

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المركز الجامعي بلحاج بوشعيب  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en :

**Domaine** : Technologie

**Filière** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Construction Mécanique

Thème

UTILISATION DE LA METHODE D'Homogénéisations POUR  
UNE ANALYSE NUMIRIQUE REPONSE  
THERMOMECHANIQUE D'UN EMPILEMENT DE COUCHE  
MINCES

Présenté Par :

AMMAR Manel elsabirine

Devant les jurys composés de :

BAHRAME

Docteur C.U.B.B (Ain Temouchent)

Président

BELHENINI Soufyane

Docteur C.U.B.B (Ain Temouchent)

Encadrant

BLOUFA Amine

Docteur C.U.B.B (Ain Temouchent)

Examineur

Année universitaire 2019/2020



**Formulaire de déclaration sur l'honneur  
Relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité  
scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche**

(Annexe de l'arrêté n°933 du 28 juillet 2016 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat)

Je soussigne, l'étudiant (e),

A.M.M.A.R. Manel El Salimine

Détenteur d'une carte d'étudiant N° 3024-T-17 ..... délivrée le 15-01-2018

Inscrit à l'institut de Technologie au niveau du département Géométrie Mécanique

Et chargé de préparer un mémoire de fin d'étude en Master 2.

Intitulé : Utilisation de la Méthode D'Homogénéisation  
Pour une analyse numérique réponse Thermomécanique  
d'un empilement De Couche minces

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscité.

À Aim El Kiral, le 21-08-2020

Signature de l'étudiant :

# REMERCIEMENT

*Tout d'abord nous remercions le dieu de nous avoir aidés à finir ma mémoire en pleine santé et sans difficulté.*

*Mes plus sincères remerciement vont à mes chers parents et à mes chers frères et sœur : BILAL, THAMEUR, INTISSAR, RAOUNEK et MARAM qui ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études, ainsi que pour leur patience, leur aide et leur soutien tout au long de ces années d'études.*

*Je tiens à remercier sincèrement Monsieur BELHENINI SOFIANE, non seulement pour avoir accepté de m'encadrer et ainsi me faire profiter de ses connaissances, mais aussi pour sa patience et pour la totale confiance qu'il m'a accordée.*

*Je tiens à remercier sincèrement Monsieur ELFATMI IMAD de me faire profiter de ses connaissances, et aussi pour sa patience.*

*Je tiens à remercier Monsieur le président et les membres du jury, d'avoir bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous les amis de la promo 2019/2020 construction mécanique, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. et aussi à mes camarade du travail surtout SIDI AISSA IKRAME.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents :*

*Ma mère et mon père*

*Que dieu l'accueille en son vaste paradis*

*inchallah*

*Mes frères et sœurs*

*Aux mes amis qui me soutiennent de  
tous ces temps.*



# Résumé

Parmi les problèmes rencontrés dans les assemblages de composants microélectroniques nous pouvons citer les contraintes résiduelles d'origine thermique qui sont le résultat de la différence des coefficients de dilatation thermique (CTE) des matériaux utilisés.

Les contraintes résiduelles provoquent une défaillance dans les zones en contact.

Le présent travail comporte une approche numérique visant à estimer le niveau et la répartition des contraintes résiduelles dans un microcomposant électronique. La structure complexe du microcomposant étudié nous a obligé d'utiliser la méthode d'homogénéisation afin de réduire les coûts des calculs. Nous avons étudié l'impact de la réduction de l'épaisseur de la brasur sur le niveau et la répartition des contraintes résiduelles.

## المخلص

من بين المشاكل التي نواجهها في تجميعات المكونات الإلكترونية الدقيقة يمكننا الاستشهاد بالضغوط المتبقية من الأصل الحراري والتي تنتج عن الاختلاف في معاملات التمدد الحراري (CTE) للمواد المستخدمة.

تسبب الضغوط المتبقية فشلاً في مناطق التلامس.

يتضمن العمل الحالي نهجاً عددياً يهدف إلى تقدير مستوى وتوزيع الضغوط المتبقية في أحد المكونات الإلكترونية الدقيقة. أجبرنا الهيكل المعقد للمكون الدقيق المدروس على استخدام طريقة التجانس من أجل تقليل تكاليف الحسابات. لقد درسنا تأثير تقليل سماكة اللحام على مستوى وتوزيع الضغوط المتبقية..

## Abstract

Among the problems encountered in assemblies of microelectronic components we can cite the residual stresses of thermal origin which are the result of the difference in the coefficients of thermal expansion (CTE) of the materials used.

Residual stresses cause failure in the contact areas.

The present work includes a numerical approach aiming to estimate the level and the distribution of residual stresses in an electronic microcomponent. The complex structure of the studied microcomponent forced us to use the homogenization method in order to reduce the costs of the calculations. We have studied the impact of reducing the thickness of the solder on the level and distribution of residual stresses.

# Tables des matières

REMERCIEMENT.....	
Dédicace.....	
RESUME.....	5
Table des matières .....	6
Liste des tableaux .....	9
Liste des figures .....	10
Introduction générale.....	12
<b>Chapitre 1 : Recherches Bibliographiques sur La Fabrication Des Microcomposants Electroniques.....</b>	<b>13</b>
I. Histoire de l'électronique et de ses composants .....	14
I-1-Histoire de l'électronique :.....	14
I.2 Les microcomposants électroniques :.....	14
I.3. Les matériaux utilisés dans la fabrication des microcomposants sont :.....	16
II. Procèdes de fabrication des microcomposants électroniques.....	16
II -1-Le site de production.....	17
II -2-A- Etapes de fabrication d'un microcomposant électronique (puce).....	17
A- 1 .Etapes de diffusion .....	17
A-2. Dépôts de passivation .....	18
A-3. Dépôts de métallisations.....	19
A-4 Etapes de finition.....	20
III. Les plaquettes de silicium.....	21
I. Silicium.....	21
II. LES WAFERS.....	22
IV. Les couches minces déposées sur les substrats en silicium.....	22
1-Création du wafer.....	23
2-Création des masques.....	24
3-L'épitaxie.....	24
4-Oxydation et exposition.....	25
5-La photolithographie.....	25
6- Gravure.....	25
7-Excavation et dépouillage.....	26
8-Implantation ionique.....	26
9-Le dépôt.....	27
10-L'oxydation.....	27
11-Interconnexions sur une couche .....	27
12-Polissage mécanique et chimique.....	28
13-Interconnexions enter couches.....	28
V. Assemblage des microcomposants électroniques sur circuits imprimés .....	28
V.1 Les principaux types de microcomposants électroniques.....	28
V-2 Les principaux types d'assemblage.....	29

V.	2-1- Assemblage du composant "classique" avec connexions à piquer.....	29
V.	2-2- Assemblage du microcomposant à monter en surface CMS.....	29
V.	2-3-les puces retournée (Flip-chip).....	31
VI.	Les contraintes résiduelles dans les composants électroniques et leurs impacts sur la qualité et la fiabilité.....	33
VI.	1. Les effets thermomécaniques de la dilatation.....	34
VI.	2. Comportement thermomécanique des brasures.....	34
VI.	2-1 Formation des micros structure.....	34
VI.	2-2 Mode de sollicitation.....	34
VI.	2-3 Les sollicitations du joint brasé.....	35
VI.	2-4 Comportement sous charge.....	36
VI.	2-5 Endommagement.....	37
VI.	2-6Les défaillances des assemblages.....	38
VI.	2.6.1. Les défaillances intrinsèques.....	38
VI.	2.6.2 Les défaillances extrinsèques.....	38
	<b>Chapitre 2 : contraintes résiduelles dans les composants électroniques.....</b>	<b>40</b>
I.	Origine des contraintes résiduelles dans les empilements de couches minces sur un substrat en silicium.....	41
I.1	Définitions.....	41
I.	1.1.Contraintes de 3ème ordre.....	42
I.	1.2. Contraintes de 2ème ordre.....	42
I.	1.3 .Contraintes de 1er ordre.....	42
I.2	Origines des contraintes résiduelles.....	42
I.2.1	Les contraintes résiduelles.....	43
II.	Conséquence des contraintes résiduelle.....	43
III.	Techniques expérimentales de mesure des contraintes résiduelles.....	44
III.	1-Etude de la propagation des ondes acoustiques.....	44
III.	2-Méthode magnétique (effet magnétique Barkhausen).....	45
III.	3-Technique de diffraction des rayons-X et des neutrons.....	45
III.	4-Méthode du trou incrémental.....	46
III.	5-Méthode de la flèche.....	46
IV.	Approches numériques visant à estimer les contraintes résiduelles.....	47
V.	Difficultés rencontrées dans l'estimation numérique des contraintes résiduelles dans les microcomposants électroniques (grande nombre de motifs).....	48
VI.	Hypothèse simplificatrices dans les simulations (négligence des motifs).....	48
VII.	Utilisation de l'homogénéisation pour estimer numériquement les contraintes résiduelles.....	49
VIII.	Proposition d'une technique d'homogénéisation pour notre étude.....	51
1.	Règle des mélanges.....	51
	<b>CHABITRE 3 : Analyse Numérique Des Contraintes Résiduelles Dans Des Plaquettes De Silicium Avec Motifs Et Homogénéisées.....</b>	<b>54</b>
I.	la simulation numérique par éléments finis dans le domaine de la microélectronique...55	
I.	-1La méthode des éléments finis.....	55
II.	Présentation des modèles numérique.....	57

II.	-1- Modèles Géométriques.....	57
II.	-2-Matériaux.....	59
II.	-3-Maillage.....	59
II.	-4- Condition Aux Limites Et Chargement.....	60
II.	.4.1. Condition Aux Limites.....	60
II.	.4.2. Condition de Chargement.....	60
II.	-5-Contact.....	61
II.	-6-Etude De Sensibilité Au Maillage.....	61
III.	Homogénéisation de notre structure.....	62
	<b>Chapitre 4 : Résultats et discussions.....</b>	<b>66</b>
I.	Effets de l'épaisseur de la couche SAC sur les contraintes résiduelles.....	67
II.	Effets de l'épaisseur de la couche SAC sur les déformations plastique.....	70
III.	Conclusion.....	72
	<b>Conclusion général.....</b>	<b>73</b>
	<b>Référence.....</b>	<b>74</b>

# Liste des tableaux

Tableau I. 1: Evolution pour une génération. [2].	p32
Tableaux III.1 : Pièces constituant notre structure.	p56
Tableaux III.2 : Les propriétés mécaniques utilisées dans l'Abaqus.	p56
Tableaux III.3 : Résultats de la simulation.	p60
Tableau III.4 : Comparaison des contraintes de Von mises homogénéisé et non homogénéisé des 3 éléments (Si, Cu, SAC).	p60
Tableaux III.5 : les différentes propriétés mécaniques.	p62

