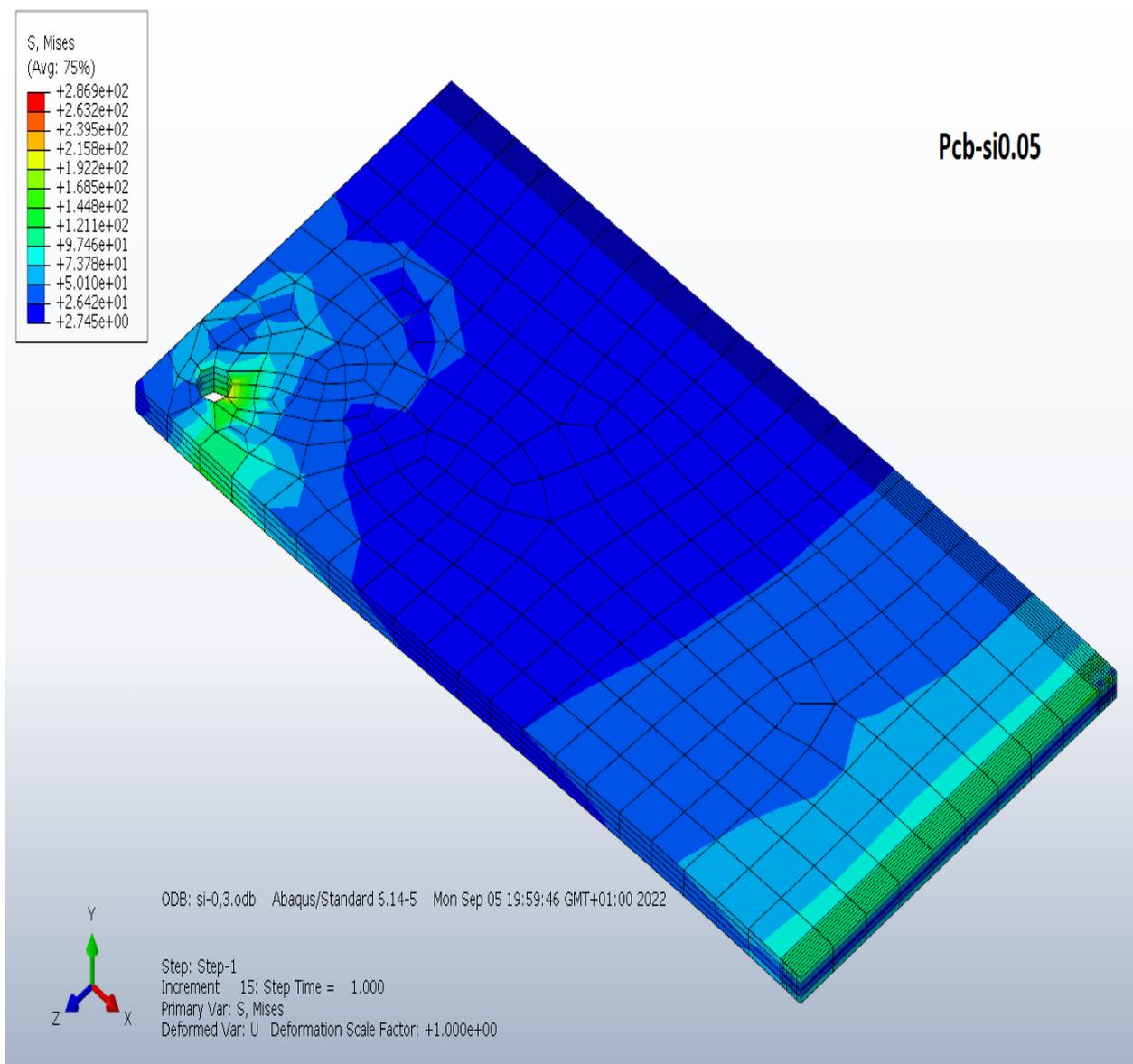


Figure III-6 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM dans la passivation.

