

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب عين تموشنت
Université Belhadj-Bouchaib d'Ain-Témouchent
Faculté des Sciences et de la Technologie



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

**Estimation numérique de la fiabilité mécanique d'un
microcomposant électronique par des tests accélérés**

Présenté par :

1. SAHLI Mohamed Zakaria
2. BAKADIR Sidi Mohammed

Encadré par:

Dr. BELHENINI Soufyane

Co-Encadré par :

EL FATMI Imad

Devant le jury composé de :

Pr BENZAAD Bourassia

Pr BOUAFIA Farida

Année : 2020/2021

Abstract

The work described in this thesis involves the mechanical reliability of an accelerated electronic microcomponent estimation by tests.

Electronic micro components must withstand the electrical, thermal, mechanical and chemical constraint generated by storage, transport, handling, operation and the environment.

The origin of mechanical constraint can be pure mechanical constraint (vibrations and mechanical shocks, etc.), thermal stresses (thermal cycle) or a combination of the two sources, which are the cause of most failures during operation.

Numerical finite element simulations were carried out in order to evaluate the impact of a certain number of geometric parameters on the mechanical response of a micro component mounted on a printed circuit. Thus, the effects of the variation of the thickness of the Si chip and of the solder balls on the overall mechanical behavior were studied.

Résumé

Le travail décrit dans notre rapport de mémoire implique l'estimation numérique de la fiabilité mécanique d'un microcomposant électronique par des tests accélérés.

Les microcomposants électroniques doivent résister aux contraintes électriques, thermiques, mécaniques et chimiques générées par le stockage, le transport, la manutention, l'exploitation et l'environnement.

L'origine des contraintes mécaniques peut être des contraintes mécaniques pures (vibrations et chocs mécaniques, etc.), des contraintes thermiques (cycle thermique) ou une combinaison des deux sources, qui sont à l'origine de la plupart des pannes pendant le fonctionnement.

Des simulations numériques par éléments finis ont été menées dans le but d'évaluer l'impact d'un certain nombre de paramètres géométriques sur la réponse mécanique d'un microcomposant monté sur un circuit imprimé. Ainsi, les effets de la variation de l'épaisseur de la puce en Si et des billes de brasure sur le comportement mécanique globale ont été étudiés.

ملخص

يشتمل العمل الموصوف في تقرير مذكرتنا على تقدير رقمي لمصادقية الميكانيكية لعنصر الكتروني مصغر من خلال اختبار مسرع.

ويجب أن تتحمل المكونات الدقيقة الإلكترونية الضغوط الكهربائية والحرارية والميكانيكية والكيميائية الناتجة عن التخزين والنقل والمناولة والتشغيل والبيئة.

إن أصل الضغوط الميكانيكية قد يكون ضغوطا ميكانيكية نقية (الاهتزازات الميكانيكية والصدمات وما إلى ذلك)، أو الضغوط الحرارية (الدورة الحرارية)، أو مزيج من المصدرين اللذين يشكلان مصدر أغلب حالات الفشل أثناء التشغيل.

تم إجراء عمليات محاكاة عديدة بواسطة العناصر المحددة من أجل تقييم تأثير عدد معين من الاعدادات الهندسية على الاستجابة الميكانيكية لمكون دقيق مركب على دائرة مطبوعة. وهكذا ، تمت دراسة تأثير تغير سمك رقاقة السيليسيوم والروابط على السلوك الميكانيكي الكلي.

Remerciement

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. Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans le caractère judicieux de ses orientations et la rigueur de ses conseils.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les intervenants Monsieur El FATMI Imad, AMEUR Mecellem et KHELLADI DOUAA qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

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.

Table des matières

CHAPITRE I : Généralité.....	15
1.1 Introduction.....	15
1.2 Historique sur l'électronique et ses composants.....	15
1.2.1 De la diode à la triode.....	17
1.2.2 Transistor.....	18
1.2.3 Circuit imprimé et circuit intégré.....	19
1.2.4 Le tout sur une puce.....	19
1.3 Procédés de fabrication des composants électronique.....	20
1.3.1 La fabrication de Substrat en silicium.....	21
1.3.2 L'épitation des plaquettes.....	22
1.3.3 La diffusion de dopant.....	22
1.3.4 L'implantation ionique.....	23
1.3.5 L'oxydation.....	24
1.3.6 Les dépôts.....	25
1.3.7 La photolithographie.....	26
1.4 Techniques d'assemblages.....	30
1.4.1 Par brasure.....	30
1.4.2 Par adhésif.....	31
1.4.3 Par thermo compression.....	31
1.4.4 Par Thermosonique.....	32
1.5 Les sollicitations mécaniques et thermomécanique liées au fonctionnement, au stockage des appareils mobiles.....	33
Conclusion.....	35
Chapitre II : Les tests accélérés pour l'estimation de la durée de vie des téléphones portables	36
2.1 Introduction.....	36
2.2 Présentation des tests de flexion 4 points normalisée.....	36
2.2.1 Procédure de test.....	37
2.3 Lois de fatigue et durée de vie.....	40
2.3.1 Modèles de fatigue basés sur la contrainte.....	41
2.3.2 Modèles de fatigue basés sur les déformations.....	41
2.3.3 Modèles de fatigue basés sur le fluage.....	41
2.3.4 Modèles de fatigue basés sur l'énergie.....	42
Conclusion.....	42
Chapitre III : Simulation numérique par éléments finis du test accéléré « flexion répétée »... 43	

3.1	Introduction.....	43
3.1.1	Outil de calcul Abaqus.....	43
3.2	Présentation de la géométrie réelle de l'étude.....	43
3.2.1	Matériau.....	47
3.2.2	Maillage.....	47
3.2.3	Les contacts.....	49
3.3	Etude sur le quart de la géométrie.....	50
3.3.1	Maillage.....	53
3.3.2	Les contacts.....	56
3.4	Comparaison des deux modèles (complet et simplifié ¼).....	56
	Conclusion.....	59
	Chapitre IV : Résultats et discussions.....	60
4.1	Effet de l'épaisseur du silicium.....	60
4.1.1	Effet de l'épaisseur de Si sur la déformation plastique du Sac et du Cu.....	60
4.1.2	Effet de l'épaisseur du Si sur les contraintes équivalentes maximales dans le Si.	62
4.2	Effet de l'épaisseur des billes de brasure.....	64
	Conclusion.....	67
	Conclusion générale.....	68
	Bibliographie.....	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres recommandés et optionnels pour le test de cyclique à 4 points (15)...	36
Tableau 2 : Paramètres du test en chargement (16).....	37
Tableau 3 : Influence de l'amplitude de flexion et de la fréquence sur la durée de vie (16)....	38
Tableau 4 : Propriété des matériaux (14).....	46
Tableau 5 ; Tableau des pièces maillées.....	47
Tableau 6 ; Tableau des pièces maillées (1/2 et 1/4).....	52

Liste des figures

Figure 1 : Composant monté en surface (2).....	15
Figure 2 : Un siècle d'électronique (3).....	16
Figure 3 : La triode (1).....	17
Figure 4 : Transistor (4).....	18
Figure 5 : Circuit intégré et circuit imprimé (5).....	19
Figure 6 : Microprocesseur (6).....	20
Figure 7 : Vue globale de la fabrication de circuits intégré (8).....	20
Figure 8 : Tirage d'un lingot de Silicium (8).....	21
Figure 9 : Four de diffusion de dopants liquides (8).....	23
Figure 10 : Un implanteur ionique (8).....	24
Figure 11 : Oxyde formé à la surface du substrat (8).....	25
Figure 12 : Résine photosensible appliquée sur une plaquette (8).....	26
Figure 13 : Insolation par contact (8).....	26
Figure 14 : Insolation par proximité (8).....	27
Figure 15 : Insolation par projection (8).....	27
Figure 16 : Insolateurs à canon à électrons (8).....	28
Figure 17 : Bain pour la gravure humide (8).....	29
Figure 18 : Four gravure sèche (8).....	29
Figure 19 : entre gravure isotropique et anisotropique (8).....	30
Figure 20 : Schéma montrant deux types de joints de soudure, les joints flip-chip et les joints BGA, utilisés dans les boîtiers microélectroniques. (11).....	31
Figure 21 : Assemblage par thermocompression pour les boîtiers Flip Chip.....	32
Figure 22 : Structure d'assemblage thermosonique (13).....	33
Figure 23 : effet d'une catégorie des défauts de fabrication sur le comportement en service (14).....	34
Figure 24 : exemples de défaillances de microcomposants électroniques durant le fonctionnement ; a) rupture des interconnexions et formation de vide ; b) fissures interfaciales au niveau des via dans des composants 3D ; c) croissance des intermétalliques dans une jonction entre deux puces pour l'intégration 3D. (14).....	34
Figure 25 : Schéma montrant l'installation de flexion à 4 points d'un circuit imprimé avec des composants de type flip-chip (15).....	36
Figure 26 : Emplacements recommandés pour les jauges de déformation (15).....	37
Figure 27 : a) Circuit imprimé b) Mode de défaillance observé (16).....	38
Figure 28 ; 1) Essai en flexion alternée – 2) 4 fractographies après essais : a) HSCBT sur SnPb b) Test de chute sur SnPb c) HSCBT sur SnAgCu d) Test de chute sur SnAgCu (16)..	39
Figure 29 : rupture par fatigue d'une bille de brasure (14).....	40
Figure 30 : Vue d'assemblage globale.....	43
Figure 31 : Vue en coupe de l'assemblage étudié.....	43
Figure 32 : formes et dimensions des éléments constituant l'assemblage de l'étude.....	44
Figure 33 : Conditions aux limites appliquées au modèle étudié.....	45
Figure 34 : Conditions aux limites suivant X et Y.....	45
Figure 35 : Recherche et sélection des contacts.....	48
Figure 36 : présentation du modèle complet et du modèle simplifié ¼.....	49
Figure 37 : formes et dimensions des éléments constituant l'assemblage le quart du modèle.....	51
Figure 38 : représentation des conditions aux limites et des symétries suivant X et Y.....	51
Figure 39 : Recherche et sélection des contacts pour le modèle un quart.....	55
Figure 40 : Déplacement magnitude.....	56
Figure 41 : Déformation plastique.....	58

Figure 42: Répartition de la déformation plastique maximale dans les billes de brasure pour les quatre épaisseurs de Si.....	60
Figure 43: Répartition de la déformation plastique maximale dans les plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de Si.....	60
Figure 44: Evolution de la déformation plastique maximale du SAC et Cu en fonction de l'épaisseur du Si.....	61
Figure 45: Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le Si pour les quatre épaisseurs.....	62
Figure 46: Evolution de la valeur maximale de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'épaisseur de la brasure.....	62
Figure 47: Répartition de la déformation plastique maximale dans les billes de brasure pour les quatre épaisseurs de SAC.....	63
Figure 48: Répartition de la déformation plastique maximale dans les plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de SAC.....	64
Figure 49: Evolution de la déformation plastique maximale en fonction de l'épaisseur du SAC.....	65
Figure 50: Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le Si pour les quatre épaisseurs du SAC.....	65
Figure 51: Evolution de la contrainte équivalente maximale de Von Mises en fonction de l'épaisseur du SAC.....	66

Introduction générale

La fabrication des microcomposants se développe de plus en plus depuis des années. Le développement de nouveau microcomposant 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 la flexion quatre points normalisée par le code JEDEC.

Le présent travail comporte quatre chapitres.

Un premier chapitre consacré à des recherches bibliographiques sur les microcomposants, les techniques de leur fabrication ainsi que les sollicitations mécaniques et thermiques provoquées par le stockage, le transport et le fonctionnement des microcomposants électroniques.

Le deuxième chapitre donne un aperçu sur les tests accélérés utilisés dans les projets de développement des microcomposants. Le test de flexion répétée à été présenté.

Le troisième chapitre comporte une présentation des modèles numériques développés pour la présente étude. La technique de simplification par exploitation des symétries géométriques à été présentée et validée.

Le quatrième 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 : Généralité

1.1 Introduction

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 ces 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.

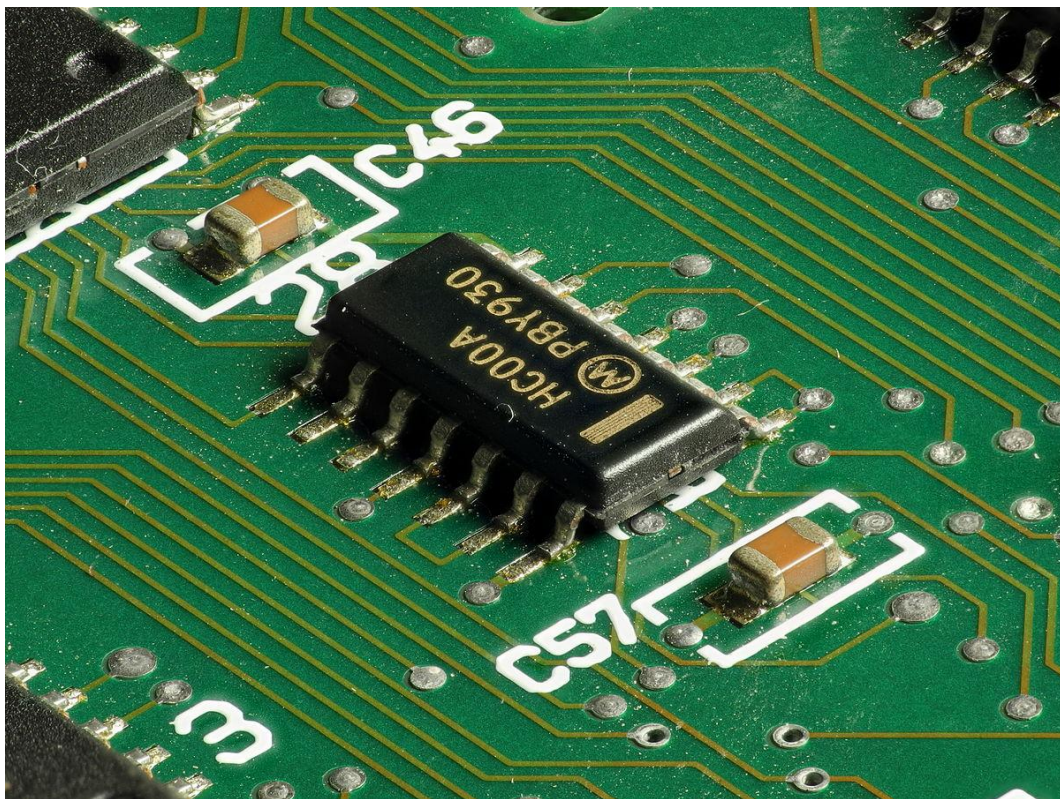


Figure 1 : Composant monté en surface (2)

1.2 Historique sur l'électronique et ses composants

En un siècle, la miniaturisation a permis le passage du tube à vide au transistor sur

matériau solide d'un micromètre carré. Parallèlement, le passage du signal analogique (à variation continue) au signal numérique (codé en une succession de 0 et de 1) a facilité le développement de circuits électroniques aux fonctions de plus en plus performantes.

Le terme 'électronique' trouve son origine dans l'utilisation des tubes à vide (les "lampes" des anciens postes de radio) dont le fonctionnement repose sur un courant d'électrons ("rayons cathodiques" découverts par J. J. Thomson en 1897). Pourtant, la moitié de l'histoire de l'électronique, et l'explosion de ses applications sont dues à l'utilisation des matériaux semi-conducteurs, principalement le Silicium.

Dès 1925, J. E. Lilienfeld avait proposé l'utilisation d'un "effet de champ" dans un semi-conducteur pour moduler un courant par une tension, comme dans un tube à vide. Mais le premier "effet transistor" n'a été observé qu'en 1947, dans les laboratoires de Bell (par J. Bardeen, W. Brattain et W. Shockley). La figure 2 illustre l'évolution historique des composants électroniques.

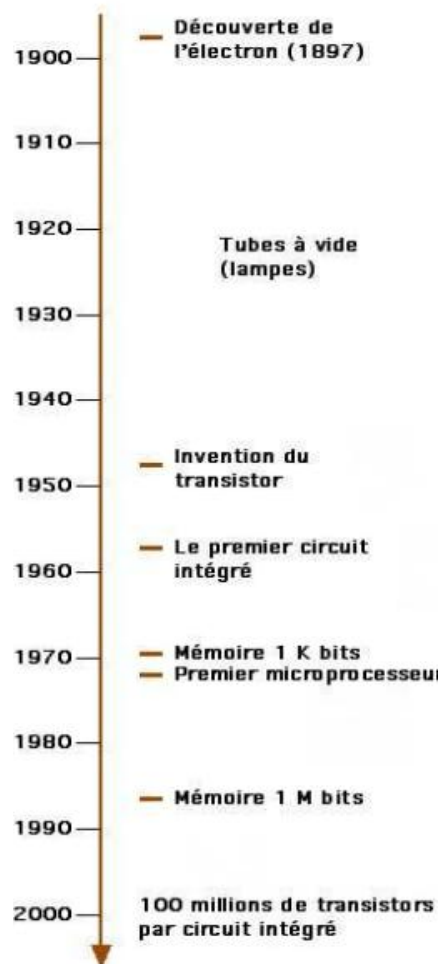


Figure 2 : Un siècle d'électronique (3)

En 1955, Shockley part pour l'ouest, monter sa société en Californie, à Palo Alto, ce qui sera à l'origine de la "Silicon Valley". En 1957, plusieurs ingénieurs (dont G. Moore et R. Noyce) quittent cette société pour créer Fairchild, qui se développe rapidement grâce à une importante commande de transistors de la part d'IBM. C'est aussi l'année du premier satellite

artificiel (soviétique : Sputnik), ce qui va pousser les Etats-Unis d'Amérique à investir dans ' la miniaturisation de l'lectronique.

Maintenant on passe a la naissance des composants d'lectronique, de la résistance au transistor, du circuit intégré simple au microprocesseur complexe en passant par les convertisseurs ou les diodes électroluminescentes... les composants de la microélectronique sont nombreux et remplissent des fonctions variées. (1)

1.2.1 De la diode à la triode

En 1904, John Alexandre Fleming, ingénieur anglais, invente la diode, un dispositif sous vide comprenant un filament émetteur d'électrons et une plaque, collectrice d'électrons lorsqu'elle est polarisée positivement. Ce dispositif laisse passer le courant électrique dans un seul sens et le bloque dans l'autre. Il suffit de faire varier la tension (positive ou négative) de la plaque pour permettre ou interrompre le passage du courant. Ce premier dispositif est utilisé dans les postes de radio. Il existe de nombreuses variétés de diodes, selon les propriétés des matériaux utilisés. Les diodes électroluminescentes (Leds) sont désormais largement utilisées pour produire de la lumière en consommant très peu d'énergie. En 1907, Lee de Forest, chercheur américain, améliore le principe en inventant la triode dans laquelle une grille est ajoutée entre le filament et la plaque (figure. 3). C'est le premier système amplificateur d'un signal électronique. Elle se compose d'une cathode semi-conductrice à chaud, émettrice d'électrons, d'une anode réceptrice, et d'une grille positionnée entre les deux. Celle-ci joue le rôle de « modulateur d'électrons » : selon sa polarisation, elle les bloque ou accélère leur passage (amplification du courant).