# Liste des figures

Figure I. 1: Evolution de taille et de capacité d'un circuit intégré de l'année 1965 à 2000 (12 générations). [2].....	p08
Figure I. 2: L'ordre des MEMS. [2].....	p09
Figure I. 3: Illustration schématique de processus de micro-usinage de surface Thelma. [2].....	p09
Figure I. 4: La salle blanche. [3].....	p11
Figure I.5 : Principales étapes de diffusion. [3].....	p12
Figure I. 6: Principe de dépôt par pulvérisation. [3].....	p13
Figure I. 7 : Schéma d'une interconnexion pour un IPD et position de l'UBM. [3].....	p14
Figure I. 8: Principe de relaxation des contraintes par voie chimique. [3].....	p15
Figure I. 9 : plaquettes de silicium. [4].....	p16
Figure I. 10 : échantillon d'silicium. [4].....	p17
Figure I. 11 : un bain de silicium. [4].....	p17
Figure I. 12 : silicium. [4].....	p17
Figure I. 13 : technique de L'épitaxie. [4].....	p18
Figure I. 14: Création d'une couche d'oxyde de silicium. Dépôt d'un vernis photosensible. [4].....	p19
Figure I. 15 : Technique de photolithographie. [4].....	p19
Figure I. 16 : type de gravure. [4].....	p19
Figure I. 17 : l'excavation et dépouillage. [4].....	p20
Figure I. 18 : IMPLANTATION IONIQUE. [4].....	p21
Figure I. 19 : Le dépôt. [4].....	p21
Figure I. 20 : L'oxydation. [4].....	p21
Figure I. 21 : Interconnexions. [4].....	p22
Figure I. 22 : INTERCONNECTIONS. [4].....	p22
Figure I. 23 : composants électroniques à piquer. [5].....	p23
Figure I. 24 : microcomposants électronique à piquer. [5].....	p23
Figure I. 25 : puce électronique et deux condensateurs montés en surfaces sur un PCB. [5].....	p24
Figure I. 26 : constitution des boîtiers plastiques à broches en « J ». [5].....	p24
Figure I. 27 : constitution des boîtiers plastiques à broches en « L ». [5].....	p24
Figure I. 28 : le circuit intégré d'une puce Intel 8742. [5].....	p25
Figure I. 29 : Montage Flip chip. [6].....	p25
Figure I. 30: Exemples de différents montages. [6].....	p26
Figure I. 31: assemblage des microcomposants électronique sous chargement thermique. [5].....	p27
Figure I. 32 : Structure bilame se déformant sous l'augmentation de la température. [5].....	p28
Figure I. 33 : comportement de la crème à braser (SnPb) dans un four de refusions. [6].....	p28
Figure I. 34 : diagramme de phase de l'alliage Plomb-étain. [7].....	p29
Figure I. 35 : microstructure de l'alliage étain plomb [6].....	p29

Figure I. 36 : structure trillâmes représentant les interfaces d'un joint brasé. [5].....	p30
Figure I. 37 : allure du graphe contrainte-déformation de la brasure en fonction de la température [8].....	p30
Figure I. 38 : hystérésis du graphe contrainte-déformation avec prise en compte de l'élastoplasticité. [8].....	p31
Figure I. 39 : endommagement et fissuration du joint brasé [9].....	p31
Figure I. 40 : courbe du taux de défaillance (courbe en baignoire) [10].....	p32
Figure I. 41 : résultats d'analyses des défaillances [6].....	p33
Figure II.1 : schéma de la mise en compression des couches superficielles [12].....	p34
Figure II.2 : schéma descriptif des contraintes résiduelles apparaissant à l'interface dans des couches minces [12].....	p36
Figure II.3: Structure bilame se déformant sous l'augmentation de la température [12].....	p37
Figure II.4: photographie du dispositif de mesure des contraintes résiduelles sans les dépôts, méthode du trou incrémental. UTT-LASMIS. [14].....	p39
Figure II.5: Courbe représentative de l'évolution de la flèche d'un substrat AISI 304L pendant une projection plasma (BARADEL, 1999). [14].....	p39
Figure II.6 : Allure du champ de contraintes de Von Mises. Chaque teinte de gris correspond à une valeur. [15].....	p41
Figure II.7: organigramme de la technique d'homogénéisation.....	p43
Figure II.8: RVE chargé dans le sens 1. [18].....	p44
Figure III.1 : Représentation schématique du microcomposant simulé.....	p49
Figure III.2 : Maillage de la microstructure.....	p 52
Figure III.3 : Représentation des chargements.....	p52
Figure III.4 : Evolution de la température en fonction du temps durant la phase de refroidissement.....	p53
Figure III.5 : le contact parfait utilisé dans les simulations.....	p53
Figure III.6 : maillage pour model non homogénéiser et homogénéiser.....	p54
Figure III.7 : le model équivalent (Si/USG/AlCu).....	p55
Figure III.8 : Comparaison des Déplacements des modèles homogénéisé et non homogénéisé.....	p56
Figure III.9 : Comparaison des déformations plastique da la brasure SAC obtenues par les modèles homogénéisé et non homogénéisé.....	p56
Figure IV.1 : Répartition des contraintes résiduelles dans les billes de brasures pour les 3 épaisseurs.....	p59
Figure IV.2 : Répartition des contraintes résiduelles dans Le Silicium pour les 3 épaisseurs.....	p60
Figure IV.3 : Répartition des contraintes résiduelles dans le cuivre pour les 3 épaisseurs... p61	p61
Figure IV.4: L'évolution de la contrainte de Voss mises en fonction de l'épaisseur.....	P62
Figure IV.5 : Répartition des déformations plastiques dans les brasures pour les trois épaisseurs.....	p
Figure IV.6: Comparaison des résultats des déformations plastiques pour les 3 model (effet de l'épaisseur100%, 20%, 40%) du matériau SAC.....	p63
Figure IV.7: Evolution de déplacement en fonction de l'épaisseur.....	p65

# ***INTRODUCTION GENERALE***

Les composants électroniques d'aujourd'hui prennent des places importantes dans diverses applications (la téléphone mobile, les équipements automobiles, les applications spatiales, les applications médicales... etc.). L'évolution des technologies a permis une miniaturisation importante dans ce domaine conduisant à des composants de plus en plus petits et légers.

Les assemblages de microcomposants électroniques sur les circuits imprimés se font à des températures élevées. L'opération d'assemblage se termine généralement pour une apparition de contraintes résiduelles d'origine thermiques qui sont le résultat de la différence des coefficients de dilatation thermique (CTE) des matériaux utilisés. L'évaluation du niveau et de la répartition de ces contraintes est primordiale pour s'assurer de la qualité et la fiabilité des microcomposants. Les techniques expérimentales utilisées pour mesurer les contraintes résiduelles dans les microcomposants sont onéreuses et nécessitent la fabrication préalable d'un nombre important de composants. La simulation numérique par éléments finis est présentée comme une solution alternative prometteuse visant à évaluer les contraintes résiduelles dans les microcomposants électronique.

Ce modeste travail présente une approche numérique visant à estimer les contraintes résiduelles dans un microcomposant composé d'un empilement de couches minces conductrices et diélectriques le tout déposé sur un substrat en silicium. La géométrie très complexe du microcomposant nous a poussés à utiliser la technique d'homogénéisation pour la rendre plus simple à modéliser.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer le comportement thermomécanique d'une puce sur un circuit imprimé normalisé. Pour cela nous avons développé et optimisé un modèle de simulation capable de reproduire au mieux le comportement en assemblage d'un microcomposant électronique. Nous avons ainsi repéré les zones de concentration de contraintes et de déformations plastiques qui présentent un risque de défaillance du microcomposant. Nous avons étudié l'influence de la géométrie et des matériaux de la brasure sur la réponse thermomécanique.

En plus de l'introduction générale et la conclusion générale, le travail présenté dans ce mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un résumé des recherches bibliographiques sur la fabrication des microcomposants électroniques.
- Le deuxième chapitre parle des contraintes résiduelles dans les composants électroniques.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse numérique des contraintes résiduelles dans le microcomposant réel et son équivalent homogénéisé.
- Les résultats obtenus sont discutés dans le quatrième chapitre.

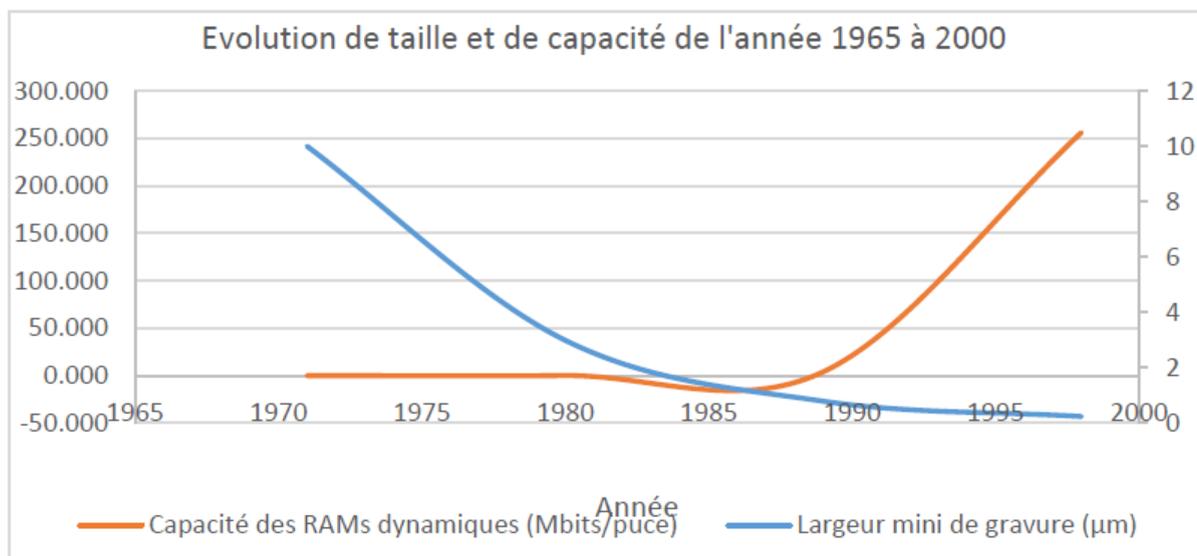
*Chapitre I :*  
*Recherches Bibliographiques sur La Fabrication Des*  
*Microcomposants Electroniques*

## I. Histoire de l'électronique et de ses composants :

### I-1-Histoire de l'électronique :

L'histoire de l'électronique n'a pourtant qu'un siècle : elle commence – de fait – en 1904 par l'invention du tube diode (Fleming). Ainsi, c'est à travers le portrait des inventeurs et la description de leurs inventions que le lecteur découvrira un siècle de technique où nos modes de vie ont été bousculés par la science. Les applications de l'électronique autant que les inventeurs sont en même temps si nombreux que les événements les plus importants ou les plus spectaculaires, les plus intéressants ou les plus étonnants. [1]

L'électronique est omniprésente. On ne connaît plus guère de domaine où elle ne se manifeste pas d'une façon ou d'une autre : du jouet à la conquête spatiale en passant par l'automobile, la radio, la télévision, le téléphone, la médecine, la robotique ou l'informatique. Parmi les noms et les notions bien connus, on retrouvera par exemple : Hertz, Branly, Marconi, Ducretet et Edison, le redresseur, l'amplificateur, le modulateur et l'oscillateur, les résistances et les condensateurs, le tube cathodique, la cellule photoélectrique, les écrans à cristaux liquides et les écrans à plasma, le transistor, les capteurs CCD, les formats PAL et SECAM, la TNT mais aussi les calculettes, la montre à quartz, les jeux vidéo, les téléphones mobiles, les caméscopes, le walkman et le PDA, le radar et le sonar, la bande magnétique et



les mémoires optiques, le four à micro-ondes et la carte à puce. [1]