III.2.2. Sur les contraintes équivalentes du Si

Pour (Figure III.7). Les valeurs maximales de contraintes équivalentes dépendent fortement de la taille de la puce. Une comparaison de ces valeurs sous forme d'histogrammes est présentée par la figure III.10.

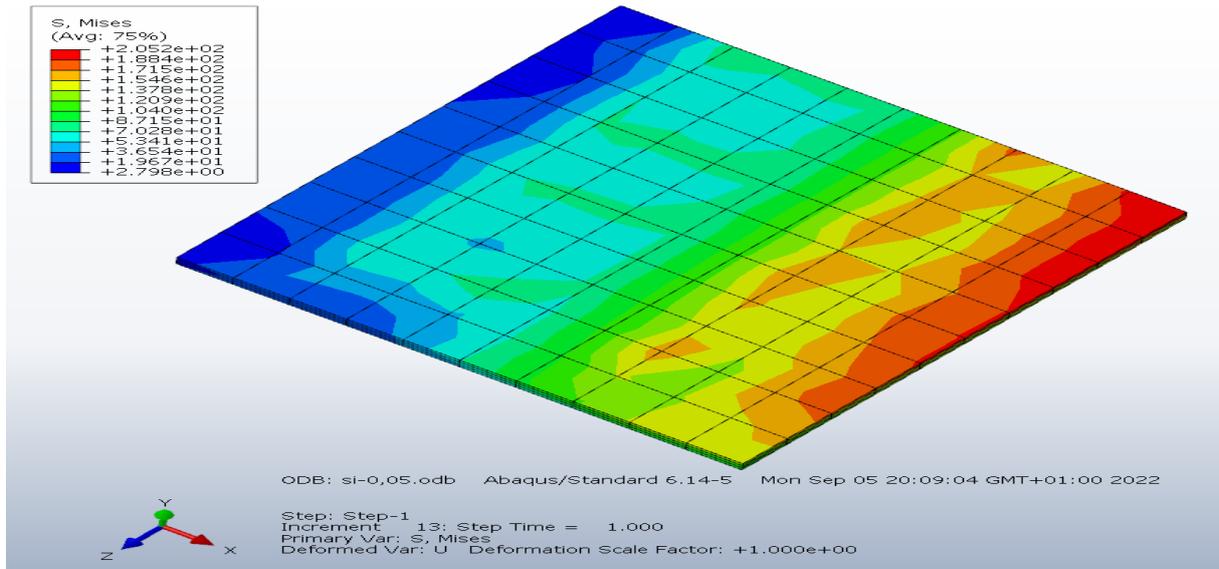


Figure III-7 : Influence qualitatif de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM dans le silicium.

III.2.3. Sur les contraintes équivalentes du cuivre

Pour les plots de cuivre, les contraintes équivalentes maximales sont enregistrées sur le côté en contact avec le PCB. Cette remarque est valable quel que soit l'épaisseur de la puce comme indiquée sur la figure III.8..