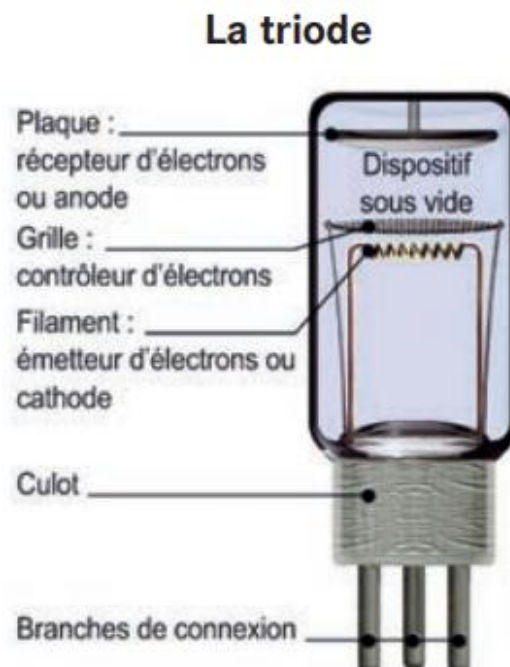


Figure 3 : La triode (1)

Dans les années 40, les triodes et autres tubes à vide sont utilisés dans les tout premiers ordinateurs. Plus les calculs à effectuer sont complexes, plus le besoin de tubes à

vide est grand. Or, ceux-ci sont volumineux, chauffent beaucoup et « claquent » facilement. Ce manque de fiabilité freine le développement de l'informatique. (1)

1.2.2 Transistor

En 1948, John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley, trois physiciens américains, inventent le transistor bipolaire et ouvrent ainsi l'ère de la microélectronique. Il comprend un émetteur d'électrons, un collecteur et un dispositif de modulation appelé base. Le déplacement des électrons ne s'effectue plus dans le vide mais dans un matériau solide, semi-conducteur, qui permet de contrôler le courant électrique (l'interrompre, l'amplifier ou le moduler). Ce transistor a supplanté rapidement le tube électronique : démarrant quasi instantanément, sans temps de chauffe, beaucoup plus petit et léger. Les transistors sont réalisés directement à la surface du silicium², leurs connexions sont fabriquées par dépôt de couches métalliques. Ils ont pu être fabriqués industriellement dès les années 50. Rapidement, leur taille va passer de celle d'un dé à celle d'un grain de sel. (1). La figure .4 donne quelques exemples de transistors utilisés en électronique.

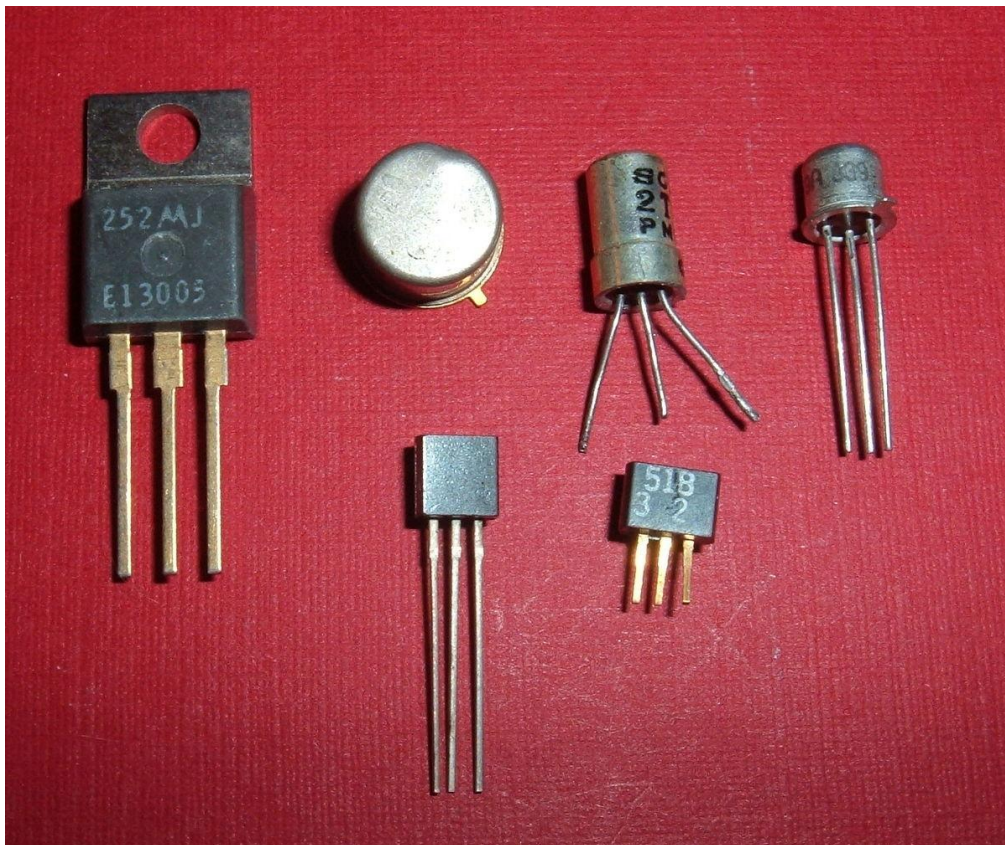


Figure 4 : Transistor (4)

1.2.3 Circuit imprimé et circuit intégré

Un circuit est un assemblage de composants. Il est appelé « circuit imprimé » lorsqu'il est fabriqué par dépôts de matériaux conducteurs sur des matériaux isolants (exemple : du cuivre sur l'époxy) comme dans le cas de la carte mère des ordinateurs. Il est appelé « circuit intégré » lorsqu'il rassemble, plusieurs composants permettant de réaliser différentes fonctions.

Dans les années 70, une technologie est développée permettant de réaliser des transistors qui consomment moins et de faciliter l'intégration de composants passifs (résistances, capacités) sortants des circuits intégrés. La taille des circuits augmente régulièrement ainsi que celle des plaques de silicium, qui passent de 200 à 300 mm de diamètre. Dans le même temps, la taille des transistors diminue.

Les deux circuits sont visibles sur l'image de la figure. 5.

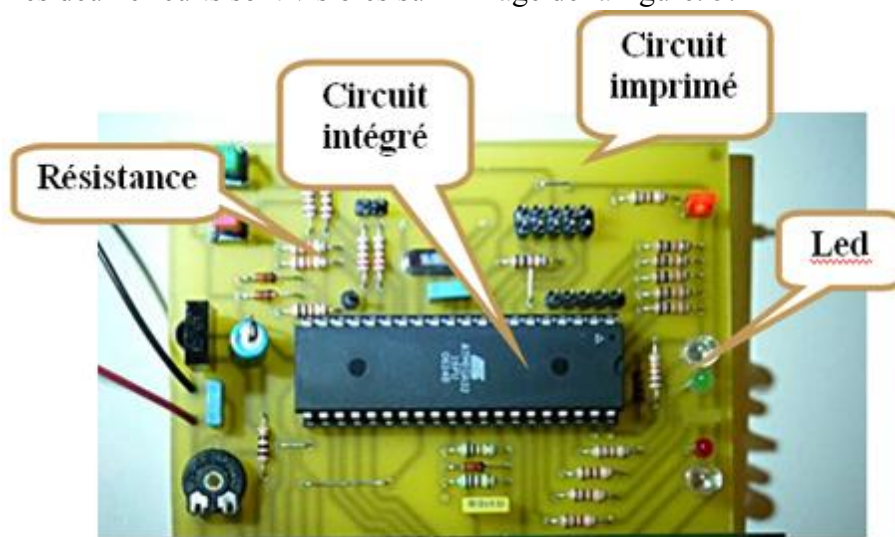


Figure 5 : Circuit intégré et circuit imprimé (5)

Ils peuvent être gravés dans du silicium massif ou sur une couche mince de quelques centaines de nanomètres déposée sur un isolant ; le SOI (silicium sur isolant) permet de réaliser des circuits plus rapides et moins gourmands en énergie. (1)

1.2.4 Le tout sur une puce

Cette petite pastille de silicium supporte un circuit intégré (figure. 6). L'accroissement exponentiel du nombre de transistors par puce, aussi appelé « loi de Moore », a entraîné une nouvelle révolution industrielle, en liaison avec le développement des logiciels et des communications.

Début des années 2000, un microprocesseur (le circuit intégré le plus complexe) est une puce en silicium d'environ 2,5 cm de côté. Il peut comporter plusieurs centaines de millions de composants. Il est enfermé dans un boîtier protecteur muni de « pattes » (d'où le nom de « puce ») pour assurer les connexions avec les autres organes de l'appareil dans lequel il s'insère. (1)

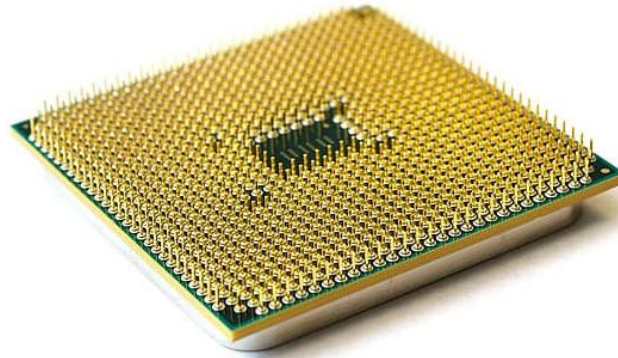


Figure 6 : Microprocesseur (6)

1.3 Procédés de fabrication des composants électronique

Fabriquer une 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 les métaux, des polymères, du diamant, des matériaux qui émettent de la lumière, etc. (7). Le procédé typique de fabrication des composants est schématisé par la figure. 7.

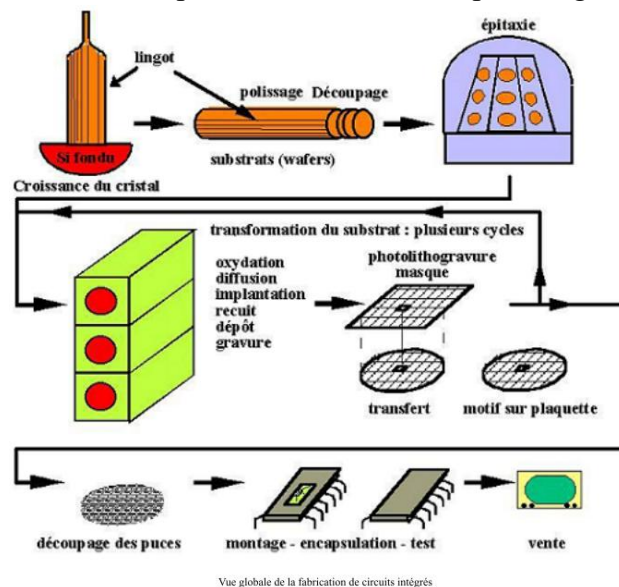


Figure 7 : Vue globale de la fabrication de circuits intégré (8)

1.3.1 La fabrication de Substrat en silicium

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre. Les sources naturelles sont essentiellement les silicates, zircon, jade, mica et quartz. Ce sont essentiellement des formes oxydées. Il est donc nécessaire de le réduire par le carbone (à très haute température) et de le purifier afin d'obtenir un matériau dit de qualité électronique (Electronic Grade Silicon). Cette purification est importante car toute la théorie des semi-conducteurs est basée sur un cristal parfait ou quasi-parfait notamment à cause du dopage.

La première étape consiste à effectuer une électrolyse dans un four à arc à électrode de graphite. Ceci permet d'atteindre la température de fusion de la silice (1713 °C).

On obtient alors du silicium pur à 98 %. Il faut alors effectuer une distillation à partir d'un produit, liquide à température ambiante, qui contient le silicium.

Nous nous attarderons sur le trichlorosilane (SiHCl_3), produit le plus utilisé dans l'industrie. Il est obtenu par pulvérisation du silicium dans du chlorure d'hydrogène (HCl) sous forme gazeux.

On obtient alors des lingots de silicium (en structure polycristalline) formés à partir d'un germe sur lequel est déposé progressivement le silicium. La pureté obtenue est de l'ordre du ppm (Partie Par Million) ce qui reste faible par rapport au dopage.

Ces lingots servent alors de charge (que l'on peut dopée ou non) à introduire dans un réacteur de croissance. La charge est alors fondue et on effectue un tirage progressif du lingot à partir d'un germe. Cette méthode de tirage est appelée "Czochralski". (8)

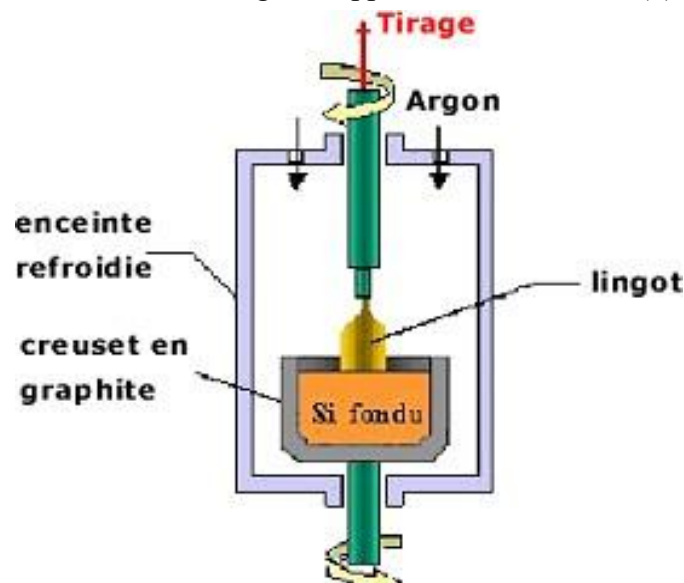


Figure 8 : Tirage d'un lingot de Silicium (8)

Une autre technique consiste à piloter la croissance d'un germe par le déplacement d'une zone chauffée en limite de fusion du silicium (créer par une bobine parcourue par un courant de Foucault).

Le lingot obtenu est alors équeuté. Cette opération consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Ces techniques ont l'inconvénient de modifier la concentration de dopant ce qui implique une variation de la résistivité le long du lingot. Une vérification des spécifications est donc nécessaire afin d'écartier les lingots de mauvaise qualité.

Afin de pouvoir découper les substrats selon leurs axes cristallographiques, un repérage est effectué par

La méthode de diffraction des rayons X, puis un méplat est usiné pour servir de référence.

Les lingots sont alors polis pour être parfaitement cylindrique.

Ils sont ensuite découpés à l'aide d'une scie diamantée ou d'un fil. Dans le cas d'une coupe par fil, les pertes sont plus faibles. Ces pertes atteignent tout de même 50% à 60% du lingot initial. On obtient alors des plaquettes ou wafers en anglais.

Afin de relaxer le cristal suite aux contraintes mécaniques imposées par le sciage et de rééquilibrer la résistivité, le lingot est recuit à 600°C.

Les plaquettes sont alors arrondies, triées en fonction de leurs épaisseurs, polis et nettoyées. Les impuretés sont éliminées par des solutions acide, puis basique et enfin l'oxyde natif est enlevé par de l'acide fluorhydrique. On réalise aussi un bombardement laser pour utiliser l'effet "getter". Les plaquettes sont triées une nouvelle fois, polies pour atteindre un effet "miroir", puis marquées au laser pour permettre un suivi lors de la fabrication.

Les plaquettes sont alors vérifiées par un homme, qui reste le meilleur inspecteur. (8)

1.3.2 L'épitaxie des plaquettes

Le principe de l'épitaxie est de faire croître du cristal à partir d'un germe, par un apport de matière. Ici, c'est le substrat qui sert de germe cristallin. La couche épitaxiée peut être dopée ou non. Il y a 3 types d'épitaxie.

- 1) L'épitaxie par jet moléculaire a une vitesse de croissance lente. Elle permet donc d'obtenir une grande précision, des jonctions très abruptes. Mais cette technique est coûteuse et ne traite qu'un seul substrat à la fois.
 - 2) L'épitaxie en phase liquide utilise le même principe que la méthode de tirage dite "Czochralski". Cette technique est rapide, mais il faut contrôler les échanges thermiques afin d'éviter la liquéfaction du substrat.
 - 3) L'épitaxie en phase vapeur utilise un apport de matière sous forme gazeuse. Les plaquettes sont chauffées et du gaz contenant les éléments dopant sont injecté dans le réacteur. En se dissociant, les gaz forment du cristal sur la surface des plaquettes.
- (8)

1.3.3 La diffusion de dopant

La diffusion consiste à faire migrer des espèces chimiques dans un milieu. Il y a trois procédés de diffusion de dopant suivant le type de source et de dopant utilisés : sources

gazeuses, liquides ou solides.

- 1) Les sources gazeuses font appel à de l'AsH₃ (Arsine), la PH₃ (Phosphine) ou le B₂H₆ (Diborane). Ces gaz étant très fortement dangereux pour l'homme, on utilise plutôt la méthode liquide.
- 2) Ainsi on utilise principalement les sources liquides telles que le POCl₃ (Phosphoroxidchloride) ou le BBr₃ (Boron bromide). Ce sont des liquides facilement vaporisable, qui sont ensuite utilisés dans le four de diffusion sous forme gazeuse.

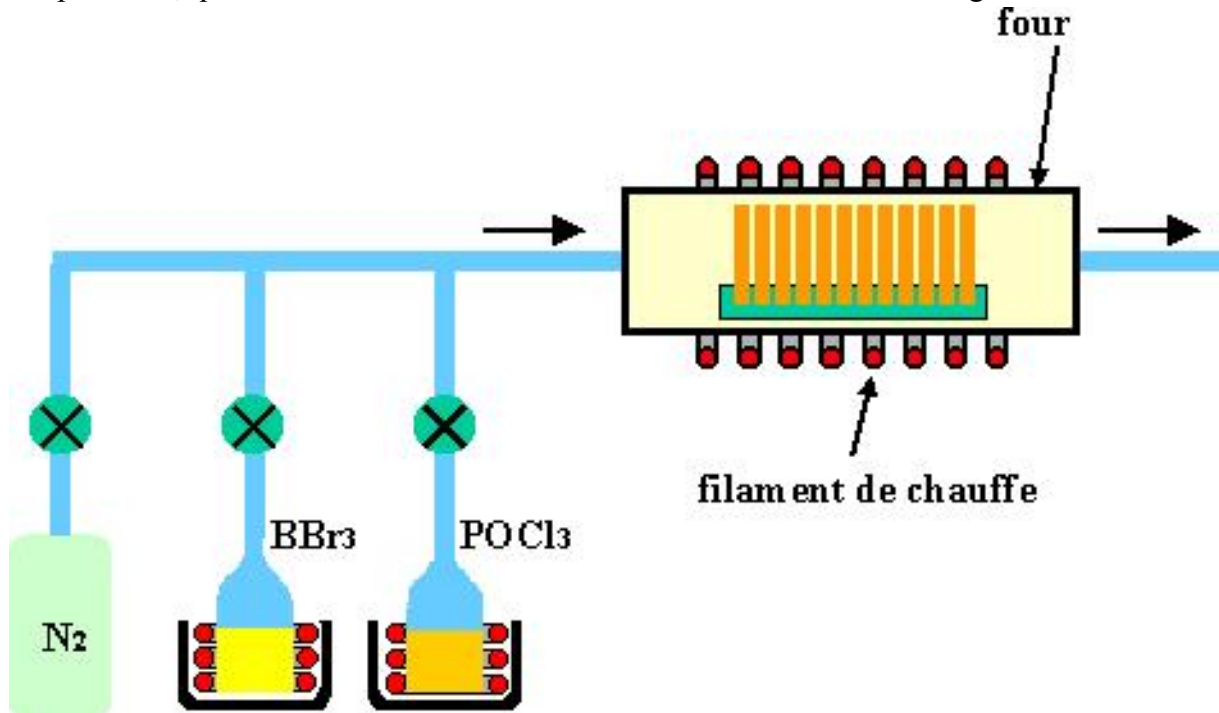


Figure 9 : Four de diffusion de dopants liquides (8)

- 3) Les sources solides sont formées de plaques de verres contenant du dopant tel que le BN (Nitrure de bore) ou le P (Phosphore). Ces plaquettes sont intercalées, dans le four, avec les plaquettes de substrat. Une oxydation permet la formation d'oxyde qui, une fois évaporés, se déposent sur le substrat. Au cours du dépôt, un peu de matière pénètre dans le cristal de silicium. Cette matière est alors diffusée vers l'intérieur grâce à un recuit thermique.