Figure I .1: Evolution de taille et de capacité d'un circuit intégré de l'année 1965 à 2000 (12 générations). [2]

## I.2 Les microcomposants électroniques :

Les MEMS (Micro-électronique Mécanique Systèmes) ont été développés au début des années 1970. Le premier transistor MEMS a été fabriqué en 1967. A la fin des années 1990, les dispositifs MEMS étaient à un grand nombre de production dans le monde entier. La figure suivante montre l'ordre des MEMS. Les MEMS sont des dispositifs complexes, réalisés avec des technologies similaires à celles utilisées pour les circuits intégrés, dont les dimensions peuvent descendre jusqu'à quelques micromètres.[2]



Figure I .2: L'ordre des MEMS. [2]

Les problèmes mécaniques et la fiabilité mécanique sont extrêmement importants dans toutes les phases de conception de MEMS et dans le processus de fabrication. Il existe plusieurs modes de défaillance de dispositif microélectronique tels que la chute, l'érosion-corrosion, le choc mécanique et électrique, ou il irait se défaillir dans une importante température. Les études de comportement mécanique sur MEMS sont donc réservées à la fiabilité et pour assurer que le dispositif va fonctionner parfaitement dans des conditions normales et ainsi des situations extrêmes. La figure.5 montre le processus de fabrication d'un MEMS. [2]

La technologie de fabrication se ressemble à celle des circuits intégrés. Ici nous prenons des appareils fabriqués par STMicroelectronics avec le processus de micro-usinage de surface (thick epipoly layer for microactuators and accéléromètres). Le processus illustré par la figure I.3 nous présente succinctement comment un microsystème (microcomposant) est réalisé. ainsi que la possibilité qu'un concepteur pourrait rencontrer [2].

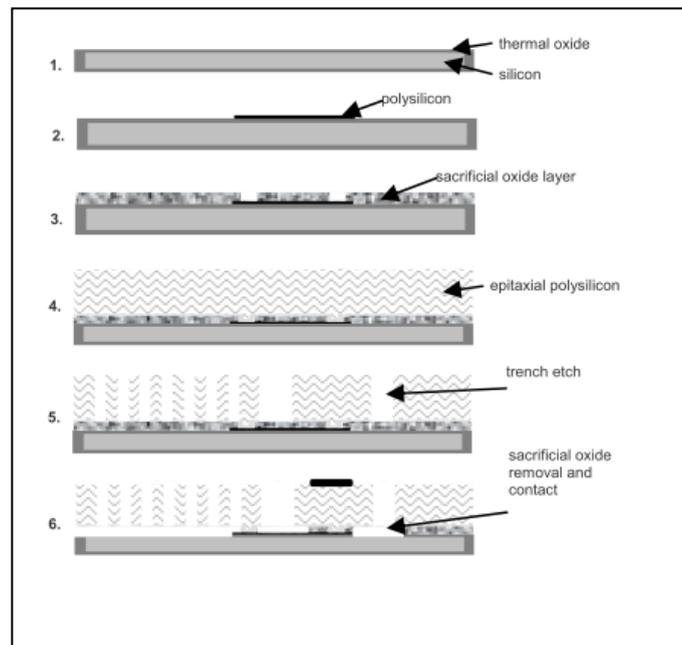


Figure I .3: Illustration schématique de processus de micro-usinage de surface Thelma. [2]

- 1) L'oxydation thermique du substrat.
- 2) Le dépôt et la structuration des interconnexions horizontales.
- 3) Le dépôt et la structuration d'une couche sacrificielle.
- 4) La croissance épit-axiale de la couche structurelle.
- 5) La structuration de couche structurelle par gravure tranchée.
- 6) L'enlèvement d'oxyde sacrificiel et le contact de dépôt de métallisation. [2]

### I.3. Les matériaux utilisés dans la fabrication des microcomposants sont :

#### a) Le Silicium:

Les éléments de MEMS sont réalisés sur silicium. Ce matériau est le plus utilisé pour les produits électroniques dans le monde moderne. Il est ainsi le matériau le plus attractif pour la production de MEMS grâce à ses avantages mécaniques et chimiques. Le silicium monocristallin est considéré comme un matériau de Hooke, c'est-à-dire il présente un bon comportement élastique, cela signifie qu'il y a peu d'énergie dissipative pendant la déformation et il affiche très peu de fatigue. Sa durée de vie peut atteindre à la gamme de milliards de cycles. [2]

#### b) Les Polymères:

Les polymères peuvent être produits en grandes quantités. Les microcomposants peuvent contenir des polymères fabriqués par certains procédés tels que le moulage par injection, le gaufrage ou la stéréolithographie. [2]

**c) Les Métaux :**

Les métaux sont aussi utilisés pour créer les éléments des microcomposants. Les métaux utilisés couramment incluent : l'or, le nickel, l'aluminium, le titane, l'argent etc. Ils peuvent être déposés par des procédés tels que le dépôt électrolytique, l'évaporation, le processus de pulvérisation cathodique. [2]

**d) Les Céramique :**

De plus en plus de céramiques sont utilisées dans la fabrication des microcomposants. Le tableau.1 montre schématiquement des différentes modes d'assemblages des composants microélectroniques. [2]

**II. Procèdes de fabrication des microcomposants électroniques :**

Aujourd'hui les Microcomposants sont incontournables. On les trouve dans le moindre équipement électronique. Il faut dire que ces concentrés de technologie permettent une réduction importante de l'encombrement, tout en apportant des fonctionnalités complexes et avec une mise en œuvre simplifiée. [3]

La fabrication des microcomposants repose sur un grand nombre de procédés qui permettent au final d'obtenir des composants élémentaires tels que les résistances, inductances, condensateurs, diodes et les transistors, ou encore les Circuits Intégrés qui ne sont en fait qu'un assemblage de ces composants élémentaires[3].

**II -1-Le site de production :**

Le site de production est une usine répondant à des impératifs stricts. A l'échelle d'une puce, un minuscule grain de poussière représente un rocher qui bouche les chemins creusés pour la circulation des électrons. C'est pourquoi l'air est filtré et entièrement renouvelé 10 fois par minute. 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 organiques et les poussières qu'ils génèrent naturellement (figure. 5). [3]

Toute fabrication s'effectuera dans une salle blanche, salle dont l'atmosphère est contrôlée en température et humidité et dont le nombre de particules de poussières doit être le plus faible possible. [3]

L'oxydation du substrat pendant son transport ou lors d'une attente, impose également un nettoyage fréquent des plaquettes de silicium. Ceci afin d'éliminer l'oxyde natif, mais aussi des impuretés qui aurait pu se déposer malgré la propreté des salles blanches. [3]



Figure I .4: La salle blanche. [3]

## II -1-A Etapes de fabrication d'un microcomposant électronique (puce):

Dans cette partie nous présentons les principales étapes qui permettent de donner à la puce ses fonctions électroniques (résistance, diode, etc.) puis celles qui assurent sa protection ainsi que les échanges avec l'extérieur. Les deux points sont essentiels car les étapes de diffusion ont clairement une influence sur la fiabilité mécanique. [3]

**A- 1 .Etapes de diffusion** : procédés de dépôts Les différents dépôts ont une influence notable sur la résistance mécanique des composants. De nombreux paramètres liés aux procédés interviennent. Pour cette raison cette partie développe les techniques utilisées pour déposer les couches métalliques ainsi que les couches isolantes et protectrices. [3]

**A-2. Dépôts de passivation** : Les oxydes et passivations (diélectriques) sont généralement déposés par des procédés de photogravure. Les variations dans le procédé peuvent être liées aux températures utilisées, à la finesse des motifs du masquage ainsi qu'au type de résine, certaines résines étant dédiées aux couches épaisses par exemple. [3]

Une représentation chronologique des étapes de dépôts est illustrée par la (figure I. 5 )

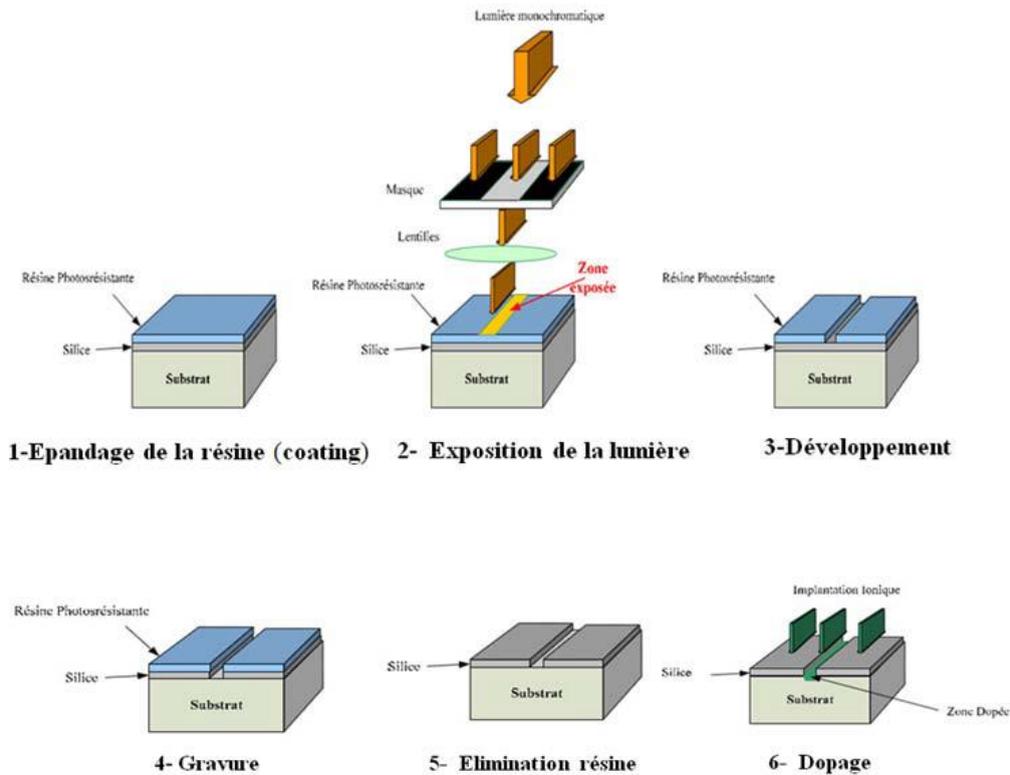


Figure I. 5 : Principales étapes de diffusion. [3]

On peut voir sur la (figure I. 5), la décomposition des étapes :

**a - Coating : Préparation du support de base** : substrat en silicium **Oxydation** : comme il est impossible d'oxyder partiellement une plaquette, celle-ci est oxydée ( $\text{SiO}_2$ ) sur toute sa surface, puis les zones non désirées sont retirées par un procédé de photogravure. Cette ouverture de zones dans l'oxyde permettra la diffusion (dopage) future des plaquettes. Dépôt de résine : la plaquette est recouverte d'un filin de résine photorésistante. [3]

**b - Insolation - Photolithographie** : on procède à l'alignement (manuel ou automatique) d'un masque sur la plaquette afin de cacher certaines parties de celles-ci. Seules les parties non masquées vont réagir aux rayons UV : la résine se polymérise. [3]