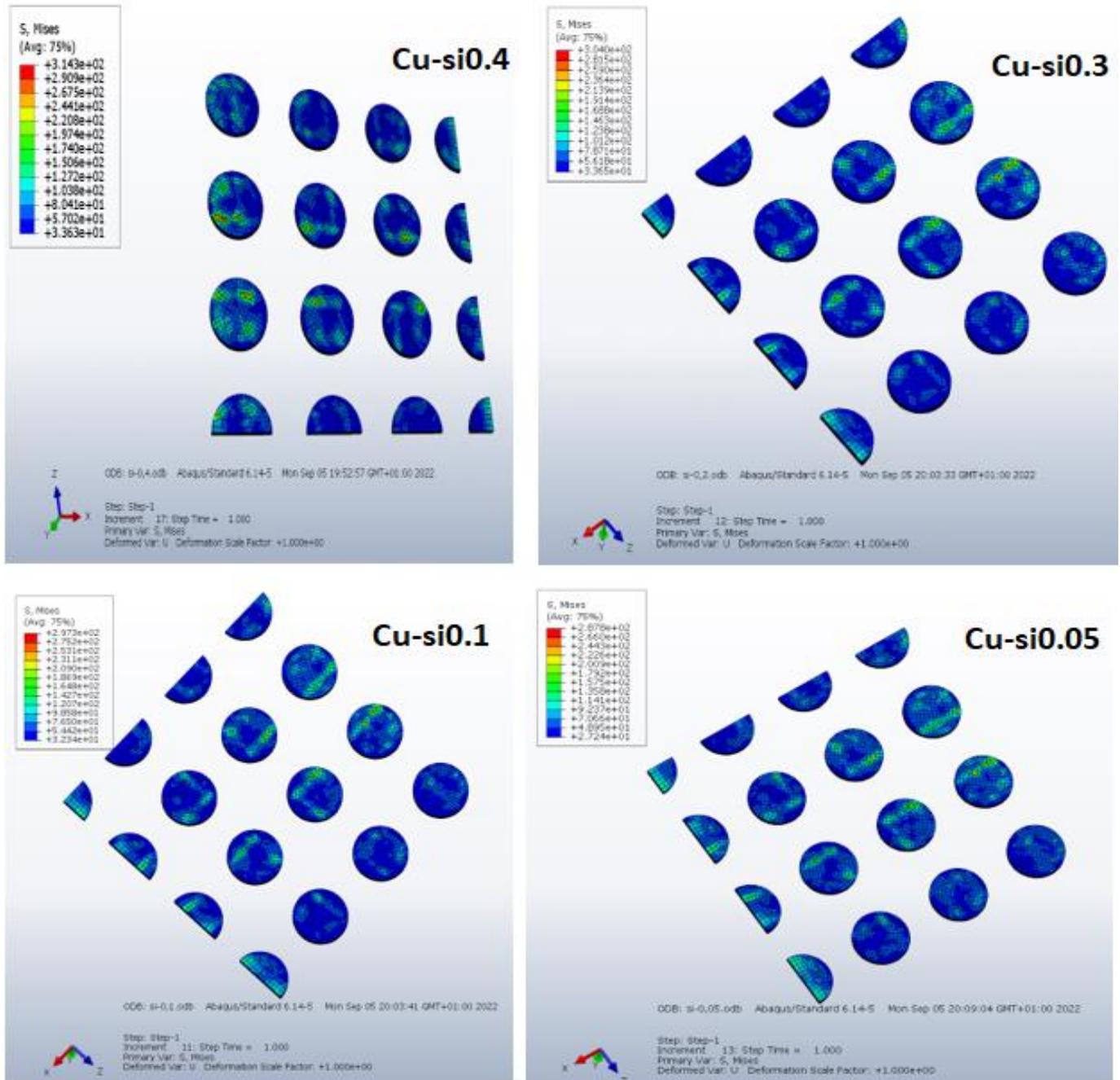


Figure III-8 : Influence qualitative de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM dans le Cuivre.

III.2.4. Sur les contraintes équivalentes du SAC

L'intensité et la répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans les billes de

brasure ne présentent aucune dépendance avec l'épaisseur du Si. Les zones à fortes concentration de contraintes et les valeurs maximales de ces dernières restent les mêmes quel que soit l'épaisseur du Si comme le montre la figure III.9.