1.3.4 L'implantation ionique

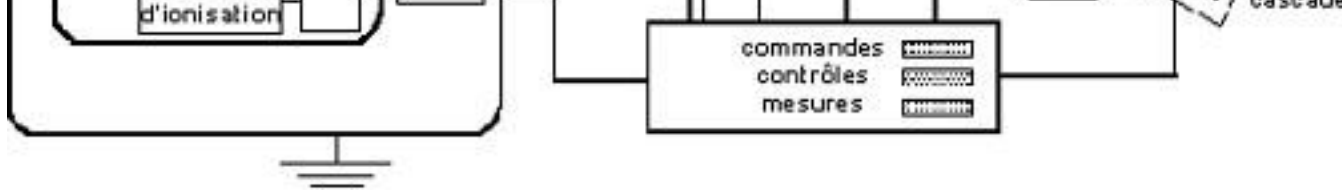


Figure 10 : Un implanteur ionique (8)

Cette opération consiste à bombarder des ions sur la surface d'une plaquette afin de doper des zones précise en cours de fabrication (création de zones de source ou de drain d'un transistor MOS (Metal Oxide Semiconductor), d'une base et d'un émetteur dans un transistor bipolaire . . .). Généralement, la profondeur d'implantation varie de 100 Å à 1 mm. Cette technique offre un contrôle précis des concentrations de dopant dans le substrat (mesurées en nombre d'atomes par unité de surface), mais elle crée des dommages dans la structure cristalline qui impose un recuit thermique.

L'implanteur est en pratique un accélérateur d'ions. (8)

1.3.5 L'oxydation

L'oxydation consiste à créer une couche d'oxyde sur le substrat de silicium afin de s'en servir :

- de masque d'implantation ou de diffusion de dopants.
- de couche passivante à la surface du silicium.
- de zones d'isolation entre différents composants.
- de couche active dans les transistors MOS (oxyde de grille).
- d'isolation électrique entre des couches proches.
- d'isolation électrique entre les différents niveaux de métallisation ou de couches conductrices.
- de couches sacrificielles.

Il existe plusieurs techniques pour obtenir un oxyde dans un four similaire à celui de diffusion :

L'oxydation thermique en présence d'oxygène, dite oxydation sèche. C'est la plus lente, on obtient donc peu de défauts électriquement natif.

- L'oxydation thermique par voie humide en présence d'oxygène et de vapeur d'eau.
- L'oxydation thermique vapeur en présence de vapeur d'eau uniquement.
- L'oxydation anodique, obtenue par voie électrochimique.
- L'oxydation plasma, réalisée à l'aide d'un plasma d'oxygène.

La couche de silicium initiale réagit avec l'élément oxydant pour former l'oxyde ce qui consomme du Silicium. L'interface Si/SiO₂ va donc se retrouver "au-dessous" de la surface initiale.

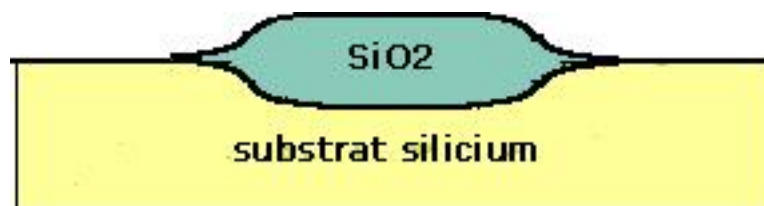


Figure 11 : Oxyde formé à la surface du substrat (8)

L'oxydation se faisant sous haute température, les dopants se diffusent dans le substrat.

De plus, étant donné la consommation de silicium lors de l'oxydation, une partie des atomes dopants se retrouvent dans l'oxyde. Il y a donc une modification des zones dopées. Mais les capacités de diffusion des atomes dopants dans le silicium et dans l'oxyde sont en général différents. Il se crée alors une discontinuité de concentration de dopant à l'interface Si/SiO₂, ce qui minimise l'effet de diffusion.

Si l'on veut éviter cet effet de diffusion des dopants, on peut utiliser un four à lampes halogènes qui permet de chauffer les substrats très rapidement en présence d'une atmosphère oxydante. Cette technique élimine d'autant plus la diffusion qu'elle est effectuée rapidement. (8)

1.3.6 Les dépôts

Cette opération est nécessaire lorsqu'il faut réaliser une couche conductrice, isolante ou de masquage dans un procédé qui n'utilise pas directement le matériau du substrat. Les dépôts s'effectuent dans un four qui contient tous les éléments de la couche à réaliser ainsi qu'une balance à quartz afin de contrôler l'épaisseur du dépôt. Il y a 5 méthodes de dépôt :

- 1) par évaporation thermique. La matière à déposer est vaporisée à proximité des plaquettes, et va donc se déposer dessus.
- 2) par pulvérisation cathodique ou canon à électrons. Ces techniques consistent à bombarder la matière à déposer par des ions, qui vont arracher d'autres ions de cette matière et à les guider sur les plaquettes de substrat. Ces méthodes permettent des dépôts de couches métalliques.
- 3) par dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition). Cette technique permet de faire croître du silicium polycristallin ou des couches d'isolants.
- 4) par dépôt assisté au plasma (Plasma Enhanced C. V. D.). Cette technique rejoint le C. V. D. On utilise une source d'énergie magnétique afin de la substituer à l'énergie calorifique. On obtient donc un dépôt à faible température, ce qui évite la diffusion des dopants. De plus cette technique permet le traitement de plusieurs plaquettes simultanément.
- 5) par dépôt à basse pression (Low Pressure CVD). Méthode dérivée du C. V. D. qui s'effectue en phase vapeur à basse pression et faible température (de 500 à 600 °C). (8)
- 6) Par le principe de base du procédé sol-gel est donc le suivant : une solution à base de précurseurs en phase liquide se transforme en un solide par un ensemble de réactions chimiques (hydrolyse et condensation), le plus souvent à température ambiante. (9)

1.3.7 La photolithographie

La photolithographie consiste à reproduire un masque (physique ou logiciel) sur le substrat. Cette méthode fait appel à plusieurs procédés:

- Dépose d'une résine photosensible par centrifugation. Si on utilise une résine positive, on obtient exactement le même motif sur la couche de silicium que sur le masque de départ. Dans le cas d'une résine négative, on obtient sur les plaquettes le motif complémentaire. La résine est ensuite séchée.

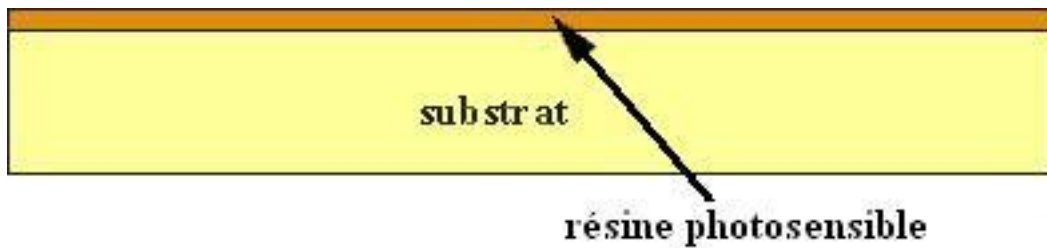


Figure 12 : Résine photosensible appliquée sur une plaquette (8)

- Insolation de la résine. Ce procédé consiste à exposer la résine photosensible à un faisceau lumineux. La lumière utilisée est en général hors du domaine visible, à savoir en ultra-violet voire en X. L'insolation peut se faire de deux manières différentes :
 - L'insolation par masque physique, comporte plusieurs techniques :
 - La technique par contact donne théoriquement la meilleure définition des motifs, mais détériore le masque après chaque opération en raison des frottements importants. Il faut également que le masque soit de la même taille que le motif à graver, ce qui est dur à réaliser (8)

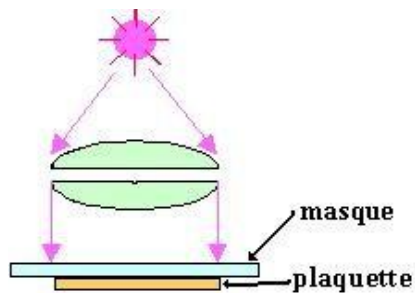


Figure 13 : Insolation par contact (8)

- La technique par proximité, élimine la détérioration du masque car il n'y a plus de contact. Mais tout comme la technique de contact, le masque doit être de la même taille que le motif ce qui rend sa réalisation très difficile. (8)

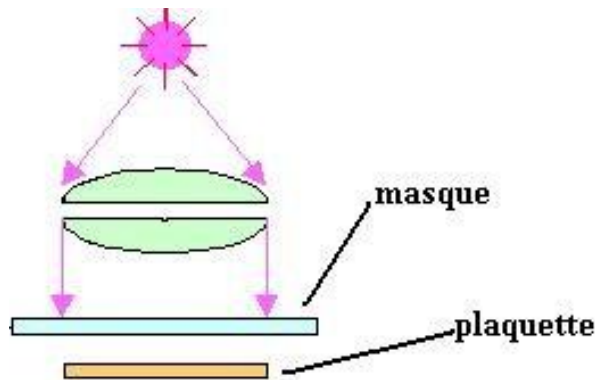


Figure 14 : Insolation par proximité (8)

- La projection donne la moins bonne définition optique en raison des effets de diffraction de la lumière, mais permet par contre d'effectuer une réduction ce qui simplifie la fabrication du masque. Les insolateurs par projection avec photorépétition permettent d'effectuer la projection par secteur, c'est-à-dire, puce par puce ou bloc par bloc de plusieurs puces. Dans ce cas, il faut pouvoir parfaitement positionner la plaquette. (8)

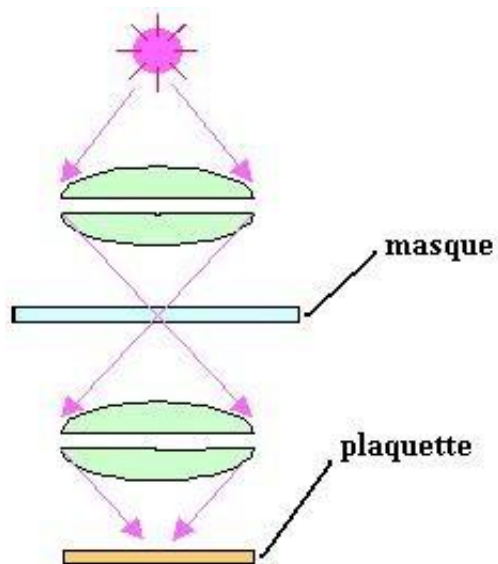


Figure 15 : Insolation par projection (8)

•

L'insolation par faisceau d'électrons utilise un canon à électron. Cette technique utilise alors un masque informatique, qui permet une meilleure malléabilité. Ainsi ce procédé permet d'obtenir des puces différentes sur la même plaquette, alors que le procédé utilisant un masque physique oblige, soit un changement de masque (ce qui est fastidieux), soit une reproduction à l'identique des puces. Mais un faisceau de 0,1 mm donne un temps d'insolation de 3 heures et un tel système est extrêmement coûteux, puisqu'il faut éviter toute vibration d'amplitude supérieure à un dixième de microns, ce qui rends cette méthode peu utilisée. (8)

Figure 16 : Insolateurs à canon à électrons (8)

- Les motifs sont alors révélés par un révélateur. Puis les plaquettes sont rincées et recuites pour durcir la résine, qui peut alors résister aux attaques chimiques.
- La gravure permet d'éliminer la matière (couche ou film) non protégée par la résine. Il y a 2 méthodes de gravure :
 - La gravure humide se fait par attaque chimique en solution aqueuse. La couche est donc attaquée de façon équivalente suivant toutes les directions de l'espace. On dit que la gravure est isotropique. Cette technique est simple à utiliser et permet de traiter plusieurs plaquettes (jusqu'à 200 plaquettes) simultanément, c'est pourquoi elle est très répandue. Néanmoins il faut rincer et sécher minutieusement les substrats après la gravure. De plus la fin de gravure est difficilement contrôlée.

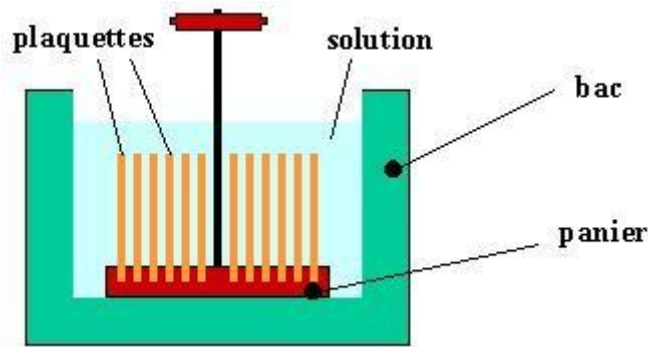


Figure 17 : Bain pour la gravure humide (8)

- La gravure sèche est en réalité une technique de gravure plasma dans laquelle interviennent à la fois les effets de bombardement par des ions et la réaction chimique. Le matériau produit par la réaction doit être volatil pour pouvoir quitter la surface du substrat et être éliminé par pompage. Sans polarisation particulière des électrodes, l'attaque est en général isotropique, mais en donnant une orientation spécifique aux ions, on obtient une gravure anisotropique. L'utilisation d'un interféromètre laser permet un contrôle précis de la fin de gravure.

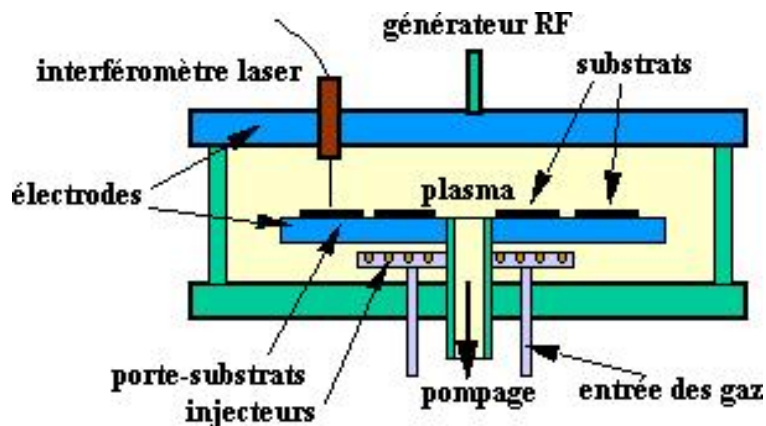


Figure 18 : Four gravure sèche (8)

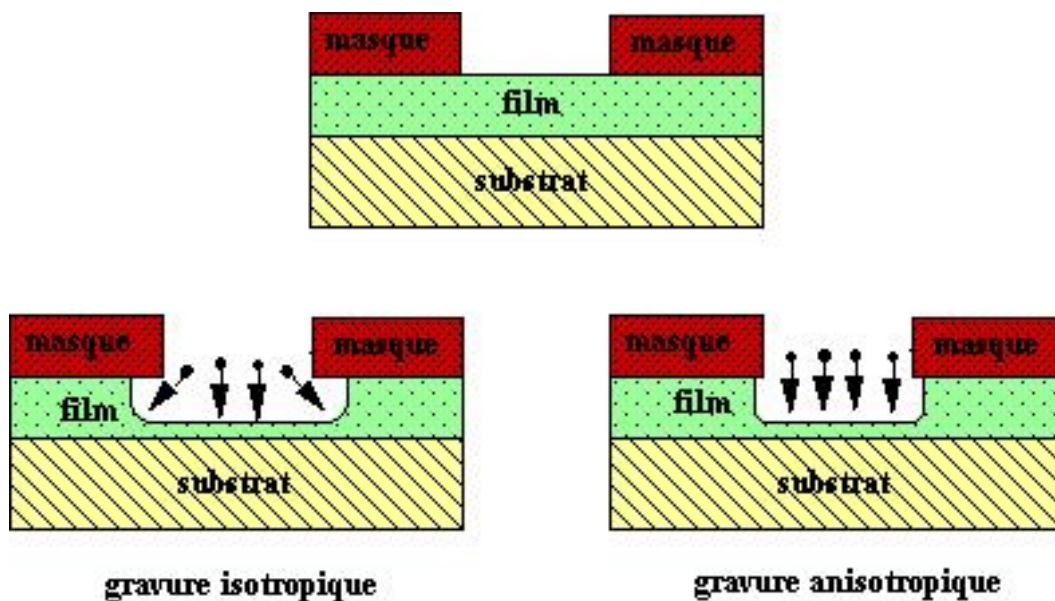


Figure 19 : entre gravure isotropique et anisotropique (8)

- La résine est ensuite retirée de la surface par un solvant chimique puissant comme l'acétone. (8)

1.4 Techniques d'assemblages

Une autre tendance de l'industrie électronique actuelle consiste à rendre les produits plus compacts tout en augmentant leur fonctionnalité. L'emballage électronique est l'une des technologies clés qui permet de réaliser les objectifs de conception des produits. Ces dernières années, avec l'explosion de l'utilisation d'Internet, des téléphones portables et des ordinateurs, on a assisté à une augmentation rapide du nombre de boîtiers électroniques utilisant l'assemblage de puces retournées « flip-chip ». On a vu aussi une augmentation rapide du nombre de boîtiers électroniques utilisant l'assemblage de puces à bosses (10)

1.4.1 Par brasure

Cette technique classique consiste à monter une puce sur un substrat, face arrière vers le bas. Les plages périphériques de la puce sont ensuite reliées au substrat par des fils. Le principal avantage de cette approche est qu'elle est très rentable. Les machines ont atteint un niveau tel que des dizaines de milliers de fils peuvent être collés sur des puces et des substrats en une heure.

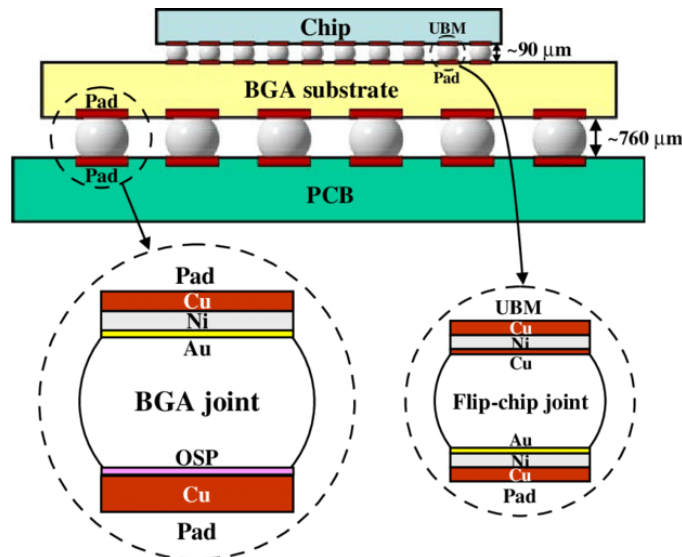


Figure 20 : Schéma montrant deux types de joints de soudure, les joints flip-chip et les joints BGA, utilisés dans les boîtiers microélectroniques. (11)

1.4.2 Par adhésif

L'assemblage adhésif des puces à bosses est généralement associé à des bosses en or, bien que des bosses en cuivre ou en nickel avec des capuchons en or puissent également être utilisées avec des adhésifs conducteurs. L'assemblage par adhésif avec des plots en or est une technologie bien éprouvée ; les adhésifs à conductivité isotrope (ICA), les adhésifs à conductivité anisotrope (ACA) et les adhésifs non conducteurs ont tous été utilisés. (10)

1.4.3 Par thermo compression

Le collage par thermocompression (TC) a trouvé une application dans l'assemblage de puces à bosses en or. Les bosses sont réalisées sur les substrats à l'aide d'un placage d'or électrolytique ou de méthodes d'assemblage par plots. Au cours du processus de collage, la puce est prise en main et alignée face aux bosses sur le substrat chauffé. Lorsque l'outil de collage exerce une pression, les bosses en or se déforment et établissent un contact intime. L'or se déforme et entrent en contact intime avec les plots de collage, ce qui provoque une soudure métal-métal pure. Cette méthode de collage nécessite des coussinets de collage en or pour la fixation. Les coussinets en aluminium ne sont pas très adaptés en raison de l'oxydation de leur surface. Un sous-remplissage n'est pas nécessaire. La puce est généralement scellée dans un boîtier hermétique.

Le collage TC nécessite une machine à coller les puces retournées capable de produire une température de collage élevée de 300 °C, une force allant jusqu'à 100 N/bosse et un degré élevé de parallélisme entre la puce et le substrat. Pour un collage à haut rendement, la force et la température de collage doivent être bien contrôlées. Afin d'éviter d'endommager le matériau semi-conducteur, la force de collage doit être appliquée avec un gradient. Une force de collage excessive peut provoquer des fissures dans la passivation de la puce et parfois un pontage des bosses dans un réseau à pas fin en raison d'une déformation excessive des bosses.