**c- Développement** : lorsqu'on utilise de la résine négative, seules les zones non exposées aux UV (c'est-à-dire masquées) seront dissoutes et éliminées au développement. Pour les résines positives, c'est l'inverse. [3]

**d- Gravure** : on fait une gravure (attaque par plasma) pour obtenir l'ouverture de l'oxyde qui permettra la diffusion dans les zones choisies. [3]

e- **Retrait de la résine** : à présent, la résine restante est devenue inutile, on l'élimine totalement. [3]

Après ces étapes, on obtient un silicium recouvert.

f - **Dopage** : Certains phénomènes sont propres aux dépôts organiques, en particulier on note un phénomène de polissage lors de l'empilement de plusieurs couches. Ceci est dommageable pour l'état de surface final mais aussi pour l'adhésion entre deux couches de ce diélectrique. [3]

### A-3. Dépôts de métallisations :

Les métallisations peuvent être déposées selon plusieurs méthodes, selon les vitesses de dépôt attendues ou selon leurs natures. Dans le cas d'une métallisation en aluminium ou aluminium-cuivre, il s'agit d'un dépôt de type PVD (pour Physical Vapor Déposition : dépôt physique en phase vapeur). Le dépôt physique en phase vapeur fait partie de la catégorie des dépôts sous vide, c'est un terme général qui décrit un ensemble de méthodes pour déposer des films minces par la condensation d'un matériau vaporisé sur diverses surfaces. La méthode de revêtement implique des processus purement physiques tels que l'évaporation à haute température sous vide ou le bombardement plasma plutôt que d'impliquer des réactions chimiques comme pour les revêtements CVD (Chemical Vapor Déposition : dépôt chimique en phase vapeur). Les différentes variantes de PVD incluent :

- Le dépôt par évaporation - Le dépôt par évaporation sous faisceau d'électrons - Le dépôt par pulvérisation - Le dépôt par arc cathodique. [3]

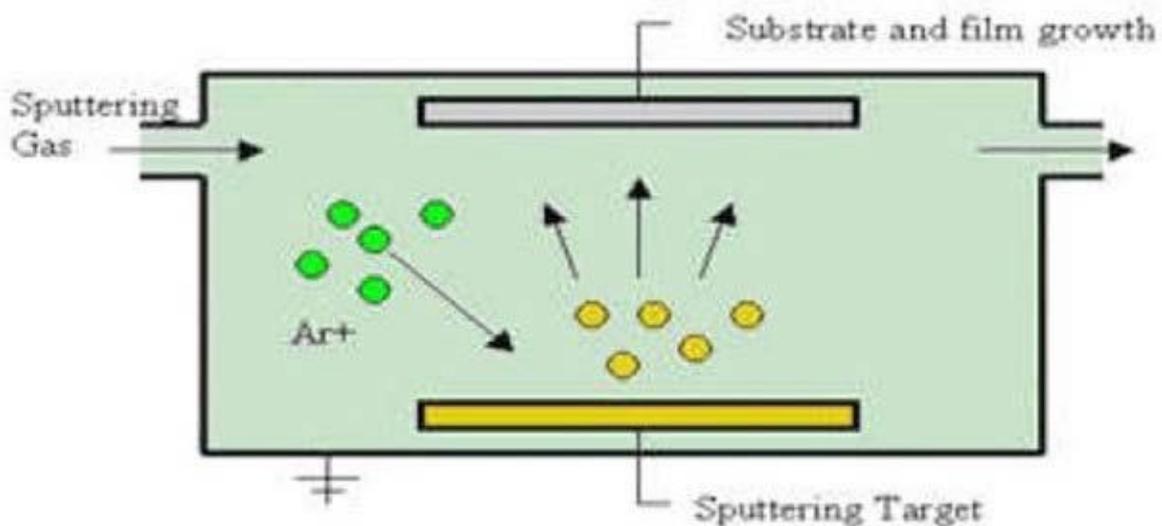


Figure I. 6: Principe de dépôt par pulvérisation. [3]

- Le dépôt par laser pulvérisé (3).

C'est une méthode spécifiquement utilisée pour le dépôt d'aluminium et la pulvérisation dont le principe est illustré sur la (figure. I. 6). Cela signifie que le revêtement est obtenu en éjectant un matériau d'une cible donc d'une source - qui se dépose ensuite sur un substrat tel que le silicium de la plaquette. Le gaz de pulvérisation est généralement un gaz inerte comme l'argon. De nombreux paramètres sont ajustables dans cette technique comme la nature du gaz utilisé, sa pression, la tension employée, le matériau de la cible, etc. Ceci en fait une technique complexe, mais qui permet aux experts beaucoup de liberté quant au contrôle de la croissance et de la microstructure du film. [3]

L'avantage de cette technique réside dans le fait que même les matériaux à très haut point de fusion peuvent être facilement déposés alors que cela serait presque impossible par d'autres méthodes. [3]

Il est intéressant de noter que les films déposés ainsi ont une composition proche de celle du matériau source, la différence est liée à la dispersion des éléments du fait de leurs différences de masses (les éléments légers sont plus facilement transportés par le gaz). Les films déposés par pulvérisation présentent généralement une meilleure adhésion que ceux déposés par évaporation. [3]

#### **A-4 Etapes de finition :**

Le Flip-Chip (microcomposant retourné) est particulier dans la mesure où les opérations de finition sont liées aux opérations de diffusion : elles sont souvent effectuées à la suite dans la même usine, comme une extension. Le procédé général de mise en boîtier se déroule en un certain nombre d'étapes qui sont détaillées par la suite :

- Procédé Front-End final: UBM Meulage arrière
- Relaxation des contraintes et Billage (soudure de billes)
- Marquage laser
- Découpe
- Inspection visuelle et test électrique
- Mise en bande et en cassette

Entre chacune des étapes pour lesquelles il y a retrait de silicium, la plaquette est régulièrement nettoyée à l'aide d'une eau de pureté élevée. Ce nettoyage permet d'éviter la contamination entre espèces chimiques. [3]

La couche nommée UBM - sur la (figure 1.7) constitue une couche d'adhésion entre le plot de la plaquette en Al et la Bille. Cette structure est en fait une superposition de couches métalliques dont chacune a un rôle précis. Le Ti favorise l'adhésion, le Ni est une barrière de diffusion, le Cu permet de saturer localement pour limiter la diffusion de Cu. [3]

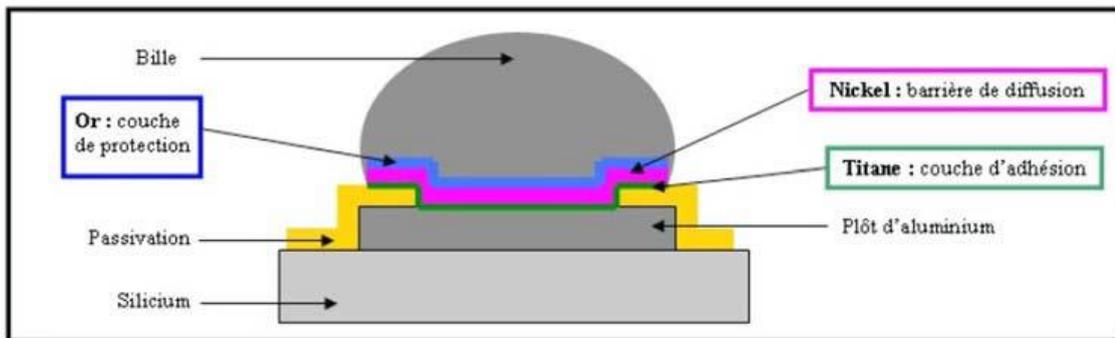


Figure I. 7 : Schéma d'une interconnexion pour un IPD et position de l'UBM. [3]

Le meulage arrière rectifie la face arrière du silicium (par opposition avec la face avant qui contiennent les fonctions électriques) et diminue l'épaisseur de celui-ci. D'un point de vue mécanique cette phase génère 3 phénomènes notables :

- Comme l'épaisseur de Si est plus faible, les contraintes liées aux différences de coefficients thermiques entre les couches déposées peuvent se relaxer et provoquent la courbure du wafer. On parle alors de warp ou de bow, selon l'orientation de la courbure. [3]
- Des microfissures et une forte rugosité sont générées en face arrière, ces microfissures génèrent aussi des concentrations de contraintes locales et donc participent à la courbure de la plaquette. [3]
- Enfin la plaquette est fixée sur un adhésif pour cette opération, le retrait de celui-ci peut également générer des contraintes et des déformations au niveau du silicium. Le retrait de l'adhésif peut relâcher des contraintes, mais ce n'est pas lui qui génère ces contraintes. La courbure de la plaquette et les fissures sont un sujet important tant du côté de la diffusion que de la finition car plus le diamètre de la plaquette est important plus ce phénomène est amplifié.[3]
- La relaxation des contraintes peut s'obtenir par voie chimique, mais elle est aussi faisable par voie mécanique. Des solutions acides attaquent le silicium pour diminuer la zone concernée par les fissurations de meulage. [3]

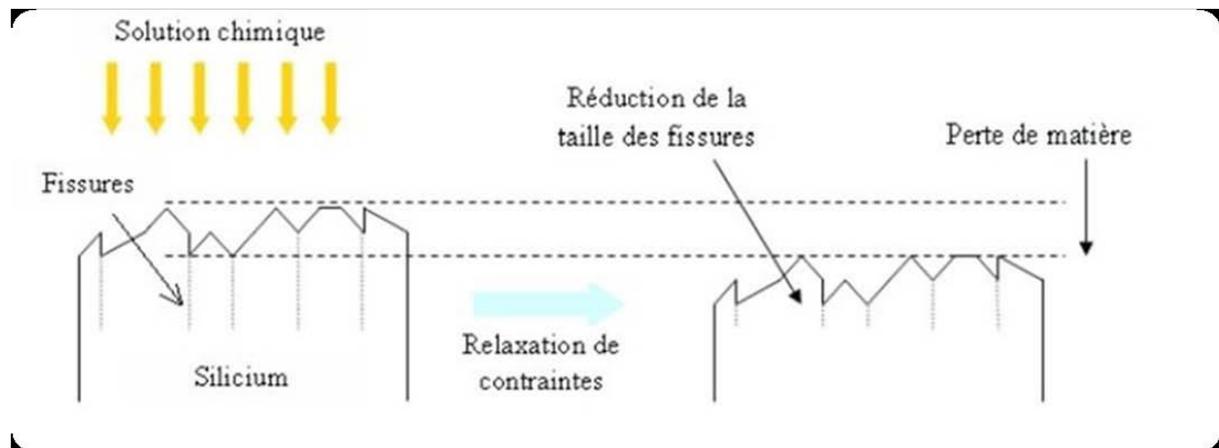


Figure I. 8: Principe de relaxation des contraintes par voie chimique. [3]

## I. Les plaquettes de silicium :

Le silicium possède certaines propriétés qui découlent ensuite sur les plaquettes de silicium « Wafers de silicium ». [4]

### 1. silicium :

Les propriétés du silicium ont permis la création d'une deuxième génération de transistors, puis les circuits intégrés. C'est aujourd'hui, l'un des éléments de base de l'électronique, car sa capacité technologique permet d'obtenir du silicium pur à plus de 99,99999 % et donc avoir des composants possédant de meilleures performances. L'extraction Silicium pur se fait à partir d'un oxyde de silicium ou appelé sable quartzéux. On le chauffe à 1700°C pour obtenir un silicium pur (96%-99%)( $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$ ). Ensuite, on le dissout dans de l'acide chlorhydrique et on le purifie par distillations. On obtient alors du trichlorosilane (ou dusilicochloroforme) ( $2\text{HSiCl}_3 \rightarrow \text{Si} + 2\text{HCl} + \text{SiCl}_4$ ). Et enfin on réduit l'échantillon à l'aide d'hydrogène afin d'obtenir des barres de silicium. Ces étapes permettent d'obtenir des barres de silicium pur. [4]

Ces barres seront alors l'élément de base des « Wafers » dont les propriétés générales vont vous être présentées dans le paragraphe suivant.