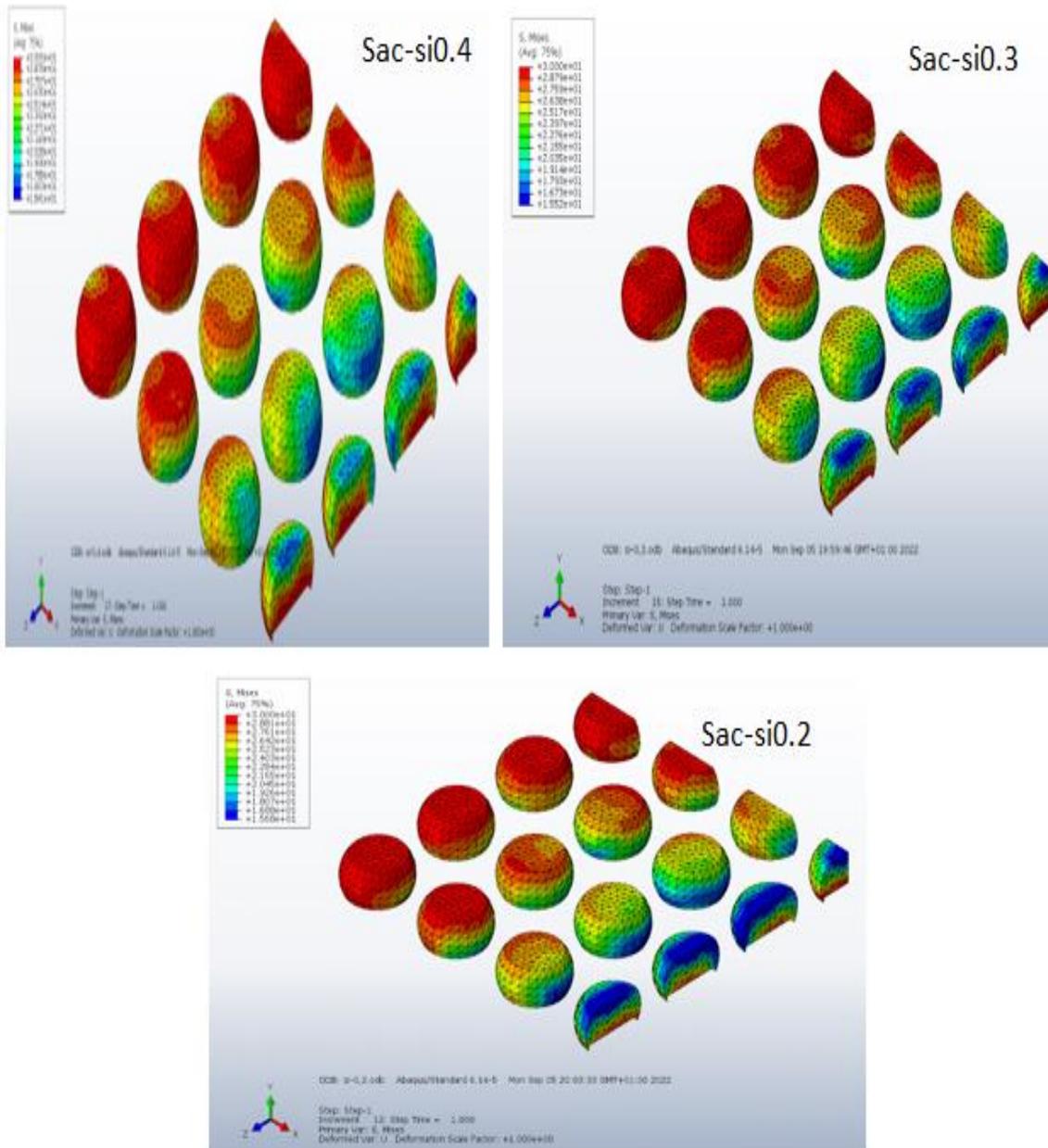


Figure III-9 : Influence qualitative de l'épaisseur des puces sur la répartition des contraintes VM dans le Sac.

III.2.5. Comparaison des valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises en fonction de l'épaisseur de la puce.

La figure III.10 donne une comparaison des valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises concernant le PCB, le Si ainsi que les plots de cuivre en fonction de l'épaisseur des puces.