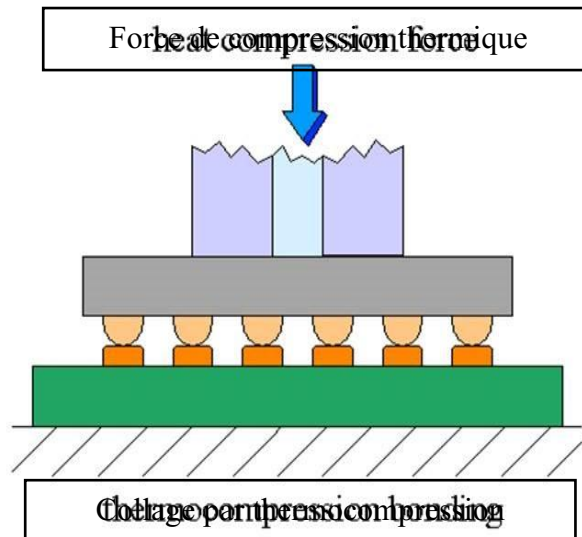


Figure 21 : Assemblage par thermocompression pour les boîtiers Flip Chip
(12)

1.4.4 Par Thermosonique

Le collage thermosonique (TS) des puces électroniques applique de la chaleur, de la pression et de l'énergie ultrasonique pour créer un joint entre les bosses métalliques et les patins de collage. Le concept du collage TS des puces à bosses avec des réseaux de plots en or a été introduit pour la première fois en 1993. Les goujons en or ont été produits sur les pattes de la puce à l'aide d'une colleuse à bille thermosonique. La puce bosselée était ensuite alignée sur la carte du boîtier et pressée contre les plots opposés. Des liaisons métalliques pures ont été formées sous l'effet de la chaleur, de la force et de l'énergie ultrasonique.

Par rapport au collage TC, le collage TS nécessite moins de force et une température plus basse en raison de l'énergie ultrasonique supplémentaire appliquée à l'outil de collage. Par conséquent, il convient pour le collage de puces minces, fragiles ou ne tolérant pas les hautes températures. Ceci est particulièrement important pour l'assemblage d'éléments sensibles à la température ou fragiles tels que les structures des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) ou les dispositifs GaAs. En outre, l'énergie ultrasonore peut contribuer à briser l'oxydation superficielle fragile des plaquettes en aluminium, ce qui rend possible une soudure intime entre l'or et l'aluminium. Cela augmente le nombre de choix pour la métallurgie des plots et des bosses. En particulier, les plots en or et en aluminium sont tous deux applicables.

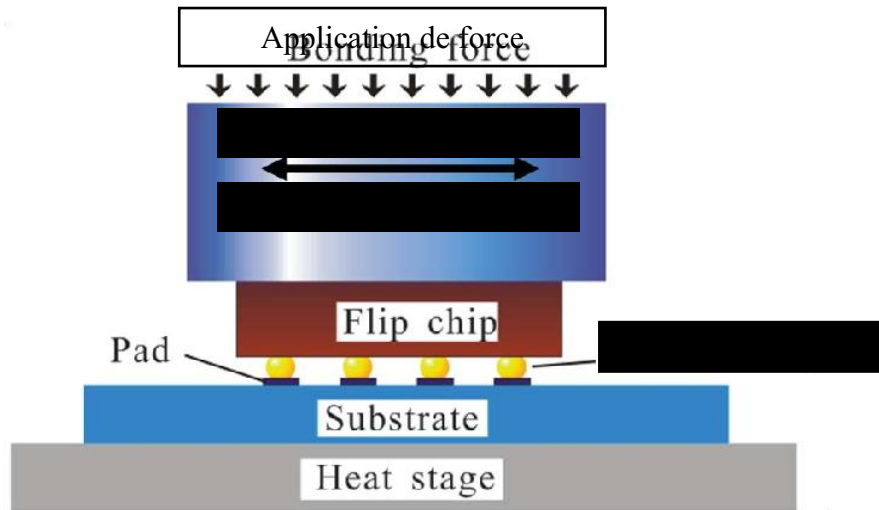


Figure 22 : Structure d'assemblage thermosonique (13)

1.5 Les sollicitations mécaniques et thermomécanique liées au fonctionnement, au stockage des appareils mobiles

Dans leurs univers d'utilisation, les microcomposants électroniques sont exposés à des sollicitations de natures électriques, thermiques, mécaniques et chimiques générées par le stockage, le transport, la manipulation, le fonctionnement et l'environnement. Les contraintes mécaniques dont l'origine peut être purement mécanique (vibrations et chocs mécaniques...), thermique (cyclage thermique) ou une combinaison des deux sources sont les causes de la majorité des défaillances durant le fonctionnement.

Un des exemples de contraintes mécaniques d'origine thermique est l'assemblage par brasage des composants sur des PCB. Le cycle thermique de brasage génère des contraintes résiduelles d'origine thermique dues à la différence des coefficients de dilatation thermique entre la brasure et les autres matériaux de la puce. Ces contraintes peuvent provoquer des déformations plastiques voire même des ruptures mécaniques qui conduisent à leur tour à des ouvertures dans les circuits électriques. (14)

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. Les modes de défaillance observés en service sont les mêmes que ceux causés par les procédés de fabrication mais les causes en sont différentes. Par exemple, une fissure dans une couche de métallisation peut être causée par les conditions thermiques durant le procédé de fabrication comme elle peut être le résultat de la fatigue thermique due à l'échauffement interne du composant par effet de Joule durant le fonctionnement. Les défauts de fabrication sont des facteurs accélérateurs de la défaillance durant le fonctionnement (figure 25).

Notons qu'une grande majorité des défaillances mécaniques durant le fonctionnement des microcomposants électroniques est observée au niveau des interconnexions entre les puces et les PCB ou entre les connexions des puces empilées et au niveau des via pour l'intégration 3D (Figure 26). (14)

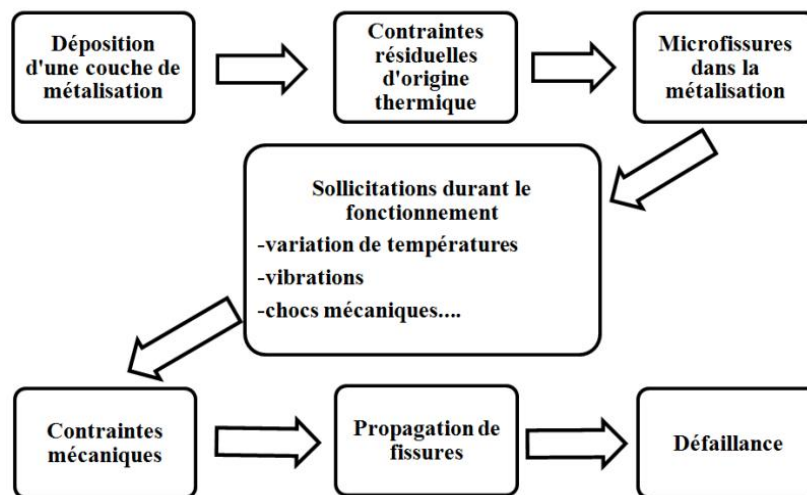


Figure 23 : effet d'une catégorie des défauts de fabrication sur le comportement en service (14)

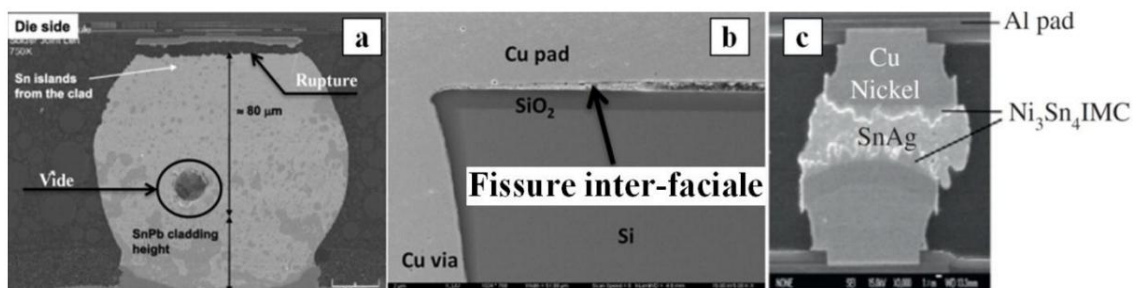


Figure 24 : exemples de défaillances de microcomposants électroniques durant le fonctionnement ; a) rupture des interconnexions et formation de vide ; b) fissures interfaciales au niveau des via dans des composants 3D ; c) croissance des intermétalliques dans une jonction entre deux puces pour l'intégration 3D. (14)

Conclusion

Ce chapitre met de la lumière sur l'évolution de l'électronique. Le passage des composants élémentaires à des composants complexes est ainsi présenté. Les techniques de fabrications des microcomposants sont résumées. Nous avons vu que les microcomposants électroniques sont susceptibles de subir de fortes sollicitations de nature déférente. Il serait indispensable de contrôler le niveau de ces sollicitations dans tout projet de développement.

Chapitre II : Les tests accélérés pour l'estimation de la durée de vie des téléphones portables

2.1 Introduction

La conception de nouveau microcomposants électronique comporte des phases de test visant à estimer la fiabilité de prédire les éventuels problèmes lors du fonctionnement.

Des tests accélérés normalisés ont été développés dans le but de pouvoir estimer la durée de vie dans un temps acceptable. Parmi ces tests normalisés on trouve de test de flexion répétée qui vise à déterminer la durée de vie quand les sollicitations mécaniques sont dominantes. Dans le présent travail nous nous sommes référencié à la norme JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council). (15)

La flexion répétée (flexion cyclique) du circuit imprimé au cours de diverses opérations d'assemblage et de test et lors de l'utilisation réelle peut provoquer des pannes électriques des fissures des interconnexions de soudure. Bien que le nombre de cycles de flexion répétées soit faible pendant l'assemblage (par exemple, la manipulation entre diverses opérations d'assemblage, les essais en circuit, l'assemblage final dans le boîtier du produit), l'amplitude de la flexion peut être très importante. D'autre part, les conditions d'utilisation réelles telles que les pressions répétées sur les touches d'un téléphone portable peuvent entraîner un grand nombre de cycles de flexion répétées pendant la durée de vie du produit. (15)

2.2Présentation des tests de flexion 4 points normalisée

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 appuie et en imposant le circuit imprimé vers le bas. Ceci est schématisé sur la figure 25. La méthode de flexion en 4 points est spécifiée car elle entraîne une courbure constante de la carte entre les deux. (15)

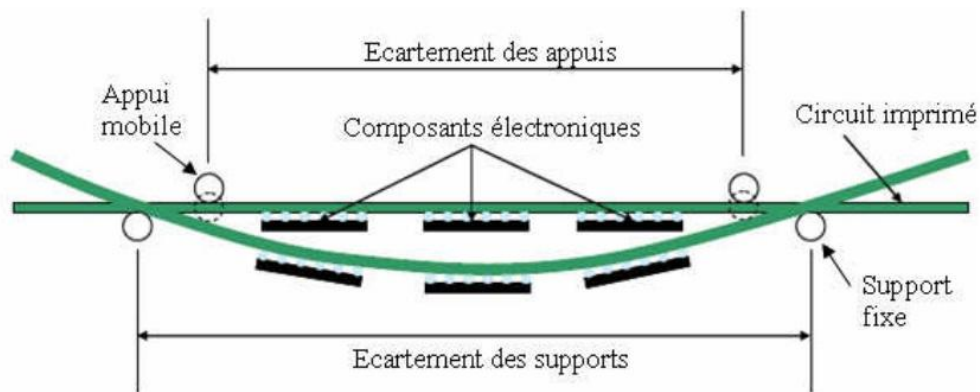


Figure 25 : Schéma montrant l'installation de flexion à 4 points d'un circuit imprimé avec des composants de type flip-chip (15)

La figure 25 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 cyclique à 4 points (15)

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	Sinusoidal
Fréquence de cycle (Hz)	1

2.2.1 Procédure de test

Cette norme recommande que la déformation soit mesurée sur au moins trois emplacements, comme décrit par méthode IPC/JEDEC-9702 et illustrée à la figure 26. (15)

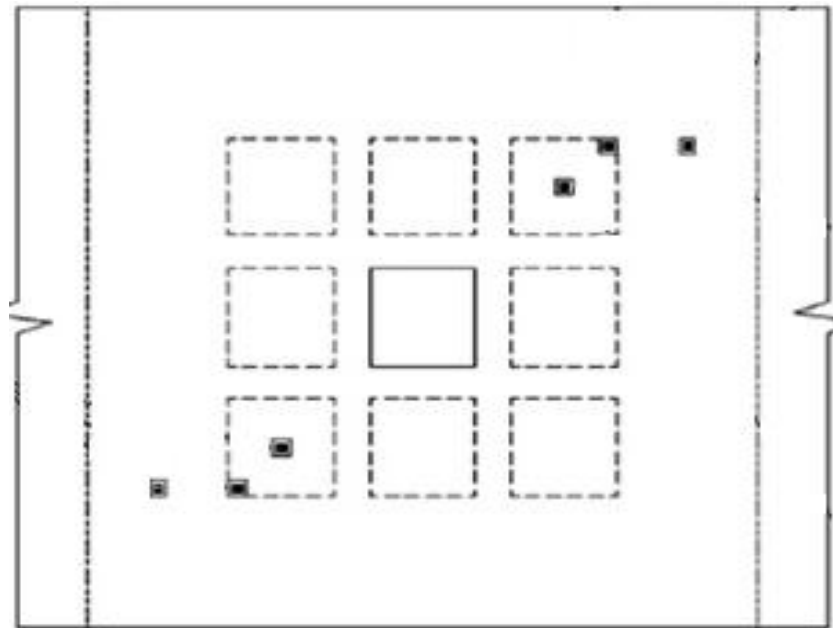


Figure 26 : Emplacements recommandés pour les jauges de déformation (15)

L'échantillon de composants devrait être préférablement testé lot-à-lot pour évaluer la répétabilité. La taille de l'échantillon peut être donnée selon les distributions de fissures, la sensibilité et la précision requises. La machine de test doit permettre de contrôler la vitesse de déflexion. Celle-ci doit inclure des appuis de flexion 4-Points pour appliquer un moment de flexion théoriquement uniforme entre les appuis de chargement. (16)

Ce test produit une sollicitation monotone, par opposition à la sollicitation cyclique décrite dans la section précédente. Cela signifie que l'on va observer un défaut dans les composants du fait d'un dépassement de résistance mécanique, ce dépassement sera causé pour une déformation de circuit imprimé et une vitesse de déformation donnée, ces conditions sont spécifiées dans le tableau 2. Selon les équipements, le test peut se terminer sans observer de défaut dans tous les composants. (16)

Tableau 2 : Paramètres du test en chargement (16)

Paramètre	Valeur
Pré-Charge du circuit imprimé	100 $\mu\text{m}/\text{m}$ maximum
Vitesse min. de la traverse	5000 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{s}$
Déplacement maximal de la traverse	Défaillance électrique de toutes les chaînes électriques

La norme recommande d'utiliser comme critère de défaillance électrique une augmentation de 20 % de la résistance de la chaîne électrique ; cependant une limite supérieure ou inférieure pourrait convenir selon l'équipement utilisé et le produit testé. L'analyse de défaillance doit permettre d'identifier les lieux de ruptures, les modes et mécanismes de défaillance observés électriquement. Cette analyse doit permettre de valider que les défauts observés ou les augmentations de résistances électriques ne sont pas dues à des problèmes de câbles coupés, de circuit imprimé ou de l'appareil de test (16).

Cependant, comme dans le cas du test de chute, on utilise des paramètres différents :

- Contrôle de la température
- Différence du signal dans la forme, l'amplitude et la fréquence
- Différence dans le circuit imprimé et le mode d'assemblage
- Différence dans le suivi et les critères de défaillances.

On étudie l'influence de l'amplitude de la flexion ainsi que la fréquence employée sur la tenue au test de flexion. (16)

Les circuits imprimés employés dans ces travaux ne correspondent pas au standard JEDEC, un seul composant est monté en son centre comme le montre la figure 27. Le microcomposant employé sous les dimensions du silicium sont : 6.9x6.45x0.3 mm³, la couche d'adhésion est en Al/Ni(V)/Cu et l'alliage de bille est en Sn63Pb37. Le pas entre deux centres de billes est de 500 µm et le diamètre des billes est de 300 µm. Les supports sont écartés de 80 mm et les appuis de 40 mm. Les défauts sont détectés par un détecteur d'événements (ED) et le seuil de défaillance est fixé à 500 Ω. (16)

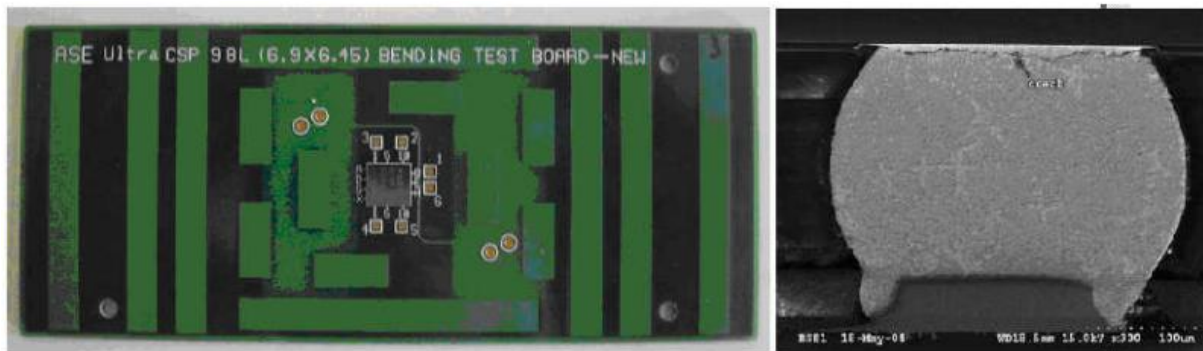


Figure 27 : a) Circuit imprimé (16)

b) Mode de défaillance observé

Tableau 3 : Influence de l'amplitude de flexion et de la fréquence sur la durée de vie (16)

Condition de test	Durée de vie η
1 mm/1 Hz	30332
1 mm/2 Hz	33728
1 mm/4 Hz	35550
2 mm/1 Hz	3163
2 mm/2 Hz	3179
2 mm/4 Hz	2696
3 mm/1 Hz	741
3 mm/2 Hz	805
3 mm/4 Hz	942

Les durées de vie à hautes fréquences sont légèrement supérieures à celles à basses fréquences

car la vitesse de déformation de la bille est plus élevée, sa résistance mécanique est donc supérieure. Du point de vue des analyses de défaillances, environ 85 % des pièces analysées présentent une fissure similaire à celle de la figure 27, côté composant. On observe environ 15 % des fissures côté circuit imprimé. Au niveau composant, les billes en défaut sont celles des rangées extérieures et des coins, les observations correspondent à ce qui a été décrit précédemment concernant la distance au point neutre lors du test de chute. Il est intéressant de constater que le mécanisme de défaillance est le même entre 1 Hz et 4 Hz dans ces conditions. Cela devra être vérifié dans le cas d'un autre alliage mais permet d'envisager d'accélérer le test. Le mode de sollicitation est également un paramètre important. En effet, on utilise la flexion alternée (en 8-points) pour corréliser les mécanismes de défaillances entre les tests de chute et de flexion, ce test s'appelle le HSCBT pour High-Speed Cyclic Bend Test : test de flexion à haute vitesse. (16)

Le système de fixation est présenté sur la figure 28, le mouvement est piloté par un moteur et un arbre à cames pour obtenir une fréquence de vibration de l'ordre de 275 Hz.