### 2. LES WAFERS :

Les « Wafers » sont de différents types. La taille, le coût, le nombre de gravure et l'épaisseur déterminent les caractéristiques des « Wafers de silicium ». Ils peuvent être de différentes tailles depuis 1 pouce (25,4 mm) jusqu'à 300 mm pour une épaisseur de l'ordre de 0,7 mm. La tendance est d'en utiliser des plus grands possibles afin de pouvoir graver davantage de puces simultanément. On limite ainsi les pertes sur le bord de plaque d'où une production plus importante avec un moindre coût. De plus, ils contiennent traditionnellement un méplat, dans le cercle sur le côté, qui indique l'orientation des plans cristallins. Mais plus

récemment, les « Wafers » utilisent une simple encoche pour indiquer cette orientation. Cette orientation a une importance car les cristaux ont des propriétés structurelles et électroniques très dépendantes de la direction. [4]

En fin de compte, on imprime les circuits intégrés, les transistors et les semi-conducteurs de puissance en quadrillage très serré afin d'en mettre le plus possible sur un seul « Wafer ». Les circuits sont généralement identiques sur un même « Wafer ». Il est tout de même possible à l'aide de différentes techniques de placer des circuits différents sur un même composant.

Par la suite de cette présentation, nous allons vous présenter les « Wafers de silicium » et surtout les étapes de fabrication de ce dernier. Et enfin, les évolutions qui sont en cours dans ce domaine technologique. [4]

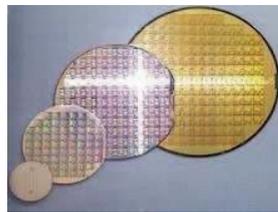


Figure I. 9 : plaquettes de silicium. [4]

### III. Les couches minces déposées sur les substrats en silicium :

Pour réaliser un « Wafer de silicium », il faut respecter des règles très précises. La fragilité et le prix élevé du silicium monocristallin, entraîne une préparation des « Wafers » chronologique afin d'éviter toute contrainte pouvant les déformer ou les briser. Par ailleurs, leurs surfaces doivent être aussi parfaites que possible. Et de plus le traitement des éléments composant le « Wafer de silicium » ne doit pas « polluer » le monocristal.

Il est alors nécessaire de respecter l'ordre chronologique suivant pour tout d'abord la création des supports dans les étapes 1 et 2. Ensuite les étapes de 3 à 13 sont les détails de la création des composants du « Wafer ». [4]

#### 1-Création du wafer :

Pour créer un « Wafer », il faut partir d'une graine cristal de silicium. Elle est le plus souvent créée artificiellement par une technique d'agglomération à haute température et mesure entre 1mm et 3mm. [4]

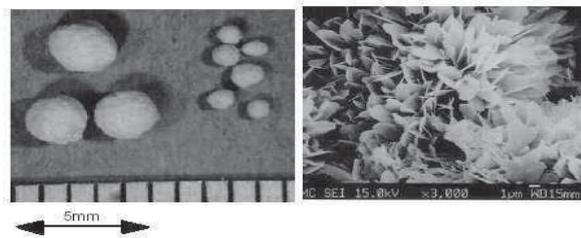


Figure I. 10 : échantillon d'silicium. [4]

A gauche un échantillon de graines cristal et à droite une vue au microscope de leur structure cristalline.

On plonge cette graine dans un bain de silicium liquide grâce à une tige et après que l'équilibre thermique soit atteint la cristallisation commence. La tige tourne dans le sens inverse. On tire lentement la graine vers le haut, on obtient alors une barre de silicium. La croissance cristalline est uniforme car la tige est parfaitement circulaire. La structure devient alors monocristalline, il s'agit donc d'un gros morceau de silicium qui n'est qu'un seul et unique cristal. [4]

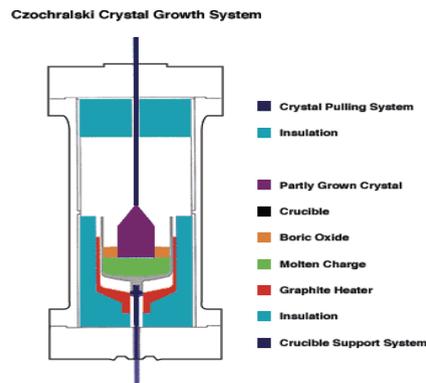


Figure I. 11 : un bain de silicium. [4]

Ce processus peut durer jusqu'à 24 heures et le diamètre du cylindre obtenu sera supérieur au diamètre nécessaire. Il sera donc nécessaire de le rectifier et le découper en tranches. On le découpe suivant le diamètre avec 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur au moyen d'une scie circulaire diamantée de grande précision. Ensuite, on effectue un rodage mécanique puis chimique qui a pour but d'éliminer les irrégularités de surface provoquées par les grains de poudre de diamant et les irrégularités sur la couche superficielle. Et pour terminer, le « Wafers » sont rincées soigneusement et séchées. [4]



Figure I. 12 : silicium. [4]

## 2-Création des masques :

Un masque de chaque couche correspond à un négatif photographique, il est obtenu en taillant au laser une couche de chrome, déposé sur une plaque de quartz extrêmement pur. Chaque couche correspond à un schéma électronique qu'une machine interprète, convertit et reproduit. On remarque aussi que le Nombre de couches (24 au maximum) peut être important suivant la complexité du circuit. [4]

## 3-L'épitaxie :

L'épitaxie consiste à faire croître du cristal sur du cristal (le silicium dans notre cas). La technique consiste à utiliser le substrat obtenu dans l'étape précédente comme germe cristallin de croissance. On l'utilise pour faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche. Le jet moléculaire est la technique utilisée pour les « Wafers ». Elle consiste à envoyer des ions à la surface d'un substrat dans un vide très poussé. Le principe est l'évaporation sous vide par chauffage, qui permet le contrôle des cellules d'évaporation. On obtient une épi-couche extrêmement pure, d'approximativement 3% de l'épaisseur initiale, de meilleures qualités que le silicium constituant le « Wafer ». [4]

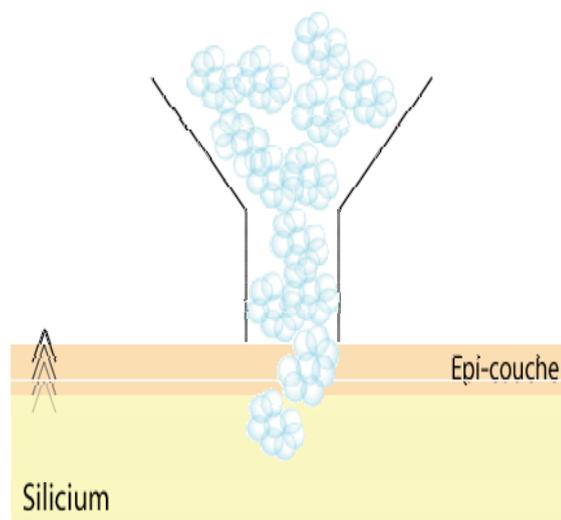


Figure I. 13 : technique de L'épitaxie. [4]

#### 4-Oxydation et exposition :

Cette étape a pour but de créer la base des microcomposants, elle n'est pas utile pour les autres composants. L'épi-couche est chauffée pour développer une couche d'oxyde de silicium. On dépose alors un vernis photosensible sur l'oxyde pour une meilleure résistance. [4]

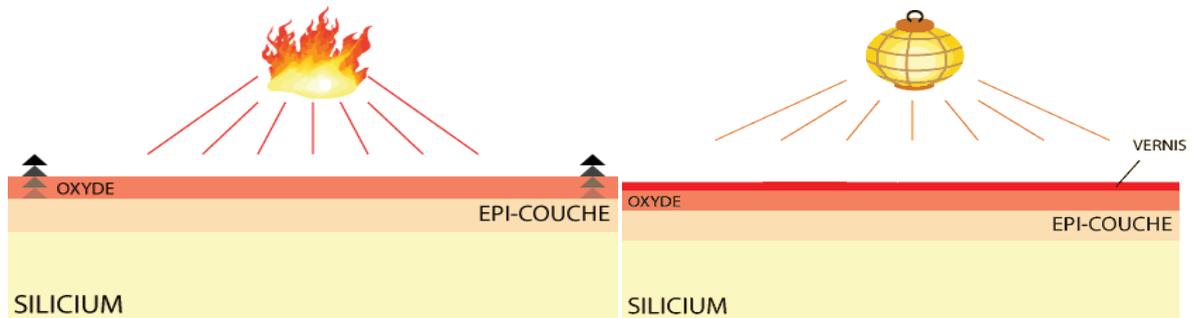


Figure I. 14: Création d'une couche d'oxyde de silicium. Dépôt d'un vernis photosensible. [4]

#### 5-La photolithographie :

La photolithographie est une technique permettant de projeter à l'aide d'une source lumineuse, une image au travers d'un certain nombre d'objectifs sur un support photosensible afin de l'y imprimer. Le motif à transférer est précisément dessiné par un faisceau d'électron sur un masque. On applique des UV. La zone opaque est ainsi projetée sur le substrat. Il est placé dans un révélateur, une fenêtre est ainsi générée par cette technique. [4]

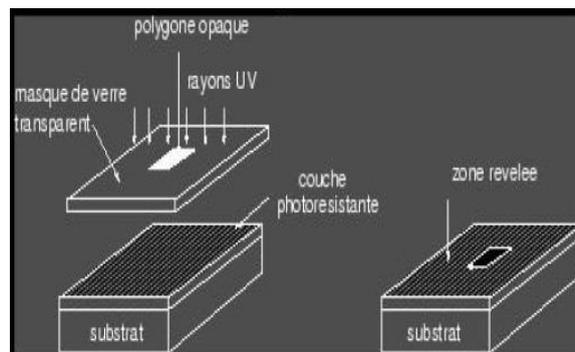


Figure I. 15 : Technique de photolithographie. [4]

## 6- Gravure :

Cette étape suit la photolithographie, car elle permet de stabiliser l'étape précédente. Il en existe 2 sortes: la gravure humide et la gravure sèche. Et ces 2 types de gravure peuvent avoir un caractère, soit isotrope, soit anisotrope. [4]

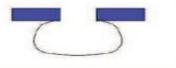
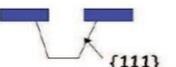
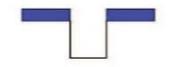
	Gravure humide	Gravure sèche
Isotrope		
Anisotrope		

Figure I. 16 : type de gravure. [4]