- Pour le PCB, les valeurs maximales des contraintes restent identiques quel que soit l'épaisseur du Si. La valeur de la contrainte maximale estimée au niveau du PCB est estimée à 287 MPa.
- Pour le Si, les valeurs maximales des contraintes équivalentes de Von Mises augmentent avec la diminution de l'épaisseur de Si. Pour une Si de 0.4mm d'épaisseur, la valeur maximale de la contrainte est de 95.21 MPa. Cette valeur augmente avec la diminution de l'épaisseur pour arriver à 205.2 MPa pour un Si de 0.05mm d'épaisseur.
- Pour les Plots de cuivre, la tendance est la diminution de la valeur de la contrainte maximale de Von Mises avec la diminution de l'épaisseur de Si à l'exception de l'épaisseur de 0.3 mm. Les valeurs des contraintes équivalentes maximales dans les plots de cuivre varient entre 314.3 MPa pour un Si de 0.4mm d'épaisseur à 287.8MPa pour un Si de 0.05 d'épaisseur.

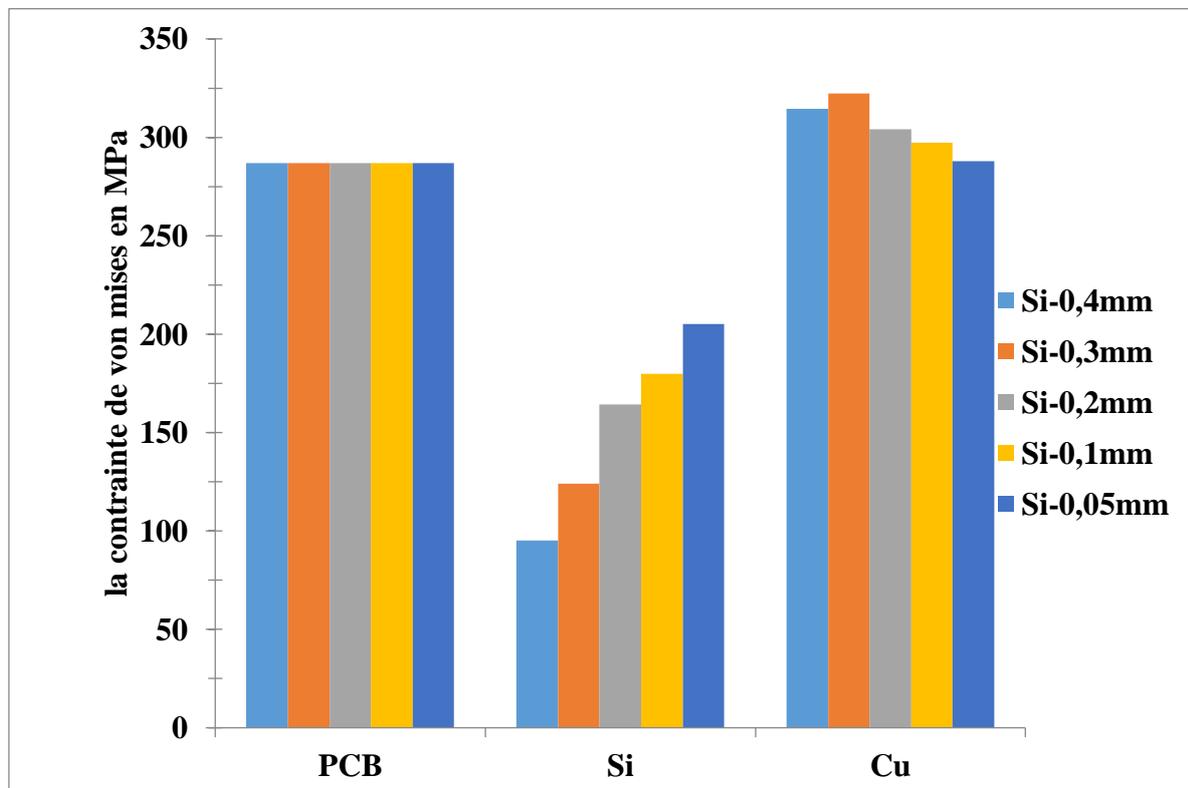


Figure III-10 : Histogramme de la contrainte globale de Von Mises

III.3. Répartition des déformations plastiques dans les éléments élastoplastiques SAC.