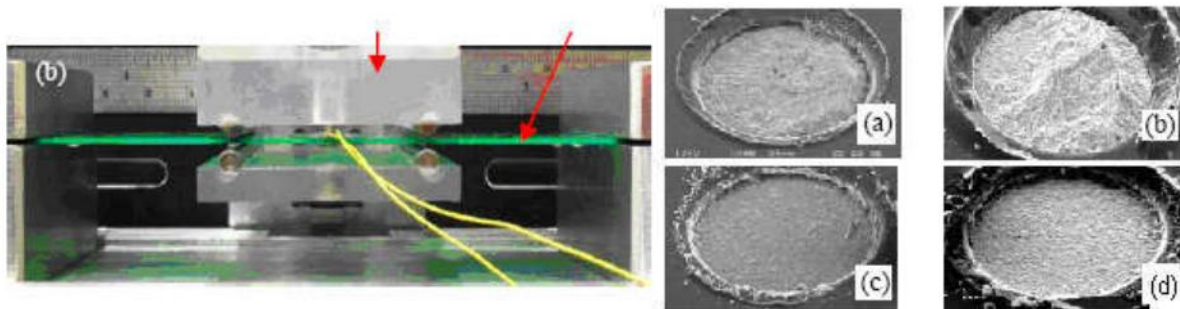


Figure 28 ; 1) Essai en flexion alternée – 2) 4 fractographies après essais : a) HSCBT sur SnPb b) Test de chute sur SnPb c) HSCBT sur SnAgCu d) Test de chute sur SnAgCu (16)

Les fractographies présentées dans la figure 28 montrent que le mode de défaillance est comparable pour un alliage donné, entre le test de chute et celui de flexion rapide (HSCBT). A partir de ces résultats, l'amplitude de déformation se fait varier, pour calculer la déformation plastique induite au niveau du joint de soudure. Les essais ne montrent pas de seuil en-dessous duquel il n'y a pas de défaut, ce qui permet de conclure que l'endommagement est lié à une accumulation de contraintes et non à une contrainte trop élevée. (16)

2.3 Lois de fatigue et durée de vie

Dans cette section, nous présentons les lois de fatigue qui sont couramment utilisées pour estimer la durée de vie dans des conditions accélérées. Nous nous référons à un modèle basé sur la fatigue d'interconnexion entre les composants et le PCB. Nous les divisons en quatre groupes en fonction de leur taille de caractéristique. (14)

2.3.1 Modèles de fatigue basés sur la contrainte

Le modèle basé sur les contraintes est adapté à la fatigue avec un nombre de cycles très

élevé (environ 10^5 cycles). Dans le domaine de la fiabilité des composants microélectroniques de niveau PCB (fiabilité au niveau de la carte), les tests de vibration accélérés peuvent provoquer la rupture des interconnexions après un grand nombre de cycles de fatigue, ce qui permet d'utiliser de tels modèles. Notons également que certains composants microélectroniques sollicités en chute peuvent atteindre un nombre important de cycles.

Pour la plupart des tests de fiabilité mécaniques et thermomécaniques des composants microélectroniques, les premières ruptures des interconnexions apparaissent après quelques centaines de cycles. Les modèles basés sur les contraintes ne sont alors pas adaptés, centaines de cycles. Les modèles basés sur les contraintes ne sont alors pas adaptés. (14)

2.3.2 Modèles de fatigue basés sur les déformations

Parmi les modèles de fatigue basés sur les déformations, le modèle de Coffin-Manson, le modèle de Solomon et celui Engelmaier sont les plus utilisés dans le domaine de la fiabilité mécanique et thermomécanique des composants électroniques assemblés par joint de brasure. Ces trois modèles proposent des formules empiriques reliant le nombre de cycles à la rupture avec les amplitudes des déformations plastiques. Étant donné que dans la majorité des cas, les composants assemblés par brasure présentent des ruptures par fatigue en mode de cisaillement (figure 30), l'amplitude de déformation de cisaillement est utilisée au lieu de la déformation équivalente ou principale. La détermination des déformations plastiques de cisaillement se fait alors analytiquement, numériquement ou expérimentalement. (14)

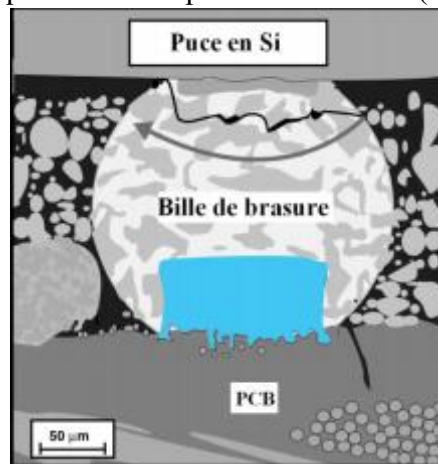


Figure 29 : rupture par fatigue d'une bille de brasure (14)

2.3.3 Modèles de fatigue basés sur le fluage

La température et la vitesse de sollicitation conduisent à des déformations par fluage des billes de brasure. Ainsi, sous sollicitations répétées imposées par les essais accélérés, des ruptures des interconnexions par fatigue ou par fatigue/fluage peuvent avoir lieu et conduisent à la défaillance des composants. Des modèles de fatigue basés sur les déformations de fluage sont proposés dans la littérature. (14)

2.3.4 Modèles de fatigue basés sur l'énergie

Les modèles de fatigue basés sur l'énergie sont les plus utilisés pour déterminer la durée de vie des composants électroniques soumis à des tests accélérés. Les approches énergétiques permettent de prendre en compte les effets des sollicitations multiaxiales. Le nombre de cycles à la rupture est généralement lié à la densité de l'énergie inélastique. (14)

Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons vu l'effet non négligeable de flexion sur la tenue mécanique des microcomposants électroniques, avant que de nouveaux micro-composants ne soient mis sur le marché, une recherche préliminaire sur la fiabilité est essentielle. Pour notre étude, nous avons choisi d'étudier la réponse mécanique par flexion répétée relevant de la norme JEDEC. Nous avons entamé aussi les lois de fatigues pour estimer la durée de vie dans un temps accélérer.

Chapitre III : Simulation numérique par éléments finis du test accéléré « flexion répétée »

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les procédures suivies pour effectuer la simulation d'un test de flexion normalisé sur un circuit imprimé comportant trois puces retournées « 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.

3.1.1 Outil de calcul Abaqus

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. (17)

3.2 Présentation de la géométrie réelle de l'étude

Nous avons modélisé la géométrie de la puce retournée et du circuit imprimé, cette géométrie est symétrique. Dans une première partie, nous avons procédé à la modélisation de la géométrie complète. Une deuxième phase de calcul consistait à exploiter les symétries et de modéliser le quart de la structure uniquement

L'assemblage de géométrie est illustré par la figure 30.

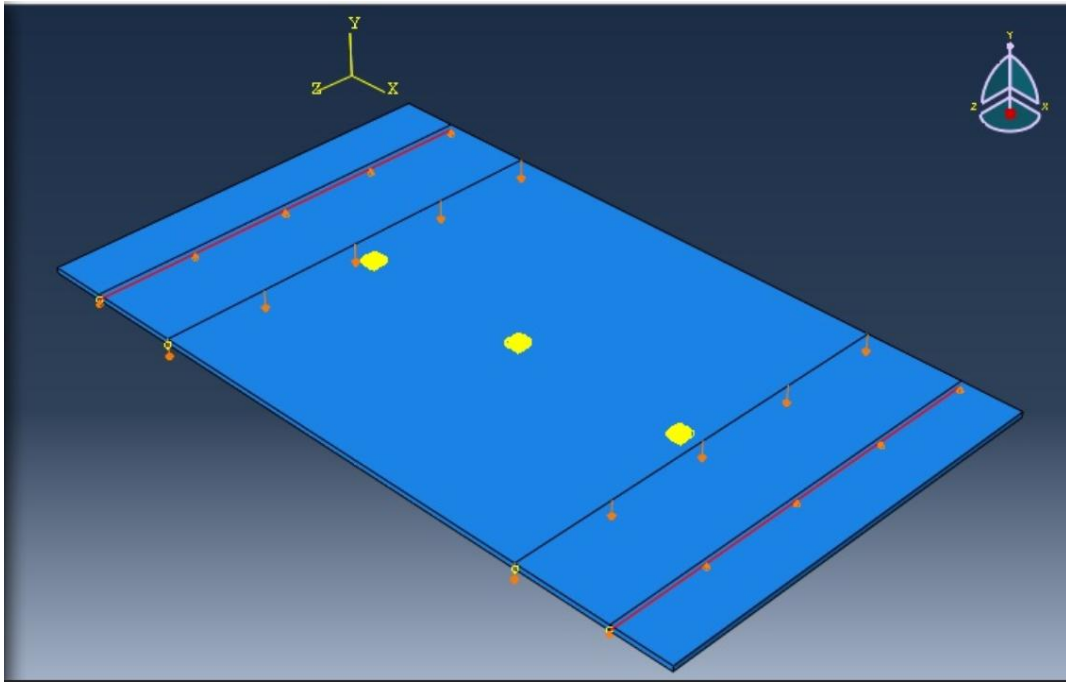


Figure 30 : Vue d'assemblage globale

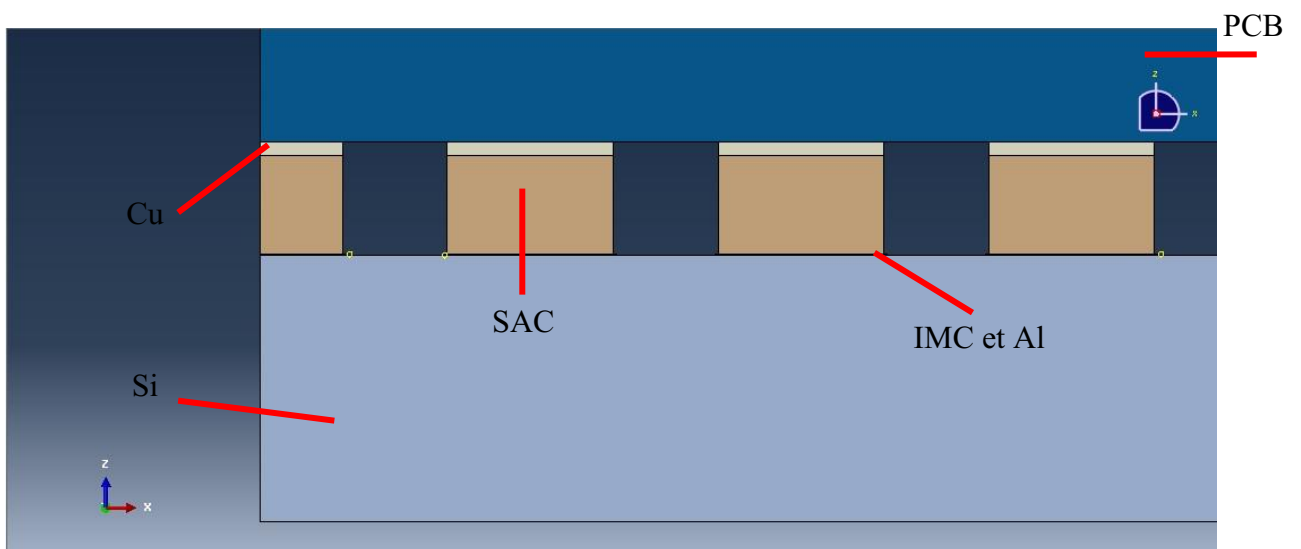
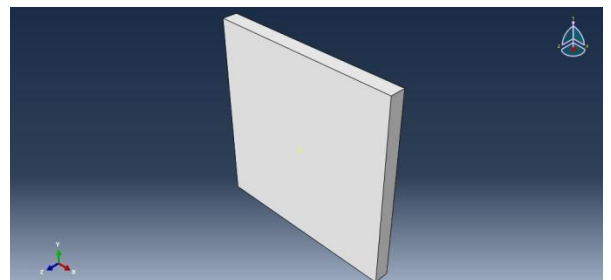
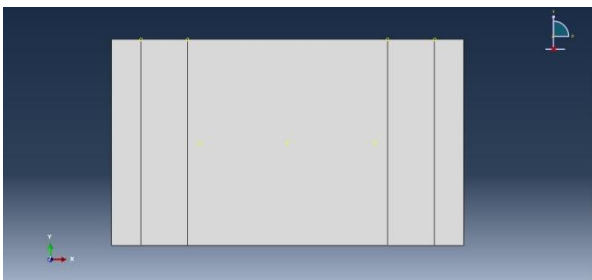


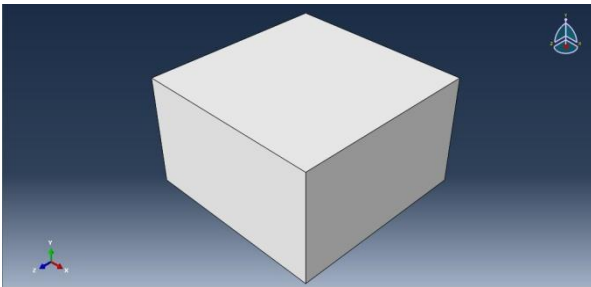
Figure 31 : Vue en coupe de l'assemblage étudié

Les pièces assemblées dans la figure précédente (figure 31) sont représentées individuellement avec dimensions sur la figure 31 : Le nom des pièces correspond aux matériaux de fabrication.



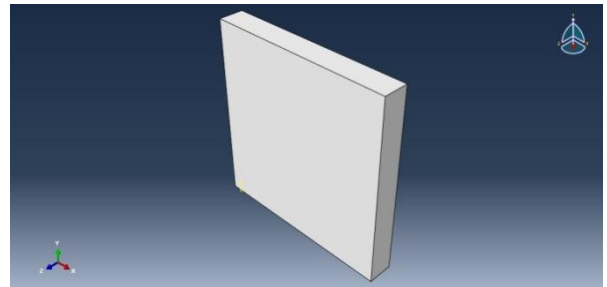
PCB

Longueur = 132 mm
Largeur = 77 mm
Epaisseur = 1 mm



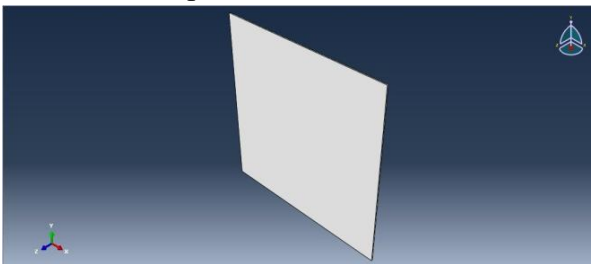
Cu

Longueur = 0.25 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.02 mm



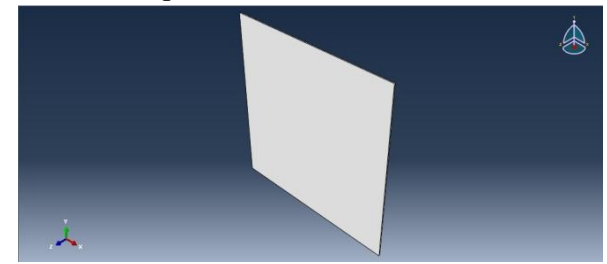
SAC

Longueur = 0.25 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.148 mm



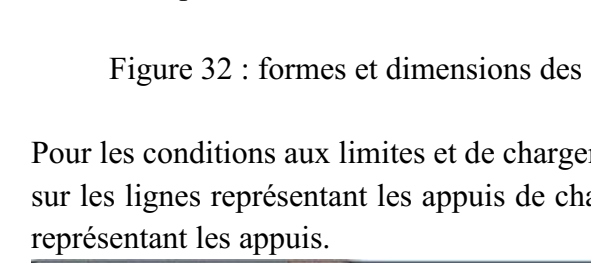
Si

Longueur = 3 mm
Largeur = 3 mm
Epaisseur = 0.4 mm



IMC

Longueur = 0.25 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



Al

Longueur = 0.26 mm
Largeur = 0.26 mm
Epaisseur = 0.015 mm

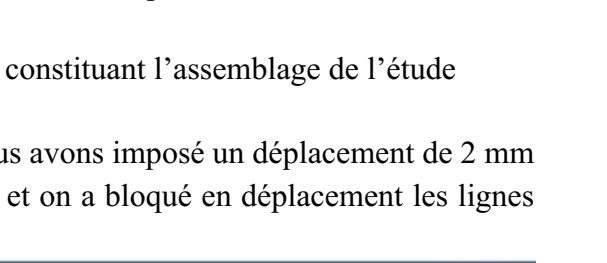


Figure 32 : formes et dimensions des éléments constituant l'assemblage de l'étude

Pour les conditions aux limites et de chargement, nous avons imposé un déplacement de 2 mm sur les lignes représentant les appuis de chargement et on a bloqué en déplacement les lignes représentant les appuis.

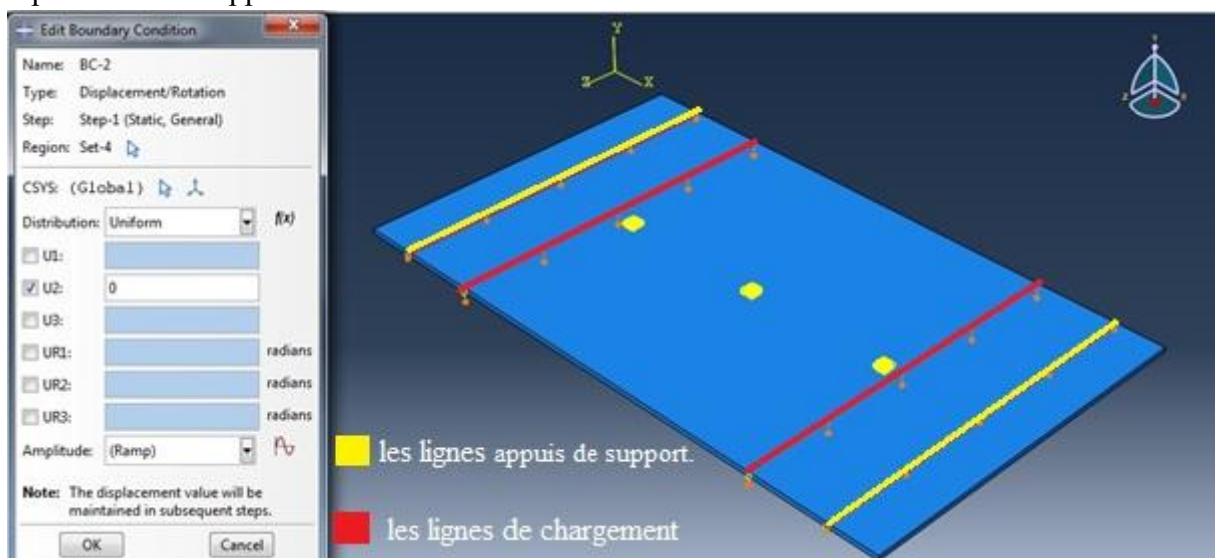


Figure 33 : Conditions aux limites appliquées au modèle étudié

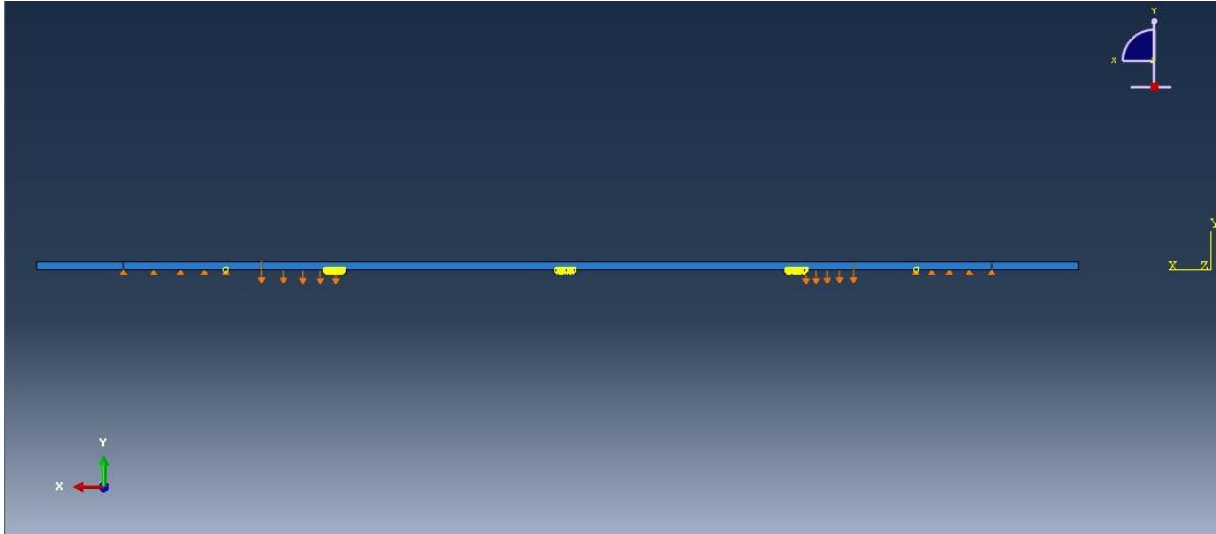


Figure 34 : Conditions aux limites suivant X et Y

3.2.1 Matériau

Les propriétés des matériaux introduites dans les simulations sont résumées sur le tableau 4