## 7-Excavation et dépouillage :

L'excavation au plasma (quatrième état de la matière autre que solide, liquide et gaz) est une technique de creusage des zones qui ont été touchées par la photolithographie. On forme le plasma lorsqu'on chauffe un gaz. Si on applique un champ électrique à ce gaz et s'il contient certains éléments chimiquement réactifs, comme le fluor ou le chlore, le plasma libère des ions qui peuvent décomposer des matériaux très rapidement. Il fournit aux produits chimiques une charge électrique, qui les dirige verticalement vers le wafer. Ceci permet la réalisation de profils verticaux quasiment parfaits. Les zones d'oxyde de silicium recouvertes par le vernis ne sont pas modifiées donc le profil de la couche d'oxyde devient ainsi identique à celle du vernis restant. [4]

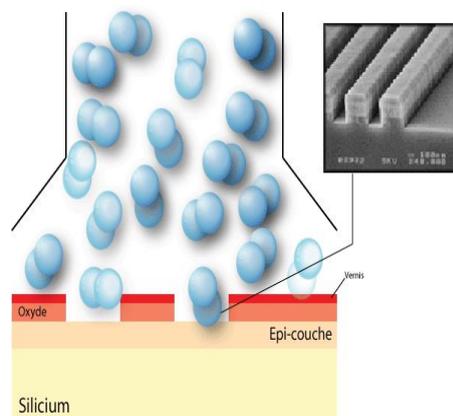


Figure I. 17 : l'excavation et dépouillage. [4]

## 8-Implantation ionique :

Une implantation ionique a pour objectif de charger électriquement les zones de silicium mises à nu par la phase d'excavation. On l'appelle plus couramment dopage et consiste à implanter verticalement les molécules sur la surface du silicium par un faisceau d'ions de haute intensité. Les ions pénètrent le silicium verticalement et sans aucune diffusion latérale. Les espaces libres sont chargés en ions, créant ainsi l'émetteur et le collecteur dans le cas d'un transistor. [4]

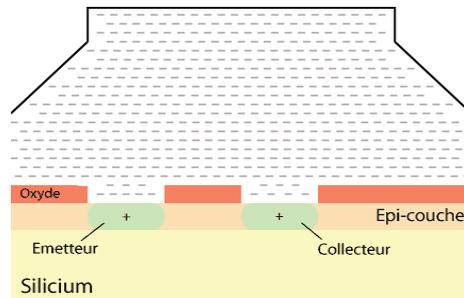


Figure I. 18 : IMPLANTATION IONIQUE. [4]

## 9-Le dépôt :

Le dépôt est une couche conductrice déposée dans les zones excavées d'oxyde silicium. Cette couche conductrice faite de polysilicium est séparée de la base du wafer par une fine couche de nitrure de silicium. On peut la déposer par C.V.D (Chemical Vapor Déposition, déposition chimique en phase vapeur), la matière est pulvérisée sous forme gazeuse aux alentours de 1000°C. Mais aussi par L.P.C.V.D (low pressure C.V.D, basse pression C.V.D) ou par L.T.O (low temperature oxydation, basse température oxydation). Cette fine couche doit pouvoir laisser passer le champ magnétique créé par une impulsion. Ce champ créera un canal conducteur entre l'émetteur et le collecteur laissant ainsi le courant passer. [4]

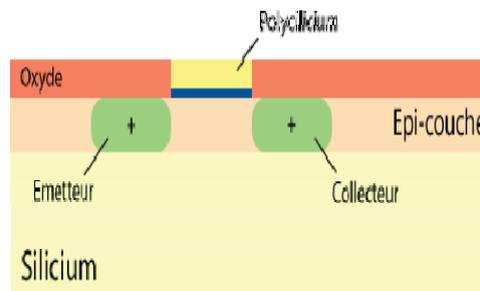


Figure I. 19 : Le dépôt. [4]

### 10-L'oxydation :

Afin d'isoler les transistors les uns des autres, il faut développer l'oxyde de silicium. Une couche d'oxyde diélectrique d'isolation est ensuite déposée afin d'isoler les couches de connections et pour pouvoir réaliser les interconnexions. [4]

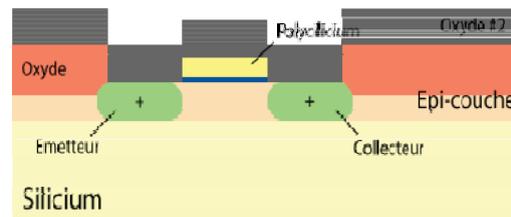


Figure I. 20 : L'oxydation. [4]

### 11-Interconnexions sur une couche :

On veut créer les bornes des transistors de la même couche. Tout d'abord la couche d'oxyde diélectrique est "taillée" de la même façon que l'oxyde de silicium initiale, avec des masques différents. Ensuite, on dépose une couche d'aluminium sur la couche d'oxyde diélectrique et dans les Vias. Par la suite, on vernit l'aluminium et on réutilise le processus de photolithographie pour de supprimer les zones où l'aluminium inutile. Pour finir, une couche d'oxyde est déposée pour isoler cette couche de composant des couches suivantes. [4]

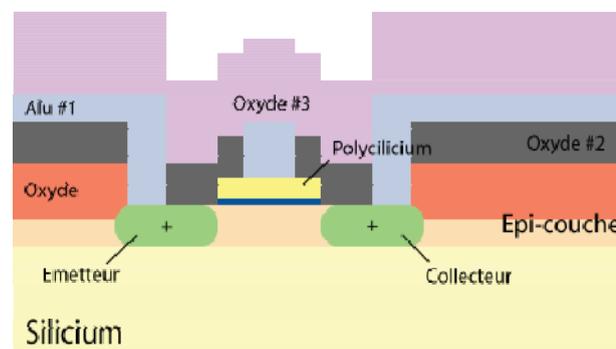


Figure I. 21 : Interconnexions. [4]

### 12-Polissage mécanique et chimique :

Pour avoir une surface parfaitement plane, il faut polir le « Wafer ». On utilise alors Chemical Mechanical Planarization (polissage mécanique et chimique). On applique donc le « Wafer » sur des disques rotatifs afin de diminuer la surface, on accompagne cette opération d'eau pour protéger le « Wafer ». Après le polissage, la surface de l'isolant est parfaitement plane et peut accueillir une autre couche de connexion en Aluminium. [4]

### 13-Interconnexions entre les couches :

Pour réaliser les interconnexions entre les couches, la couche d'oxyde est vernie, puis photolithographiée et excavée. Cela crée des trous qui seront remplis de tungstène ou de

titane-tungstène. Une nouvelle couche d'aluminium est ensuite déposée, vernie puis excavée et ainsi de suite suivant le nombre de couches d'interconnexions nécessaire au « Wafer ». [4]

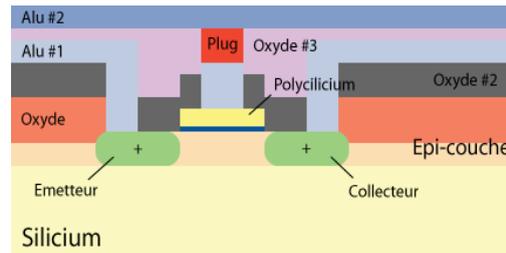


Figure I. 22 : INTERCONNECTIONS. [4]

#### IV. Assemblage des microcomposants électroniques sur circuits imprimés

##### IV.1 Les principaux types de microcomposants électroniques

Il existe trois types de microcomposants électroniques :

- Le composant classique possédant des connexions à piquer à travers un circuit imprimé.
- Le composant dont les connexions sont posées à plat sur des plages de brasage (appelées "plage d'accueil" ou "pads"). Ces composants sont appelés CMS (Composant à Monter en Surface).
- Les puces retournées (Flip chip). [5]

##### IV-2 Les principaux types d'assemblage

Les techniques d'assemblage des microcomposants électroniques dépendent en partie du type de boîtier utilisé.

##### 2.1 .Assemblage du composant "classique" avec connexions à piquer :

Le composant est inséré dans des trous généralement métallisés réalisés dans le circuit imprimé. La soudure est alors effectuée au fer à souder ou par passage sur une vague en fusion qui réalise l'ensemble des connexions. Les figures I. 23 et I. 24 montrent les principaux composants et microcomposants électroniques à piquer. [5]

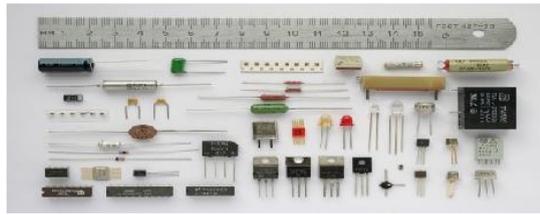


Figure I. 23 : composants électroniques à piquer. [5]



Figure I. 24 : microcomposants électronique à piquer. [5]

## 2.2 Assemblage du microcomposant à monter en surface CMS :

L'intégration de plus en plus poussée dans la production électronique a conduit au développement de nouveaux procédés de fabrication. L'électronique s'est ainsi orientée vers la technologie CMS (figure I. 25), implantée aujourd'hui à plus de 60 % dans la production électronique [5].

Cette technique de montage, développée dans les années 70, s'est depuis propagée dans toute les industries de l'électronique (informatique, médical, aviation, télécommunications, etc.....) [5].



Figure I. 25 : puce électronique et deux condensateurs montés en surfaces sur un PCB. [5]

La majorité des composants à broches utilisés aujourd'hui sont du type CMS (Composant Monté en Surface). Ils possèdent un boîtier entièrement moulé dont les broches sont disposées en périphérie, ce sont les CEP (Composant à Enrobage Plastique) ou les PEM (Plastic Encapsulated Microcircuit) [5].

Il en existe deux grandes familles caractérisées par une forme de broche différente

□□ La broche en « L » (figure I. 26).

□□ La broche en « J » (figure I.27).

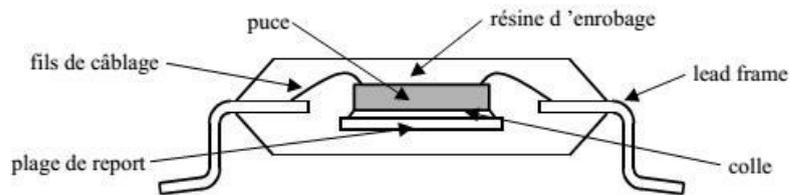


Figure I. 26 : constitution des boîtiers plastiques à broches en « L ». [5]

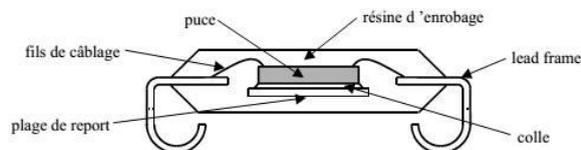


Figure I. 27 : constitution des boîtiers plastiques à broches en « J ». [5]

Il peut s'agir de composant discret ou de circuit intégré (figure I. 28) plus ou moins complexe. Ce composant a une technique d'assemblage spécifique.