La figure III-11 montre l'état de la déformation plastique des billes de brasure pour plusieurs épaisseurs de Si. Nous constatons que la bille critique se trouve au coin de la puce quel que soit l'épaisseur de la puce.

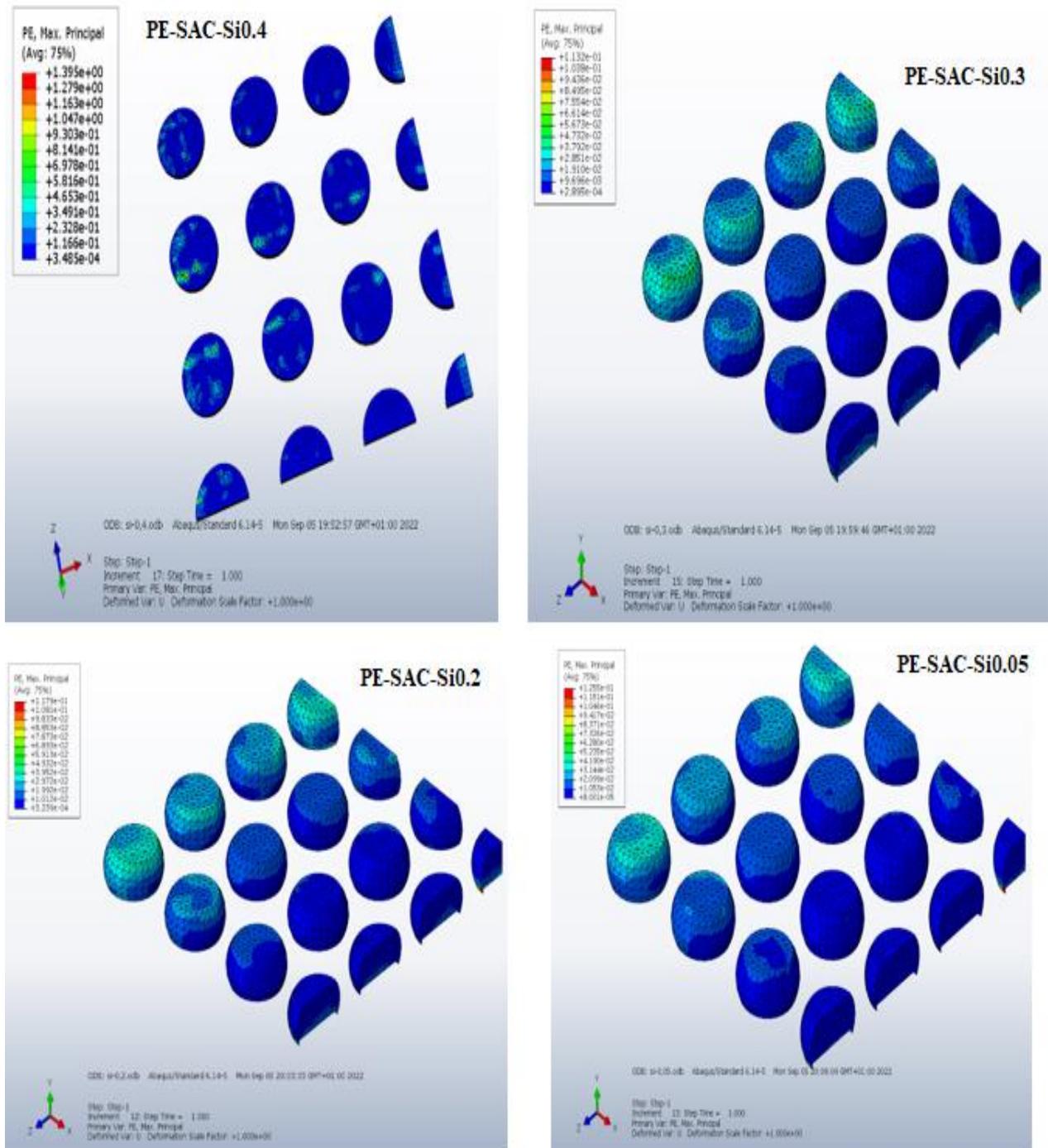


Figure III-11 : déformation plastique du Sac