Tableau 4 : Propriété des matériaux (14)

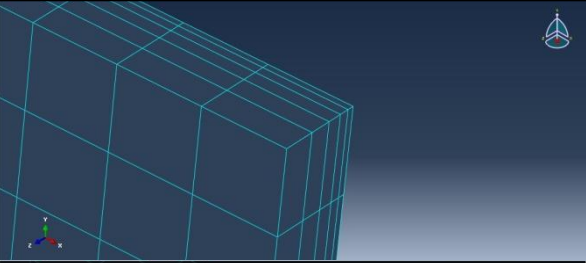
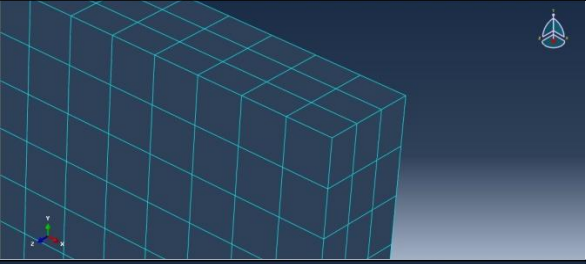
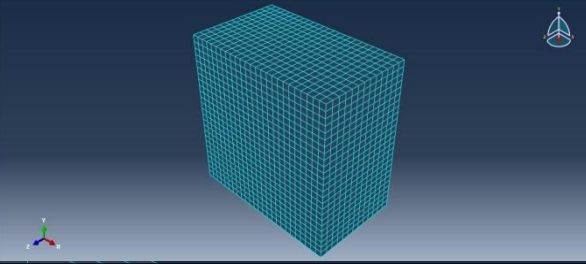
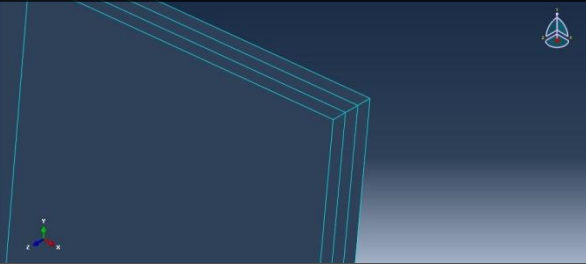
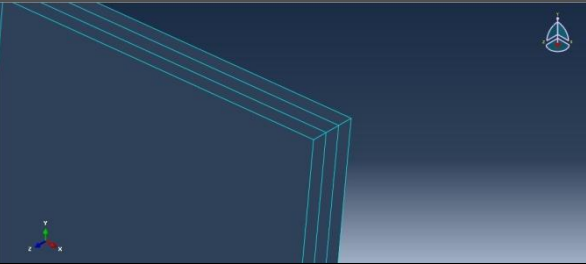
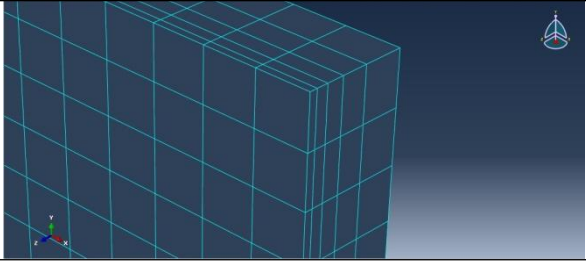
Matériau	E (Mpa)	Coeff de Poiss on	Comportement plastique	
			Contrainte [MPa]	Déformation plastique
PCB	20000	0.28		
Al	71000	0.33	280	0
Cu	110000	0.34	33	0
			210	0.6
Si	131000	0.3		
SAC	45000	0.3	15	0
			25	0.006
			29	0.019
			30	0.052
IMC	92000	0.33		

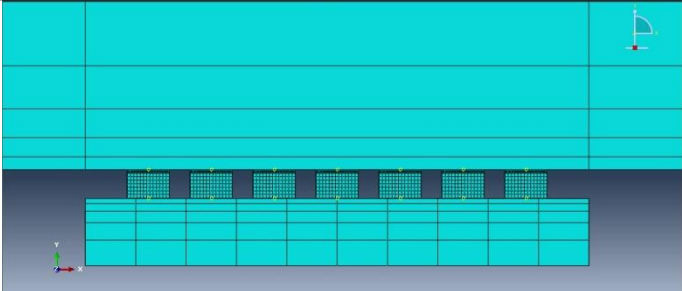
3.2.2 Maillage

Une bonne mise en œuvre du maillage est essentielle pour obtenir des résultats cohérents. Cela affecte grandement le temps de calcul, il faut donc limiter les éléments. Cependant, certaines composantes de notre géométrie sont des couches minces de l'ordre du micron, et il est nécessaire d'utiliser un maillage approprié.

Le tableau ci-dessous présente les différentes pièces avec leurs maillages :

Tableau 5 ; Tableau des pièces maillées

Pièce	Maillage	Description		
		Nœuds	Éléments	Type
PCB		41496	30492	C3D8R
Cu		2704	1875	C3D8R
SAC		9464	8125	C3D8R
IMC		2704	1875	C3D8R
Al		2916	2028	C3D8R
Si		726	500	C3D8R

Assemblage		1040982	732648	C3D8R
------------	---	---------	--------	-------

On a fait un maillage raffinée sur PCB et Si.

L'élément C3D8R est un élément de brique linéaire à usage général, avec une intégration réduite.

3.2.3 Les contacts

La structure étudiée comporte plusieurs zones de contact. Nous avons procédé à une recherche automatique des zones de contact puis nous avons procédé à un travail de sélection pour éliminer les pièces qui ne sont pas réellement en contact. Pour le modèle complet, nous avons obtenu 567 contacts. Le type des contacts parfait (Tie) comme il est présenté dans la figure 35.

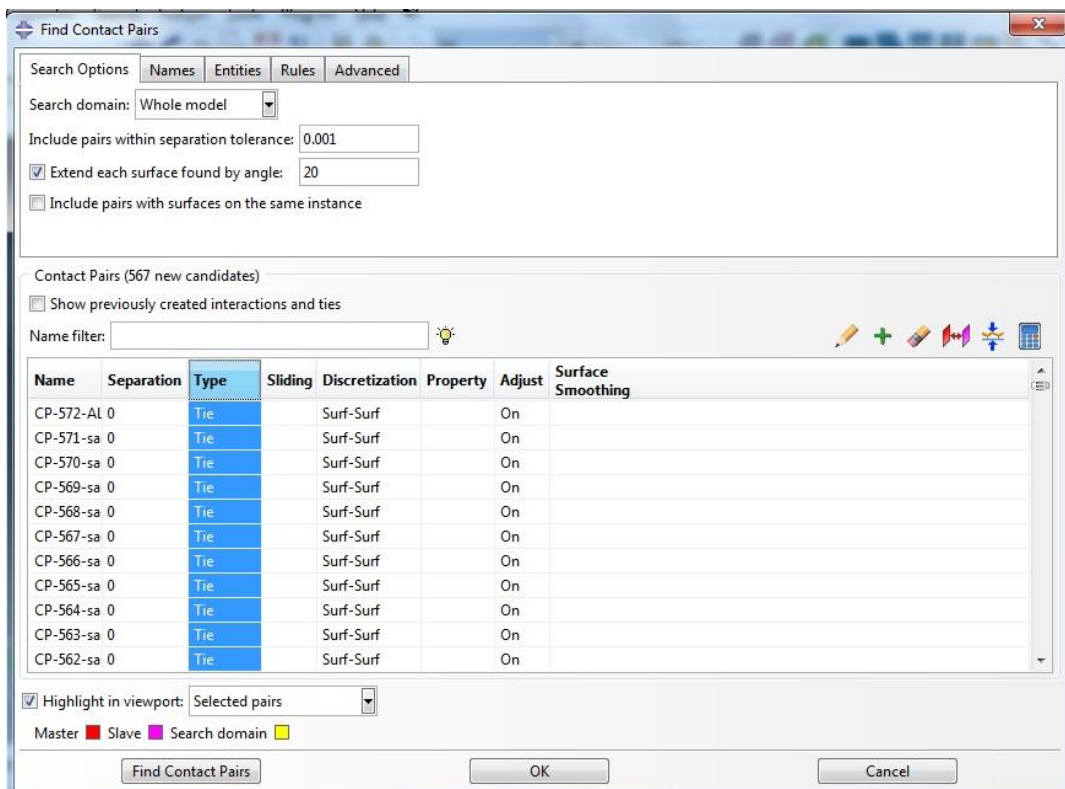
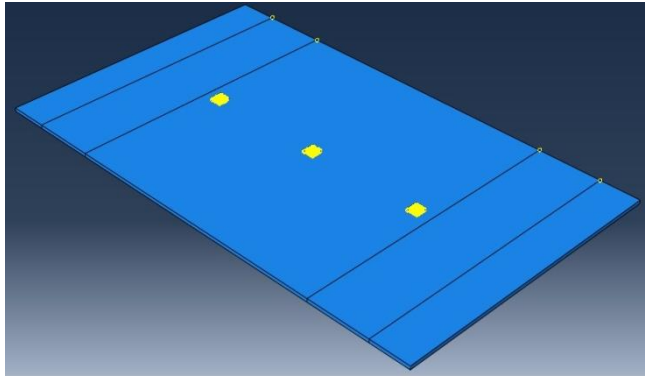


Figure 35 : Recherche et sélection des contacts

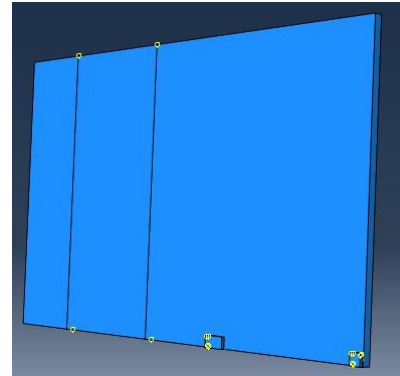
3.3 Etude sur le quart de la géométrie

La structure étant symétrique, nous avons procédé à la modélisation du quart de la structure. Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus avec le modèle complet avec ceux obtenus avec le quart du modèle.

Présentation du modèle géométrique



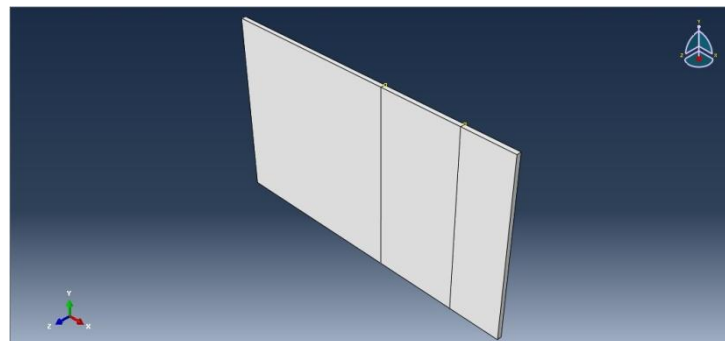
Modèle complet



Modèle $\frac{1}{4}$

Figure 36 : présentation du modèle complet et du modèle simplifié $\frac{1}{4}$

Les paramètres de la géométrie $\frac{1}{4}$

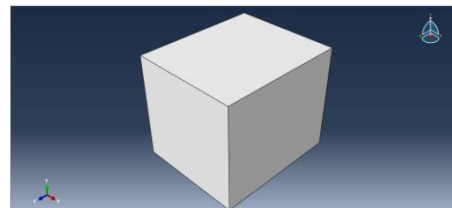
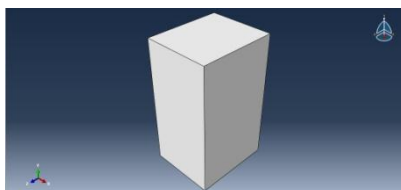


PCB $\frac{1}{4}$

Longueur = 66 mm

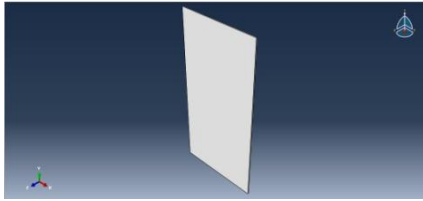
Largeur = 38.5 mm

Epaisseur = 1 mm



SAC 1/2

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.148 mm



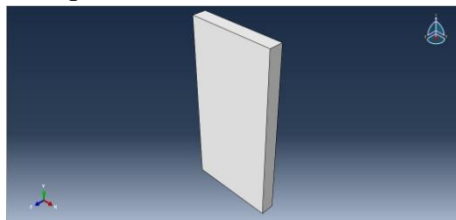
SAC 1/4

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.125 mm
Epaisseur = 0.148 mm



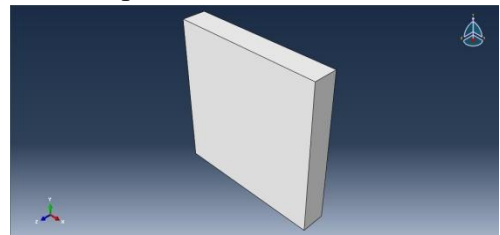
IMC 1/2

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



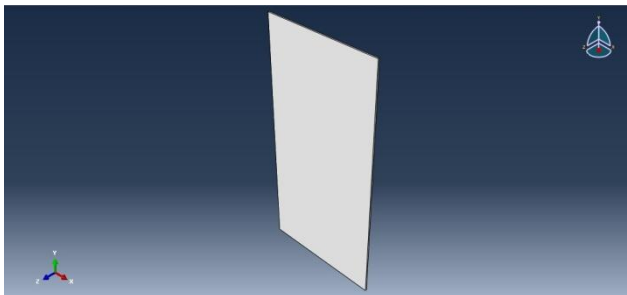
IMC 1/4

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.125 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



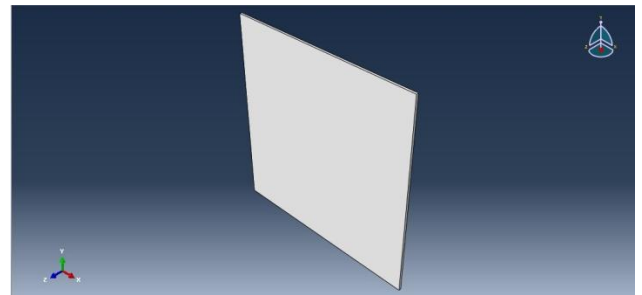
Cu 1/2

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.25 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



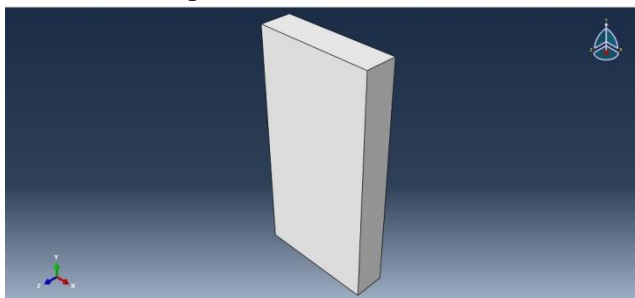
Cu 1/4

Longueur = 0.125 mm
Largeur = 0.125 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



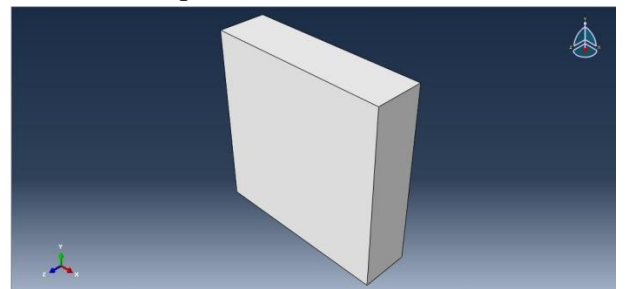
Al 1/2

Longueur = 0.13 mm
Largeur = 0.26 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



Al 1/4

Longueur = 0.13 mm
Largeur = 0.13 mm
Epaisseur = 0.0015 mm



Si 1/2

Longueur = 1.5 mm

Si 1/4

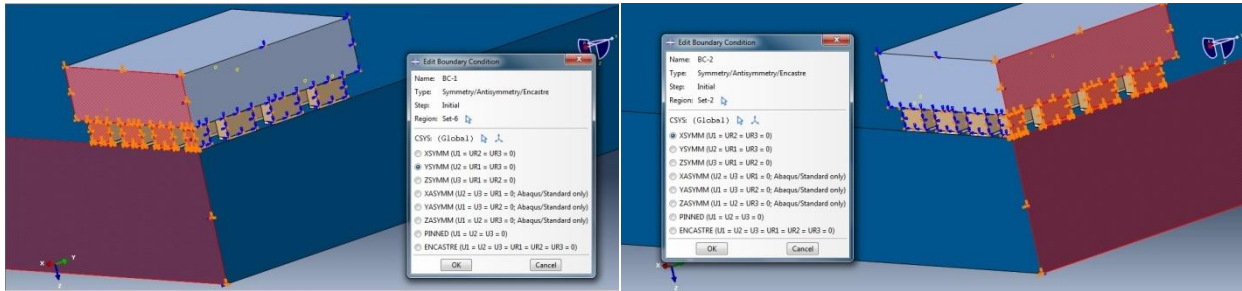
Longueur = 1.5 mm

Largeur = 3 mm
 Epaisseur = 0.4 mm

Largeur = 1.5 mm
 Epaisseur = 0.4 mm

Figure 37 : formes et dimensions des éléments constituant l'assemblage le quart du modèle

Les conditions aux limites et de chargement sont les mêmes que le modèle complet. Nous avons imposé les conditions de symétrie suivant l'axe X et Z comme le montre la figure 38.