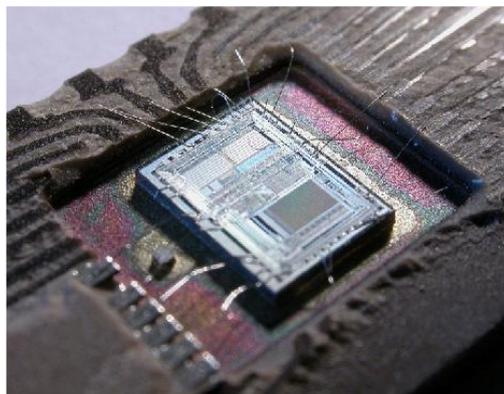


Figure I. 28 : le circuit intégré d'une puce Intel 8742. [5]

### 2.3-les puces retournée (Flip-chip) :

Dans le domaine des semi-conducteurs, la puce retournée (traduction de flip chip) est une des techniques utilisées pour effectuer les connexions électriques. La puce est retournée car, à l'inverse du câblage par fil (trad. wire bonding) ou les surfaces pour les soudures (ou contacts) doivent se trouver dans la même sens, pour la technique de la « puce retournée » les surfaces doivent être face-à-face (soit en sens oppose). La puce est donc bien retournée (par rapport au câblage par fil). Le terme « puce a bosses » est parfois employé, car sur les contacts, il y a des billes ou bosses pour la soudure au boîtier (Figure I. 29). [11]

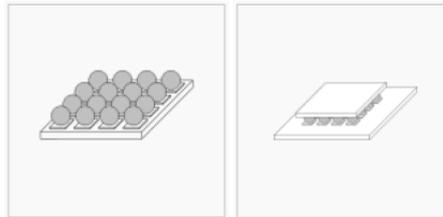
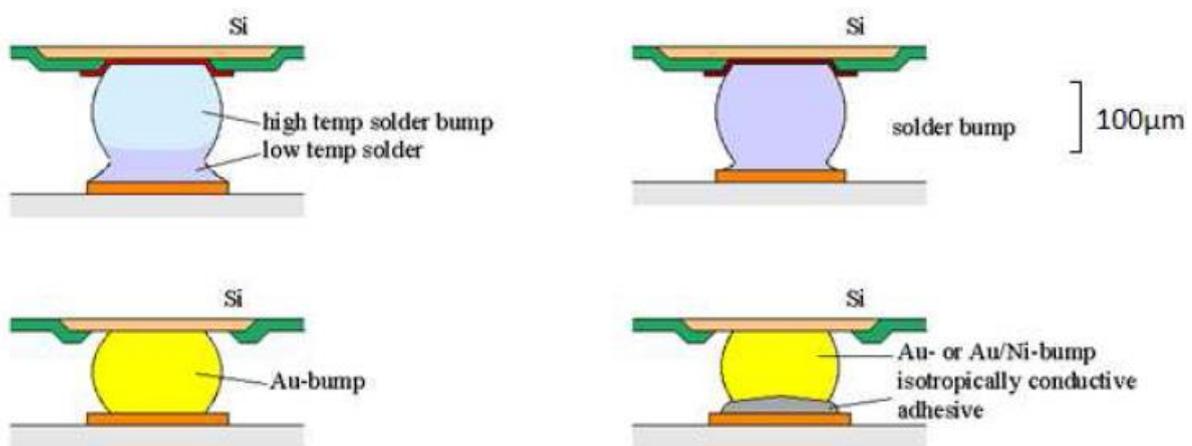


Figure I. 29 : Montage Flip chip. [11]

Les montages flip chip ont l'avantage d'être de taille réduite. Ils sont utilisés pour des appareils high-tech qui renferment beaucoup de technologies dans un petit espace.



La conception et les procédés de fabrication diffèrent en fonction de l'utilité de la puce et des Contraintes auxquelles elle est soumise. On peut donc rencontrer plusieurs types de montages flip chip (Figure I. 30).

Figure I. 30: Exemples de différents montages. [11]

Le tableau 1 regroupe les principales techniques employées pour l'assemblage des microcomposants électronique

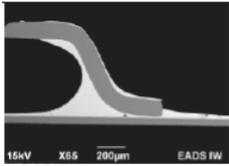
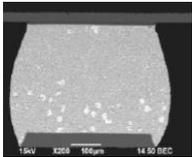
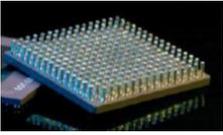
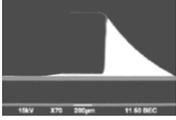
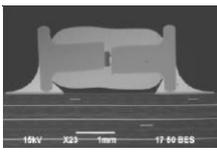
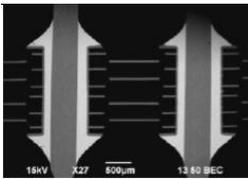
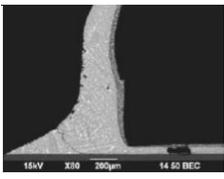
Désignation	Illustration du boîtier	Géométrie du joint de brasure
QFP (Quad Flat Package)		
BGA (Ball Grid Array)		
CGA (Column Grid Array)		
Sans broche « Chip »		
Sans broches « Chip Melf »		
Traversant – DIL (Dual In Line)		
LCCC (Leadless Ceramic Chip Carrier)		

Tableau I. 1: Illustration de différents modes d'assemblage. [2

## V. Les contraintes résiduelles dans les composants électroniques et leurs impacts sur la qualité et la fiabilité :

Les assemblages des microcomposants électroniques sont soumis à des charges variés, ces charges dépendent essentiellement de l'environnement (température), du temps de fonctionnement et de l'interaction entre eux-mêmes (Figure I. 31). Les conditions auxquelles les microcomposants sont soumis sont extrêmement complexes notamment en ce qui concerne les profils de température, de pression, de contraintes résiduelles générées. Notons que chaque microcomposant se comporte différemment de son voisin et peut avoir une incidence sur l'ensemble. Les différences température de fusion des brasures, de CTE, de rigidité à la rupture des différences matériaux sont des points clés influents sur le comportement des assemblages, donc il est nécessaire de tenir compte des ces divers paramètres pour pouvoir déterminer les contraintes thermomécaniques pour le choix des modèles de comportement que l'on peut dans un premier temps agir. [5]

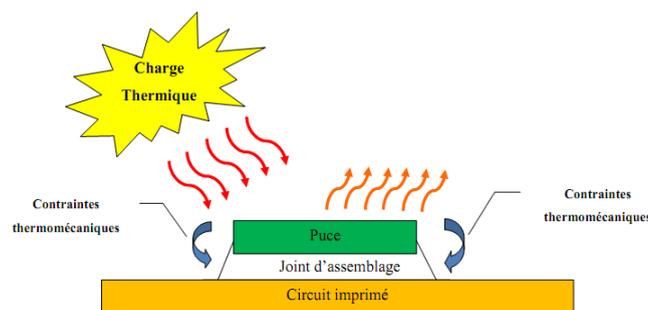


Figure I. 31: assemblage des microcomposants électronique sous chargement thermique. [5]

### V.1-Les effets thermomécaniques de la dilatation :

Les matériaux constituant les microcomposants électroniques voient leurs dimensions évoluer sous l'action de la température. Si deux matériaux possédant des coefficients de dilatation différents et sont liés par une interface, une variation de température induit des contraintes à l'interface dans les matériaux. Ces contraintes peuvent générer des moments qui entraînent la déformation de la structure [5].

Ce phénomène est habituellement représenté et étudié à l'aide de la structure bilame (figure I. 32).

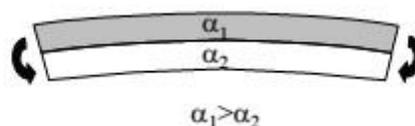


Figure I. 32 : Structure bilame se déformant sous l'augmentation de la température. [5]

## V. 2-Comportement thermomécanique des brasures :

### V.2-1 Formation des micros structure :

Lors de la fabrication des cartes électroniques, les microcomposants sont reportés sur le circuit imprimé (PCB) en utilisant des profils de refusions afin d'assurer la bonne formation des joints brasés. Les paramètres de ce profil sont : le temps de montée en température (ramp up), le temps  $t_L$  au dessus du liquidus (état liquide de la brasure  $\sim > 217^\circ$ ), le pic de température et enfin la pente de refroidissement (ramp-down). Ce dernier paramètre joue un rôle important dans la formation de la microstructure car c'est principalement dans la séquence de solidification que celle-ci se forme. Un exemple de profil de refusions est donné dans la figure 33 où l'on peut observer l'importance de flux actif tout au long du profil afin de garder les parties à assembler propres. [6]

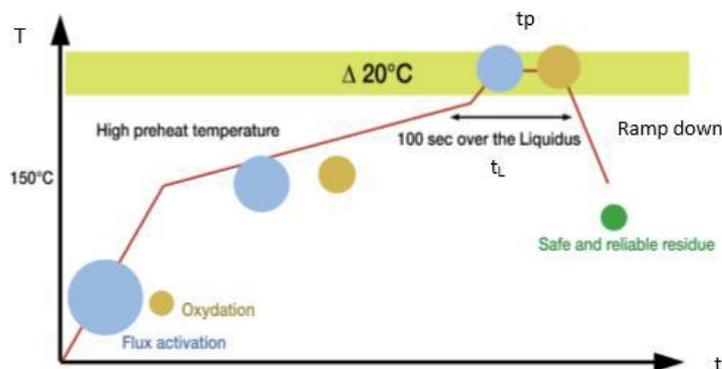


Figure I. 33 : comportement de la crème à brasier (SnPb) dans un four de refusions. [6].

### V.2-2 Mode de sollicitation :

L'alliage binaire étain-plomb est régi par un diagramme de phase (figure I. 34) qui précise son état en fonction de sa température. On peut voir, sur ce diagramme, que l'alliage eutectique (63% d'étain et 37% de plomb) possède deux caractéristiques intéressantes : Il a la température de fusion la plus basse ( $183^\circ\text{C}$ ), et il ne possède pas de phase pâteuse, ce qui lui permet de passer directement de l'état solide à l'état liquide lui conférant ainsi une bonne homogénéité micro structurelle [5].

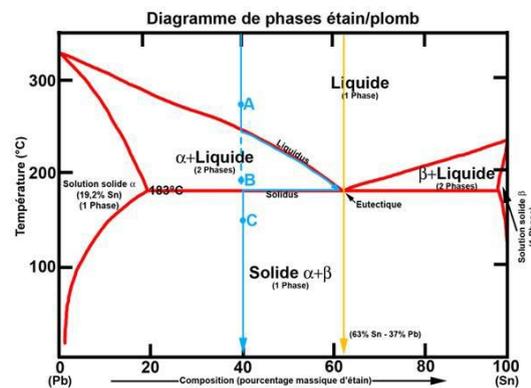


Figure I. 34 : diagramme de phase de l'alliage Plomb-étain. [7].

Cet alliage est organisé en deux phases riches en étain ou en plomb. Elles se présentent sous la forme de précipités de domaines riches en plomb dans une matrice riche en étain. Il s'agit en fait de deux solutions solides, l'une de plomb contenant 2% d'étain, et l'autre d'étain contenant 0,3% de plomb (à la température ambiante). Chacune de ces phases est constituée de plusieurs domaines monocristallins appelés « grains ». Ces grains sont séparés par des « joints de grain » à l'intérieur d'une même phase et par des « joints de phase » pour passer d'une phase à l'autre (figure I. 35). Les caractéristiques mécaniques de la macrostructure sont fortement dépendantes de la qualité de ces joints qui sont en fait des liaisons aux changements structuraux de la matière. La taille et la géométrie des grains ont une incidence directe sur les caractéristiques et le comportement de l'alliage, et elles évoluent avec son vieillissement [5].