La comparaison des valeurs des déformations plastiques maximales en fonction de l'épaisseur de Si est donnée par la figure III.12. On constate une diminution des valeurs de la déformation plastique des billes avec la diminution de l'épaisseur du Si.

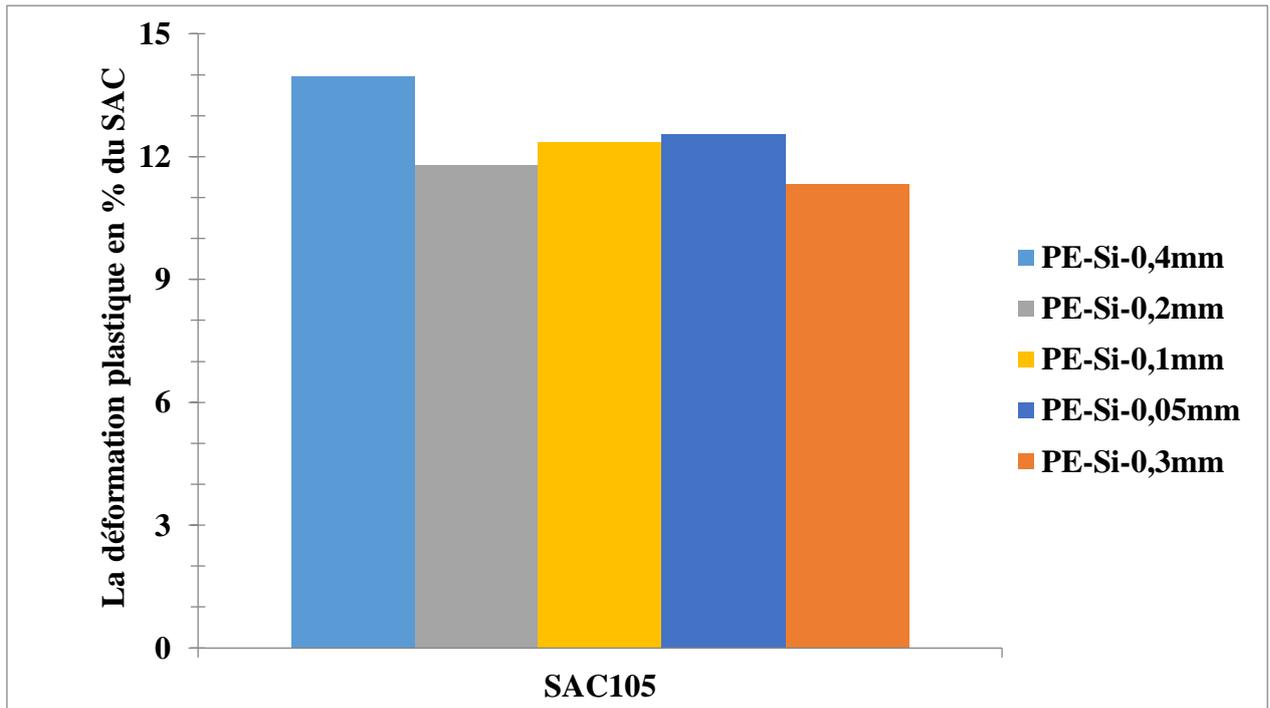


Figure III-11 : Variation de la déformation plastique maximale des billes de brasure en fonction de l'épaisseur du Si.