Symétrie suivant Y

Symétrie suivant X

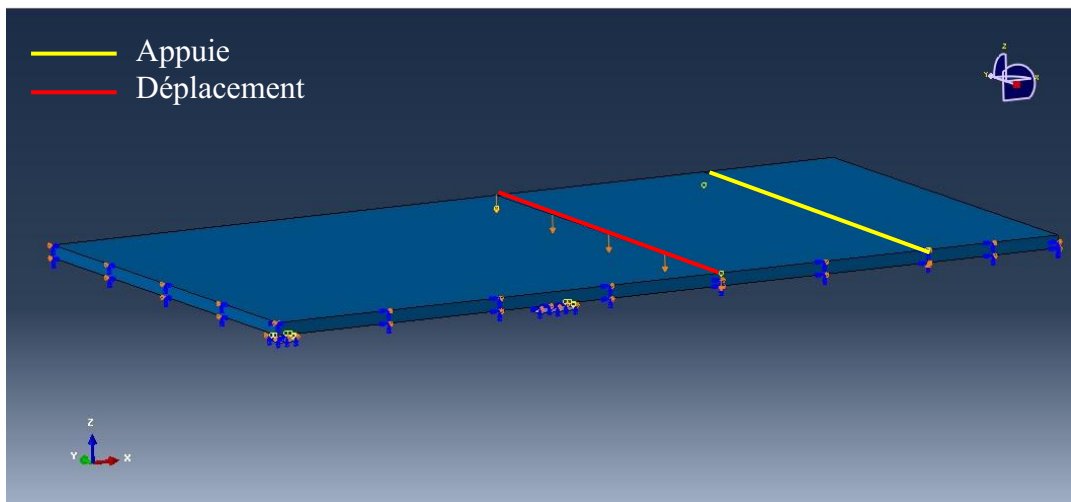
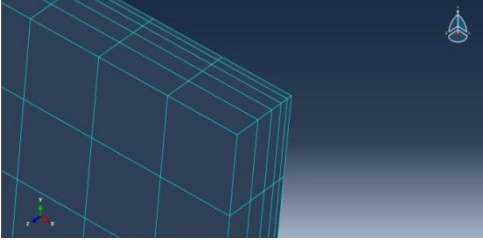
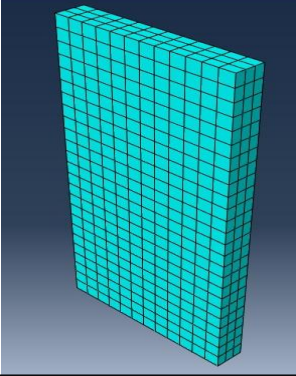
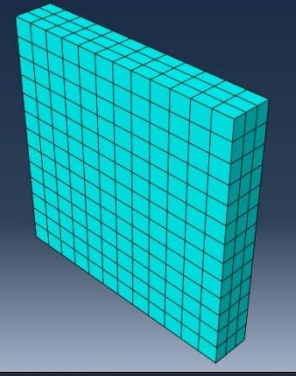
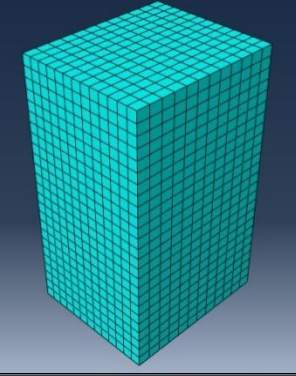
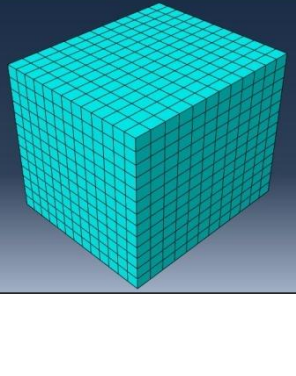


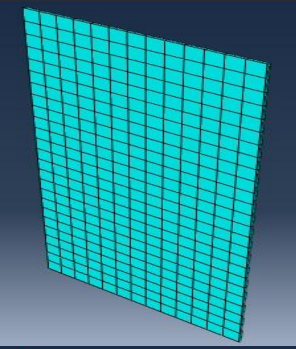
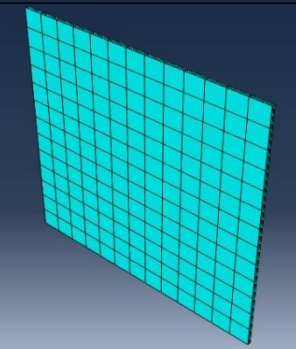
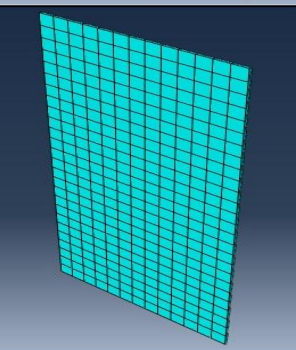
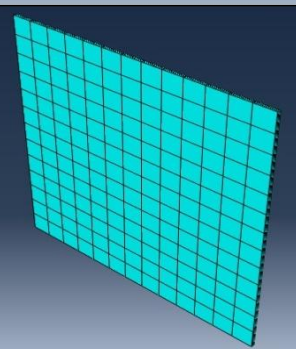
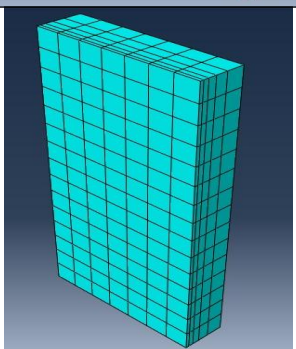
Figure 38 : représentation des conditions aux limites et des symétries suivant X et Y

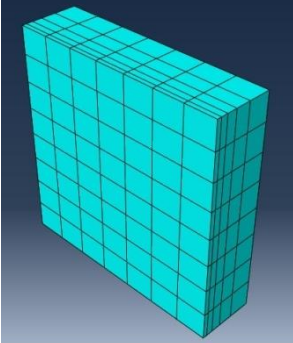
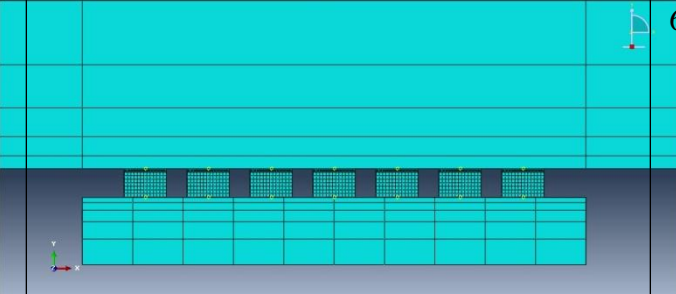
3.3.1 Maillage

Le type de maillage pour la géométrie simplifiée (1/4) est identique à celui généré sur la géométrie complète. Cependant, le nombre d'éléments finis s'est fortement réduit. Le tableau 6 montre les maillages des éléments constituant l'assemblage :

Tableau 6 ; Tableau des pièces maillées (1/2 et 1/4)

Pièce		Maillage				
				Nœuds	Éléments	Type
PCB 1/4				16320	13065	C3D8R
Cu	0.5			1352	900	C3D8R
	0.25			728	468	
SAC	0.5			4732	3900	C3D8R
	0.25			2548	2028	

IMC	0.5		1456	975	C3D8R
	0.25		784	507	
Al	0.5		1512	1014	C3D8R
	0.25		784	507	
Si	0.5		768	525	C3D8R

	0.25			432	280	
Assemblage				673680	522727	C3D8R

3.3.2 Les contacts

La recherche automatique des contacts a conduit à la détermination de 220 zones de contact.
Le contact est considéré comme étant parfait.

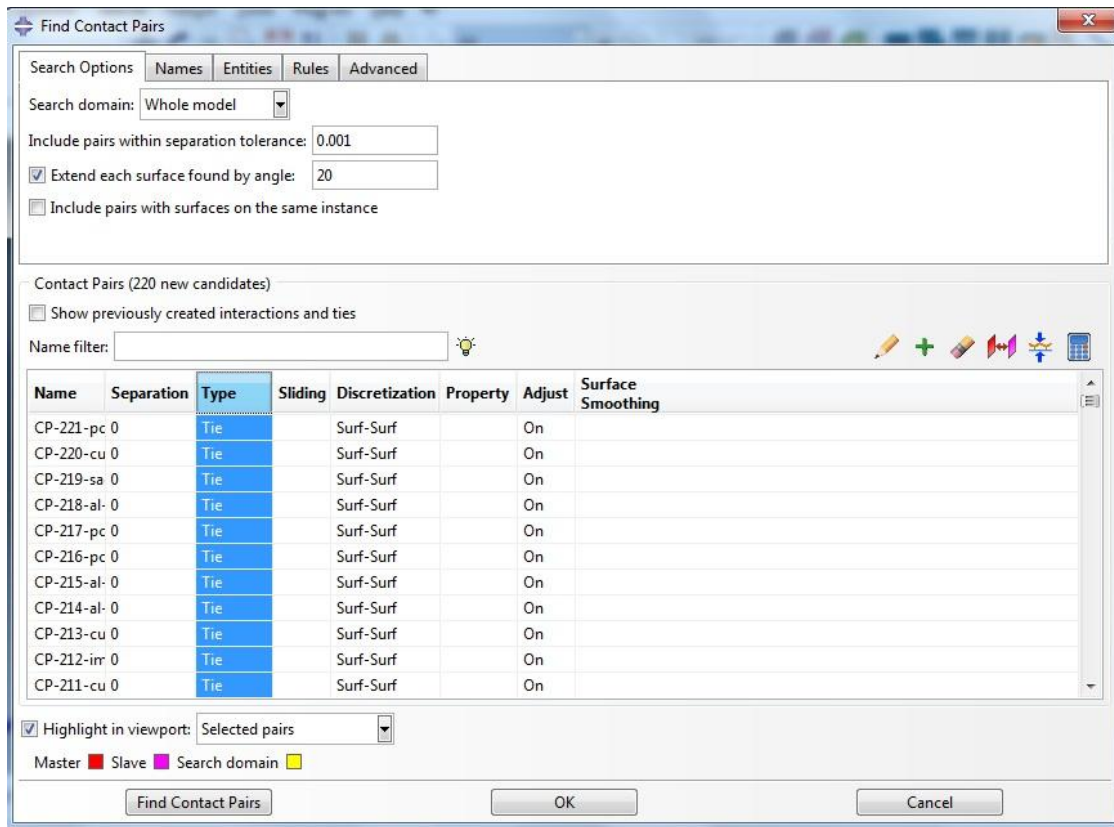
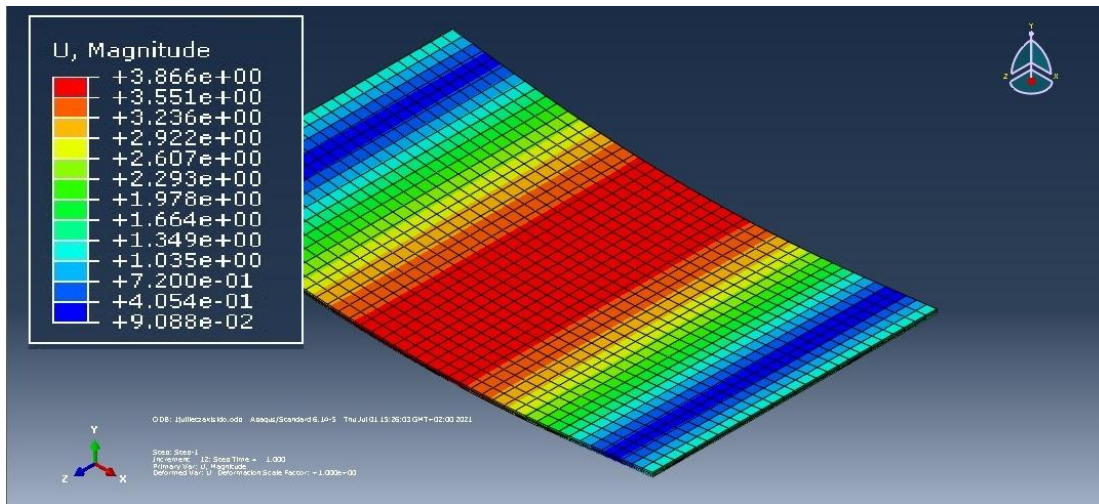


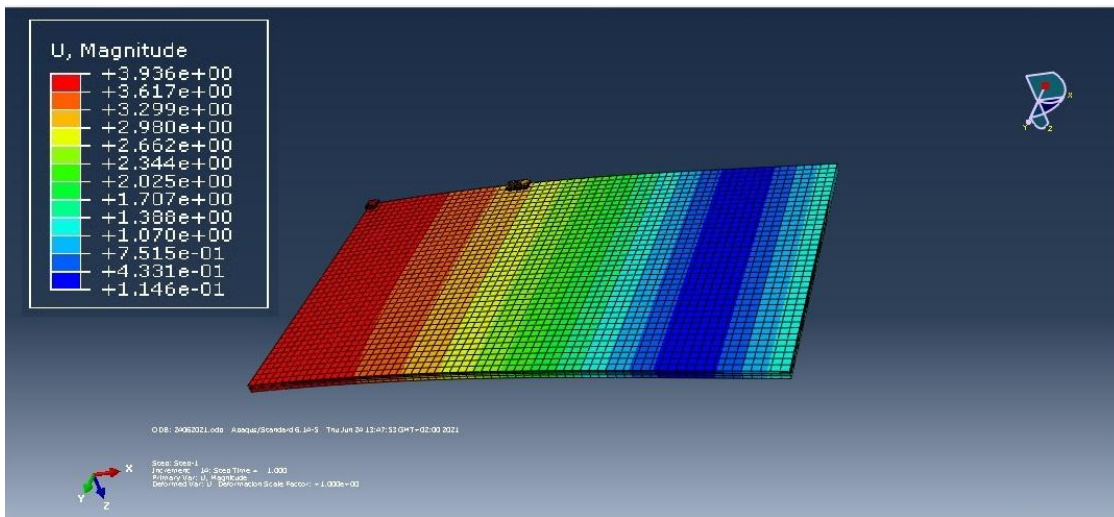
Figure 39 : Recherche et sélection des contacts pour le modèle un quart

3.4 Comparaison des deux modèles (complet et simplifié 1/4)

Dans cette partie, nous présentons des comparaisons des résultats obtenus par les deux modèles. La figure.40 montre le déplacement maximal obtenu par les deux modèles. Nous remarquons que la valeur maximale du déplacement est observée au niveau du centre du PCB. Cette observation est identique pour les deux modèles.



Déplacement du modèle complet



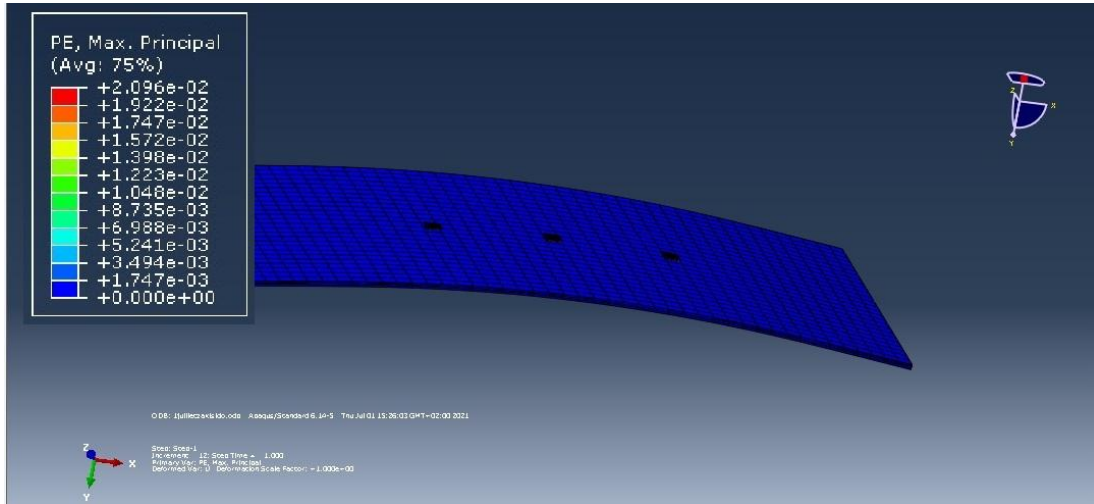
Déplacement du modèle simplifié

Figure 40 : Déplacement magnitude

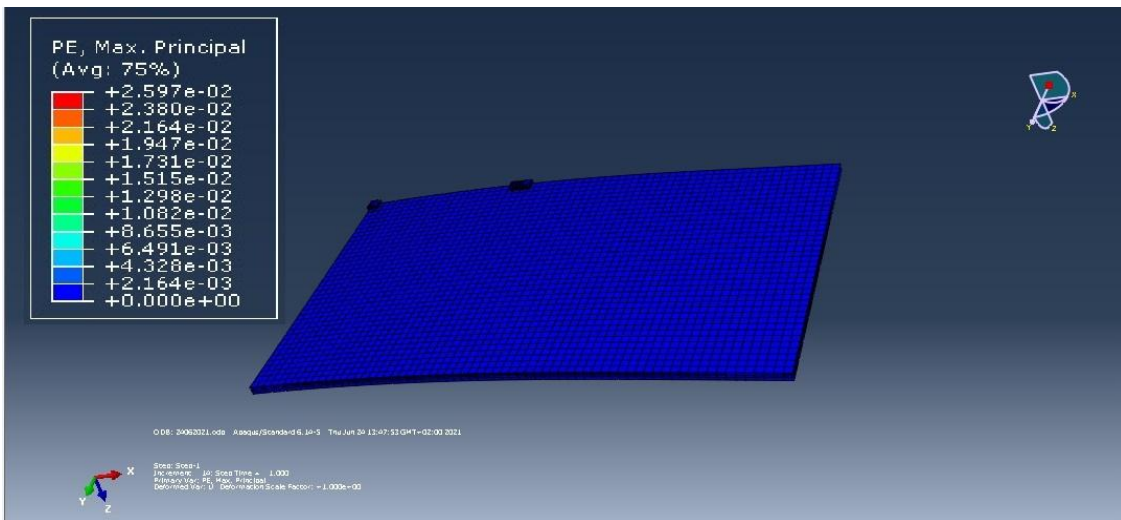
Nous observons également que le déplacement maximal obtenu par le modèle géométrique complet est de 3.866 mm. Le quart du modèle présente un déplacement maximal de 3.936 mm soit une différence de moins de 2%.

La figure 41 donne une comparaison des déformations plastiques obtenues par les deux modèles. Nous constatons que le modèle complet enregistre une déformation plastique maximale de 2.096 % tandis que celui simplifié présente une déformation plastique de 2.59 %. Au niveau des billes de brasure (SAC), la déformation plastique maximale obtenue par le modèle complet avoisine les 1.16 % alors que le modèle simplifié donne une déformation plastique de 1.59%.

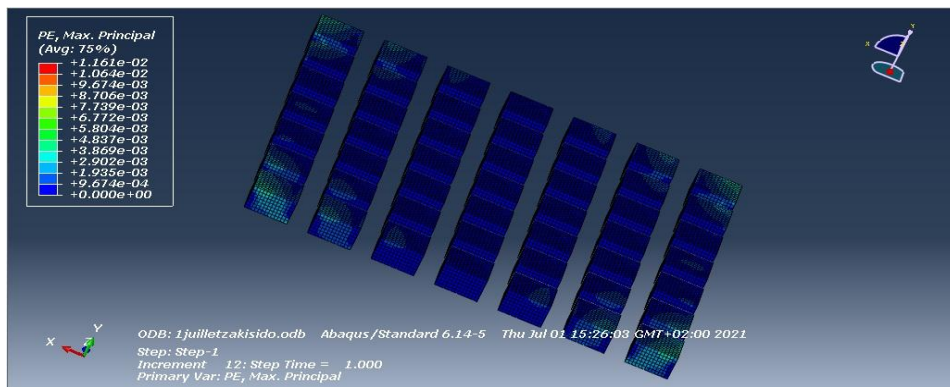
De ces comparaisons, on peut dire que le modèle simplifié donne des résultats proche de ceux obtenus par le modèle complet. C'est ce modèle simplifié qui sera utilisé dans le reste de notre travail numérique.



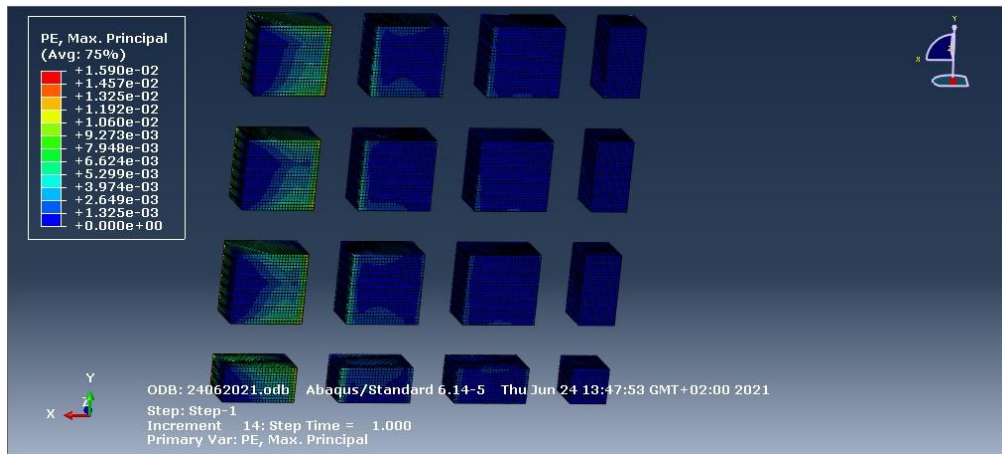
Déformation plastique du modèle complet



Déformation plastique du modèle simplifié



Déformation plastique du SAC du modèle complet



Déformation plastique du SAC du modèle simplifié

Figure 41 : Déformation plastique

Conclusion

Sur cette partie, nous avons apercevoir les deux structures (modèle complet et simplifié) avec leurs contacts, conditions aux limites, maillages, propriétés mécaniques et les paramètres des deux géométries, on a fait une comparaison pour les deux modèle, on conclu que les résultats du modèle simplifié est plus proches de celles obtenue par le modèle complet.

Chapitre IV : Résultats et discussions

Le but principal de notre modélisation numérique était la détermination de la réponse mécanique de notre composant suite à une flexion de la carte électronique sur laquelle notre composant est assemblé. Le risque majeur dans les assemblages des composants électronique réside dans le décollage de la puce (microcomposant) de son support (PCB). C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la déformation plastique maximale des billes de brasure (SAC) ainsi que dans les plots de cuivre (Cu). Les contraintes équivalentes maximales dans le silicium (Si) ont été évaluées. Un niveau élevé des contraintes entraîne une perturbation des fonctions électroniques du composant. En plus du but principal atteint, nous avons tenté de proposer une solution pour réduire le niveau des déformations plastique et des contraintes sans toucher à la composition du microcomposant (matériaux). Nous avons opté pour une variation minimale des dimensions de certains éléments pour en étudier les conséquences sur les niveaux des déformations plastiques et des contraintes. Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur du silicium Si ainsi de l'influence de l'épaisseur de la brasure SAC. Nos comparaisons se décomposent en deux parties, une qualitative réservée à la localisation des zones de fortes contraintes et déformations et une deuxième quantitative regroupant les valeurs maximales des contraintes et des déformations sur des graphiques.

4.1 Effet de l'épaisseur du silicium

Dans cette partie nous avons étudié l'impact d'une variation de l'épaisseur de silicium sur les contraintes équivalentes maximales de Von Mises ainsi que les déformations plastiques maximales des billes de brasure et des plots de cuivre. L'épaisseur de Si varie de 0.1 mm à 0.4 mm.

4.1.1 Effet de l'épaisseur de Si sur la déformation plastique du Sac et du Cu

La figure 42 présente l'effet qualitatif de l'évolution de l'épaisseur du Si sur les déformations plastiques des billes de brasure. Nous constatons que les zones à forte concentration de déformation plastique sont les mêmes quel que soit l'épaisseur du Si.

Figure 42: Répartition de la déformation plastique maximale dans les billes de brasure pour les quatre épaisseurs de Si.

La figure. 43 donne une comparaison de la déformation plastique maximale obtenue sur les plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de Si. Nous remarquons que les quatre modèles présentent les mêmes zones à forte déformation plastique.

Figure 43: Répartition de la déformation plastique maximale dans les plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de Si.

La comparaison qualitative a montré que la variation de l'épaisseur du Si ne présente pas d'effets significatifs sur les zones à forte déformation plastique. Nous nous intéressons maintenant à la comparaison des valeurs des déformations plastiques. Nous qualifions cette comparaison de quantitative.

La figure. 44 illustre l'évolution de la déformation plastique maximale des billes de brasure et des plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de Si. De ce graphique nous pouvons remarquer que :

- ✓ Les déformations plastiques maximales dans les plots de cuivre sont supérieures à celles obtenues sur les billes de brasure. Cette constatation est valable quel que soit l'épaisseur de Si.
- ✓ Les déformations plastiques maximales des billes de brasure et des plots de cuivre augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de Si. Un amincissement des puces conduit à une amélioration de la tenue mécanique de l'assemblage (Puce/PCB).

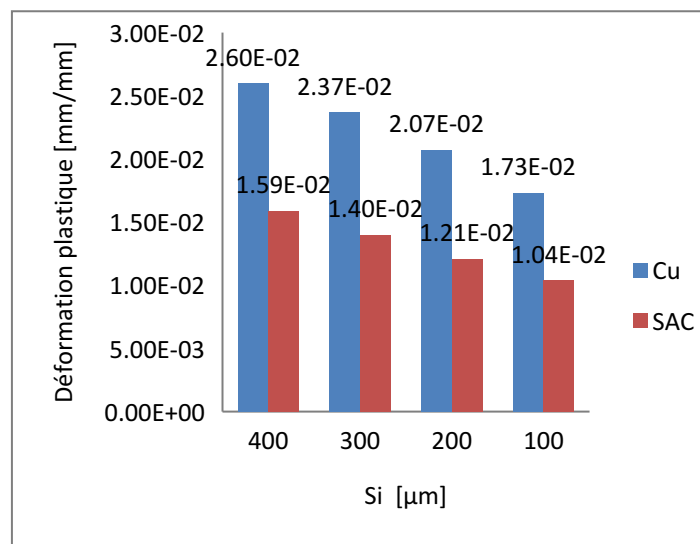


Figure 44: Evolution de la déformation plastique maximale du SAC et Cu en fonction de l'épaisseur du Si

4.1.2 Effet de l'épaisseur du Si sur les contraintes équivalentes maximales dans le Si.

Dans cette partie de l'étude, nous nous intéressons au niveau et à la répartition des contraintes équivalentes maximales de Von Mises dans le Si. Le niveau et la répartition des contraintes dans le Si a un impact sur les fonctions électronique de la puce.

La figure. 45 présente les répartitions des contraintes dans le Si pour les quatre épaisseurs étudiées. Nous constatons que les zones à forte concentration de contraintes sont les mêmes pour les quatre modèles.

Figure 45: Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le Si pour les quatre

épaisseurs.

La figure. 46 donne l'évolution de la valeur maximale de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'épaisseur du Si. Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur de Si provoque une diminution des contraintes. On peut dire que :

- ✓ L'amincissement du Si conduit à une augmentation des valeurs de contraintes équivalentes de Von Mises.

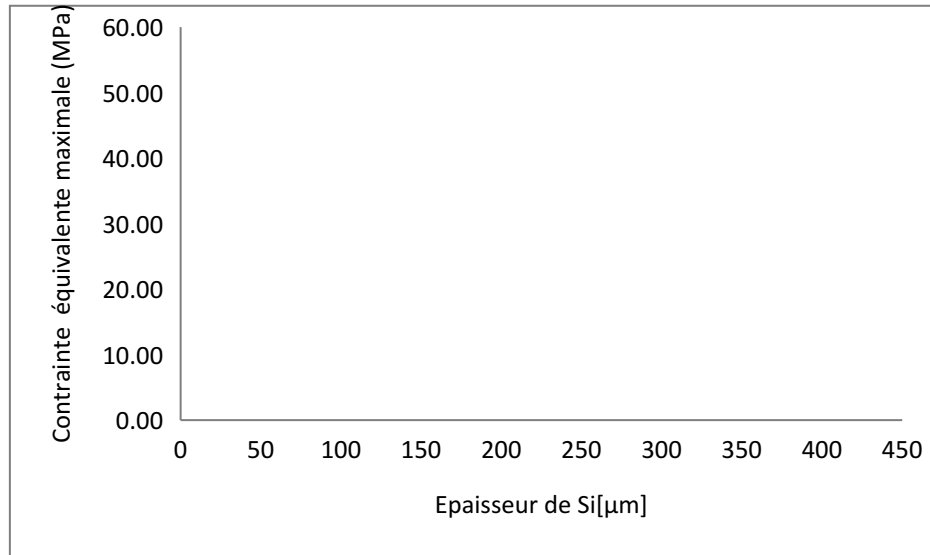


Figure 46: Evolution de la valeur maximale de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'épaisseur de la brasure.

4.2 Effet de l'épaisseur des billes de brasure

Les billes de brasure sont l'élément d'assemblage des puces sur le PCB. Nous avons procédé à une étude paramétrique visant à mettre en lumière l'effet de l'épaisseur des billes de brasure sur les déformations plastiques maximales. Les épaisseurs étudiées sont : 0.148 mm, 0.130 mm, 0.120mm et 0.110 mm.

Sur les déformations plastiques :

La figure. 47 illustre la répartition des déformations plastiques dans les billes de brasure en fonction de l'épaisseur de ces dernières. Nous constatons que les zones à forte concentration de déformation plastique demeurent les mêmes pour les quatre épaisseurs étudiées. Nous pouvons conclure que :

L'évolution de l'épaisseur de la brasure ne présente pas d'effet significatif sur la répartition des déformations plastiques dans les billes SAC.

Figure 47: Répartition de la déformation plastique maximale dans les billes de brasure pour les quatre épaisseurs de SAC.

La figure .48 donne les répartitions de déformations plastiques des plots de cuivre pour les quatre épaisseurs du SAC. Nous constatons que les zones à forte déformation plastiques restent les mêmes pour les quatre modèles.

Figure 48: Répartition de la déformation plastique maximale dans les plots de cuivre pour les quatre épaisseurs de SAC.

La comparaison qualitative n'a pas donné de distinction entre les quatre modèles. Nous avons procédé à une comparaison quantitative. Les valeurs maximales des déformations plastiques des billes de brasure et des plots de cuivres sont illustrées par la figure. 49. Nous constatons que :

- ✓ Les niveaux de déformation plastique obtenue sur les plots de cuivre reste supérieur à celui obtenu sur les billes de brasure. Cette constatation est valable pour les quatre épaisseurs de SAC étudiées.
- ✓ La diminution de l'épaisseur du SAC conduit à une légère diminution des niveaux de déformation plastiques (SAC et Cu).

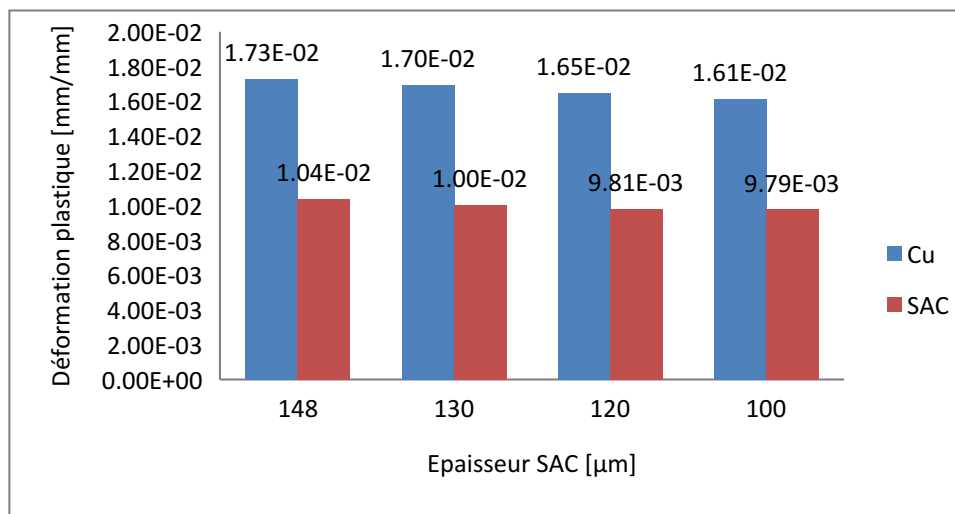


Figure 49: Evolution de la déformation plastique maximale en fonction de l'épaisseur du SAC.

Sur les contraintes :

L'impact de la variation de l'épaisseur du SAC sur les contraintes dans le Si est présenté dans cette partie. La figure .50 montre la répartition des contraintes équivalentes de Von Mises sur les puces en Si pour les quatre épaisseurs de brasure nous remarquons que les fortes concentrations de contraintes occupent les mêmes zones pour les quatre modèles

Figure 50: Répartition des contraintes équivalentes de Von Mises dans le Si pour les quatre épaisseurs du SAC

La figure .51 montre l'évolution de la valeur maximale de la contrainte équivalente de Von Mises relevées sur le Si pour les quatre épaisseurs du SAC. Nous constatons que l'augmentation de l'épaisseur du SAC provoque une diminution de la contrainte dans le Si.

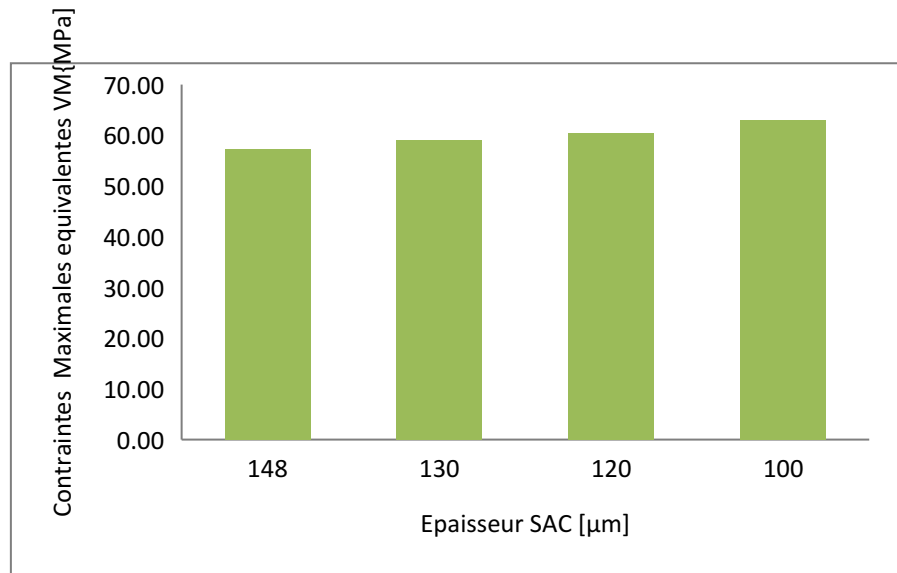


Figure 51: Evolution de la contrainte équivalente maximale de Von Mises en fonction de l'épaisseur du SAC.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons conclu que l'effet de l'épaisseur du Si et de SAC a une influence sur les déformations plastiques et les contraintes.

Conclusion générale

Le présent travail montre la place que peut occuper la mécanique dans des projets de développement dans d'autres domaines d'ingénierie, l'électronique en l'occurrence. En effet, cette modeste étude montre l'importance des calculs de résistance mécanique d'un microcomposant électronique sollicité en flexion quatre points. L'étude a été menée sur un composant de type « Puce Retournée » (Flip-Chip). La réponse mécanique du microcomposant monté sur un surcircuit imprimé a été évaluée numériquement par des simulations numériques 3D. La méthode des éléments finis a été employée dans les calculs numériques. Les calculs ont été menés en utilisant le code de calcul par éléments finis Abaqus.

L'étude paramétrique visant à évaluer l'impact d'un certain nombre de paramètres géométriques sur la réponse globale de la microstructure a été riche en résultats. Nous pouvons les résumer dans les points suivants :

- ✓ La recherche bibliographique nous a permis découvrir l'importance de la fiabilité de flexion mécanique pour la fabrication des puces retournées dans un but d'améliorer la fiabilité.
- ✓ Le modèle simplifié (1/4), peu gourmand en capacité machine et en temps de calcul donne des résultats proches de ceux obtenus par le modèle complet. L'utilisation du modèle simplifié est alors justifiée.
- ✓ L'évolution de l'épaisseur du silicium ne présente pas d'effets significatifs sur la répartition des contraintes équivalentes de Von Mises et des déformations plastiques.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur de Si conduit à une augmentation des déformations plastiques dans le Cu et dans le SAC accompagnée d'une diminution des contraintes dans le silicium.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur du SAC provoque une légère augmentation dans les déformations plastique du Cu et une quasi stabilité des déformations plastiques dans le SAC. Les contraintes équivalentes dans le Si présentent une nette diminution avec l'augmentation de l'épaisseur du SAC.

Nous rajoutons que le présent travail nous a permis de consolider nos connaissances apprises durant notre cursus notamment les calculs par éléments finis sur Abaqus.

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. **Bueno, Lény.** SYSTÈMES EMBARQUÉS ET SÉCURITÉ HARDWARE - PARTIE 1. *digital.security*. [En ligne] 06 Avril 2016. <https://www.digital.security/fr/blog/systemes-embarques-et-securite-hardware-partie-1>.
3. **Matherat, Philippe.** Une histoire de la microélectronique. *archives.ouvertes*. [En ligne] 25 Juin 2007. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00157199/document>.
4. **sekar.** software and hardware. *blogspot.com*. [En ligne] 23 juillet 2011. <http://softwareandhardwaretech.blogspot.com/2011/07/second-generation-1956-1963.html>.
5. **Pajolet.** Pajolet. *facebook*. [En ligne] 09 avril 2018. <https://www.facebook.com/385187185289775/photos/a.385187211956439/385188788622948/?type=3&theater>.
6. *pikist*. [En ligne] <https://www.pikist.com/free-photo-vajax>.
7. **Granier, Hugues.** Comment naissent les puces électroniques ? *www.fetedelascience.fr*. [En ligne] 20-21 Novembre 2009. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiN0bn77PXuAhU4WRUIHRuNDp8QFjACegQIARAD&url=http%3A%2F%2Fwww.laas.fr%2Ffiles%2FFRE-COM%2FFeteScience09%2FFeteScience09_FicheDemo08R.pdf&usg=AOvVaw13-CHzBzk9acb4s4oMY49x.
8. **BOSENNEC, Julien BONY et Victor.** echnologies de fabrication des Circuits Intégrés. *www.developpez.com*. [En ligne] https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwidwqjL7vXuAhV7UUhUIHTk_DnMQFjAAegQIARAD&url=ftp%3A%2F%2Fftp-developpez.com%2Fvictor-bossenec%2Farticle%2Ffabricationci%2FFabricationCI.pdf&usg=AOvVaw2oNE93WRb0DLO-U8E.
9. **T. Tawara, I. Suemune, H. Kumano, Physica E 13, 403.** Cahier technologique sol-gel. [En ligne] 2002. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjOp83Y3ITvAhWyz4UKHUFsBx4QFjADegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fwww.certech.be%2Fdocuments%2Fcahier-technologique-sol-gel-certech.pdf&usg=AOvVaw33OiUMbTAW_UGWZNQpuBUr.
10. *New technologies for lead-free flip chip assembly.* **Gao, S.** s.l. : Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, 13 Novembre 2005.
11. **Kao, C. R.** Interfacial reaction issues for lead-free electronic solders. [En ligne] Mars 2007. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-showing-two-types-of-solder-joints-flip-chip-joints-and-BGA-joints_fig1_226203311.
12. **Gotro, Jeffrey.** [En ligne] 4 November 2013. <https://polymerinnovationblog.com/wp-content/uploads/2013/10/thermocompression-bonding.jpg>.
13. **F. Wang, L. Han.** [En ligne] 2013. <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Study-of-Thermosonic-Gold-Bump-Bonding-Wang-Han/9e95eea1ac7003f112159fe833ae0367e4f1c66c/figure/0>.
14. *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.

15. **Association, ©JEDEC Solid State Technology.** Board Level Cyclic Bend Test Method for Interconnect Reliability Characterization of SMT ICs for Handheld Electronic Products. [En ligne] 2018. www.jedec.org.
16. **LE COQ, Cedric.** *PRÉDICTION DE LA FIABILITÉ DE COMPOSANTS ELECTRONIQUES DE TYPE WL-CSP SOUMIS A DES SOLLICITATIONS MECANIQUES.* Bordeaux : thèse pour obtenir le grade de docteur, 7 juillet 2010.
17. **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.
18. **Yangyang., Sun.** Study on the nanocomposite underfill for flip-chip application. [En ligne] Décembre 2006 .
19. **Pennsylvania, The Trustees of the University of.** The Trustees of the University of Pennsylvania. [En ligne] <https://www.med.upenn.edu/pcmd/3pt-4pt-bending.html>.
20. **Rizvi, M. J., Y.C. Chan, C. Bailey, H. Lu.** Study of anisotropic conductive adhesive joint behavior under 3-point bending. [En ligne] 30 Septembre 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2004.10.015>.
21. **Ho-Ming Tong, Yi-Shao Lai, C.P. Wong.** Advanced Flip Chip Packaging. [En ligne] 2013. <https://fr.zlibcdn2.com/book/2115840/6f4162>.
22. **Tae-Kyu Lee, Thomas R. Bieler, Choong-Un Kim, Hongtao Ma.** Fundamentals of Lead-Free Solder Interconnect Technology. [En ligne] 2015. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-9266-5>.