Conclusion générale

Les microcomposants électroniques sont présentés comme étant des solutions prometteuses pour participer à la miniaturisation des appareils électriques du quotidien. A cause de leurs utilisations généralisées dans des environnements hostiles, les microcomposants doivent résister à des sollicitations différentes. La tenue mécanique des microcomposants est importante car une défaillance mécanique engendre forcément une défaillance électrique.

Dans la présente étude, et pour des raisons de simplification, nous avons remplacé la modélisation numérique d'un essai de choc couramment utilisé pour estimer la fiabilité des microcomposants électroniques par un essai de flexion 3 points. Nous avons développé des modèles numériques permettant d'estimer la tenue mécanique en flexion des microcomposants assemblés sur des circuits imprimés. L'effet de la flexion du PCB sur la réponse mécanique du composant a été étudié pour plusieurs épaisseur de SI.

Nous avons constaté que :

- ❖ La flexion du PCB provoque une forte sollicitation en cisaillement sur les billes de brasure
- ❖ La bille de brasure située sur le coin de la puce est la plus sollicitée.
- ❖ L'épaisseur de la puce influe sur la tenue mécanique globale.
- ❖ L'amincissement des puces permet d'améliorer leurs tenues mécaniques en diminuant les valeurs des déformations plastiques maximales dans les billes de brasure.

En plus des résultats obtenus, le présent travail nous permis d'améliorer nos compétences en simulations numériques tout en apprenant plusieurs techniques de post-traitement sur Abaqus.

Références Bibliographiques

Références bibliographie

1. Florence Klotz, Lucia Le Clech et Margaux Israël. LA MICROÉLECTRONIQUE. www.cea.fr. [En ligne] juillet 2018. https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets/thematiques/cea_microelectronique.pdf.
2. Wikipédia Composant électronique.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Composant_%C3%A9lectronique.
3. Hugues Granier, Pierre-François Calmon, Laurent Mazon, Monique Dilhan, Véronique Conédéra, Stéphane Aouba, Comment naissent les puces électroniques, Fabrication de micro et nano composants dans la salle blanche, vol 20.
4. Etude de structures de composants micro-électroniques innovants (3D) Caractérisation, modélisation et fiabilité des démonstrateurs 3D sous sollicitations mécaniques et thermomécaniques. **BELHENINI, Soufyane**. 19 Décembre 2013.
5. www.abaqus.com
6. P. Hoang, Handbook of reliability engineering, Springer éd., Springer, 2003.
7. **ZANNIR, Olivier ANSART . Fabien AVRILLAS . Eric KREMER . Ibrahima NIANG . Karim**. Apprentissage du crash sur Abaqus. [En ligne] http://perso.univ-lemans.fr/~fcalvay/projetsmnr/v/model_crash_abaqus.htm#_Toc97362344.
8. core Lauderdale. eHow Contributor , Uses of Microchips Availableat: http://www.ehow.com/about_5711377_uses-microchips.html, (2016), vol 16 .
9. Groupe Zwick Roell , Essais sur Composites Essais de flexion 4point ,vol 10.
10. <http://org-www.3ds.com/>,**ABAQUS**, ABAQUS/CAE, © 2002-2016 Dassault Systèmes - All rights reserved, vol 16.
11. Nabil Bentaleb, Etude de la résistance mécanique des microcomposants électroniques, Propriété du matériau, vol 33,23-24-25/33.

12. Cédric. Le Coq, «Prédiction de la fiabilité de composants électroniques de type WL-CSP soumis à des sollicitations mécaniques,», thèse de doctorat, Université François-Rabelais de TOURS, Tours, 2010,p.131.