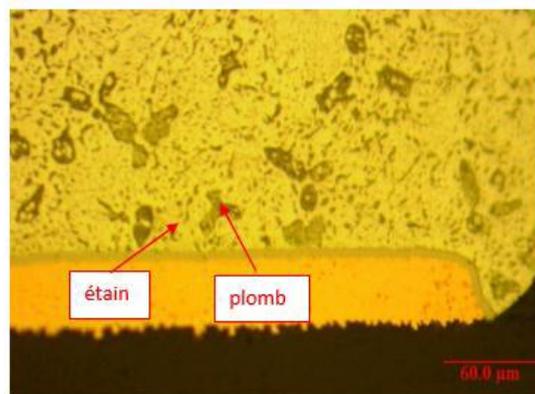


Figure I. 35 : microstructure de l'alliage étain plomb [6].

### V.2-3 Les sollicitations du joint brasé :

Le rôle du joint brasé est d'assurer la liaison entre les terminaisons du microcomposant et le circuit imprimé, il possède de ce fait deux interfaces : l'une avec la broche ou le boîtier suivant la technologie considérée, et l'autre avec la plage de report du circuit imprimé, la différence des coefficients de dilatation des matériaux qui constituent ces interfaces est un

premier mode de sollicitation du joint brasé qui peut en première approximation se modéliser sous la forme d'un trillâmes (Figure I. 36) [5].

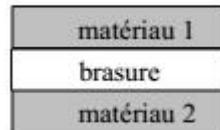


Figure I. 36 : structure trillâmes représentant les interfaces d'un joint brasé. [5]

Le différentiel de dilatation boîtier/substrat représente un autre mode de sollicitation en imposant des déplacements aux broches qui en fonction de leur rigidité transmettent des déformations aux joints brasés, celles-ci sont soumises à des déformations de type cisaillement directement imposées par la dilatation différentielle entre le boîtier et le substrat. Si l'on considère, en première approximation, que les coefficients de dilatation des matériaux du boîtier et du circuit imprimé sont constants, ce phénomène est alors gouverné par la loi linéaire de la dilatation. Les déplacements résultants imposés sont donc directement proportionnels à la taille du boîtier et à l'amplitude de la variation de température [5].

#### V.2-4 Comportement sous charge :

Le comportement sous charge de l'alliage étain plomb utilisé dans les joints brasés peut se classer en deux catégories :

- comportement indépendant du temps : élastoplasticité,
- comportement dépendant du temps : viscoplasticité.

Dans le cas de la brasure, le module d'Young caractérisant le comportement élastique mais surtout la limite d'élasticité et la pente en zone plastique sont fortement dépendants de la température : ils diminuent quand celle-ci augmente. Le graphe contrainte-déformation est alors un réseau de courbes paramétré en température (figure I. 37). [5]

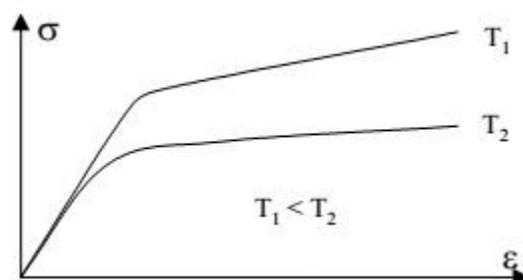


Figure I. 37 : allure du graphe contrainte-déformation de la brasure en fonction de la température [8].

Dans le cas de sollicitations cycliques, la présence de déformations irréversibles dues à la plasticité entraîne également un durcissement du matériau désigné par le terme d'écrouissage.

Lorsque cet écrouissage est anisotrope, la contrainte nécessaire à une nouvelle déformation est soit augmentée soit diminuée suivant les directions considérées (traction ou compression). Ce comportement particulier porte le nom d'effet Bauschinger, c'est l'abaissement de la valeur absolue de la limite d'élasticité en compression suite à une traction préalable. Le matériau c'est adouci en compression et durci en traction [5].

Ce type de chargement alterné est caractérisé par une hystérésis sur la figure I. 38.

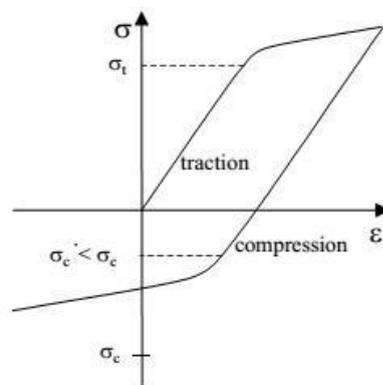


Figure I. 38 : hystérésis du graphe contrainte-déformation avec prise en compte de l'élastoplasticité. [8].

### V.2-5 Endommagement :

L'endommagement du joint brasé possède deux composantes liées à ses deux types de comportement sous charges :

- l'endommagement liés à la fatigue (indépendant du temps),
- l'endommagement lié au fluage (dépendant du temps).

La fatigue accumulée lors des chargements cycliques provoque l'initiation de fissures dans les régions les plus sollicitées ou au voisinage d'une singularité provoquant une concentration de contraintes (changement de forme due à la géométrie ou défaut d'origine : entaille ou rayure).

Ces fissures se propagent au cours des chargements suivants pour finalement provoquer la rupture totale [5].

Le fluage qui est un « écoulement » de la matière, se traduit par un glissement inter granulaire qui au cours des blocages qu'il rencontre (irrégularité géométrique des joints de grains,

présence d'impuretés) fait naître des cavités aboutissant à une fissure dont la croissance finit par causer la défaillance. Ce mode de rupture par fluage nécessite le maintien d'une contrainte constante à température élevée [5].

Dans les assemblages microélectroniques, il est significatif par exemple dans le cas d'une puce reportée par brasage comme montre la figure I. 39.

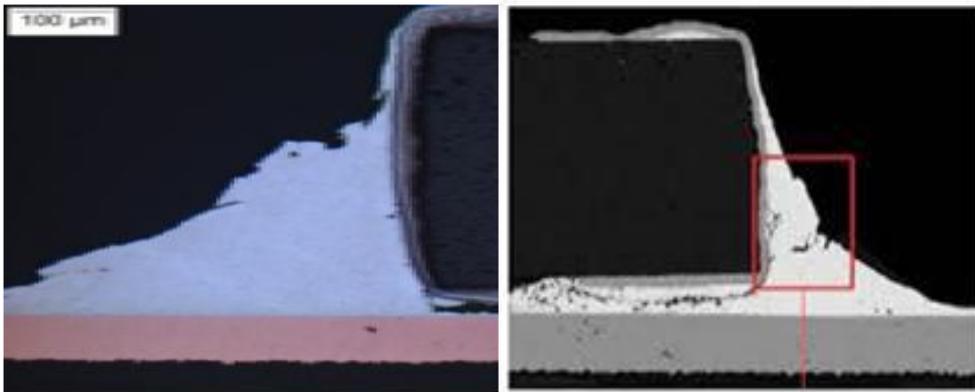


Figure I. 39

: endommagement et fissuration du joint brasé [9].

#### V.2.6. Les défaillances des assemblages :

On peut classer les défaillances des composants ou des assemblages en deux catégories :

##### V.2.6.1 Les défaillances intrinsèques :

Apparaissent dans les conditions normales d'utilisation et sont imputables à l'assemblage lui-même ou à un de ses constituants : Erreur de conception, mauvais dimensionnement, matériaux, procédés de fabrication, boîtier, encapsulation, assemblage. [5]

##### V.2.6.2 Les défaillances extrinsèques :

Sont provoquées par l'environnement de l'assemblage et les conditions de fonctionnement qui lui sont imposées : Surtension, surintensité, décharge électrostatique, manipulations, surcharge mécanique, thermique, chimique ou radiative, mauvaise utilisation (en dehors du domaine d'application) [5].

La courbe du taux de défaillance en fonction du temps (figure 40) présente une forme dite en baignoire mettant en évidence trois zones distinctes [5] :

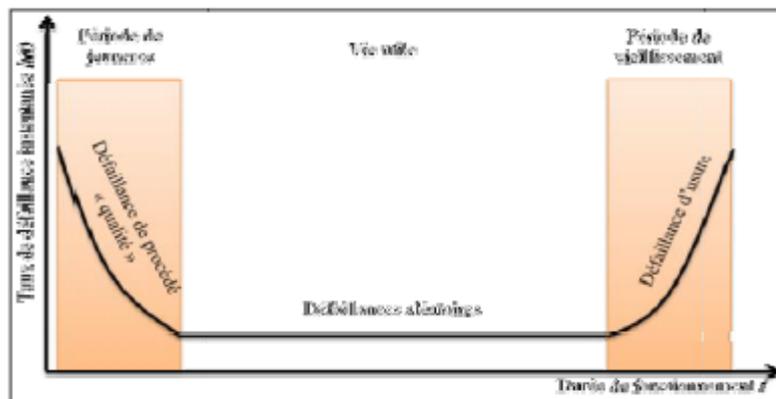


Figure I. 40 : courbe du taux de défaillance (courbe en baignoire) [10].

La première partie de la courbe est la période de mortalité infantile qui correspond à des défauts de jeunesse et présente un taux de défaillance élevé mais décroissant. Ces défaillances sont de nature intrinsèque et proviennent en général d'un mauvais contrôle de la fabrication ayant engendré par exemple : Des mauvais reports ou des faiblesses dans le câblage, des poussières en positions critiques, des impuretés chimiques, des fissures ou des cassures dans les matériaux [5].

La seconde partie est la durée de vie normale caractérisée par un taux de défaillance constant correspondant à des défauts aléatoires de nature extrinsèque provenant par exemple des contraintes d'environnement suivantes : La température, l'humidité, les vibrations et les chocs, les rayonnements [5].

La troisième partie de la courbe, caractérisée par un taux de défaillance élevé, est la période d'usure attendue de l'assemblage ou du composant. Les défaillances sont majoritairement de nature intrinsèque et correspondent aux phénomènes suivants : Corrosion, oxydation, détérioration des isolants, migrations ioniques (électro migration), fatigue des fils de câblage et des joints brasés pour la période centrale de la courbe correspondant à la durée de vie normale [5].

La figure I. 41 présente des résultats d'analyses des défaillances.

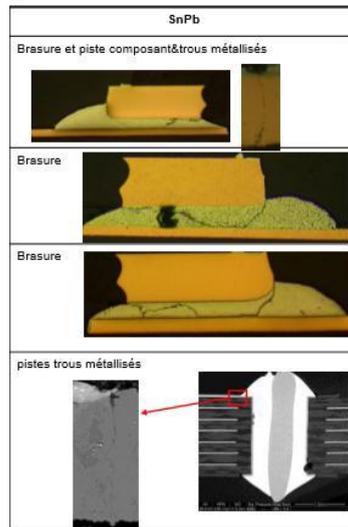


Figure I. 41 : résultats d'analyses des défaillances [6].

***Chapitre II :***  
***Contraintes résiduelles dans les composants***  
***électroniques***

## I. Origine des contraintes résiduelles dans les empilements de couches minces sur un substrat en silicium :

### I.1 Définitions :

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques auto équilibrées existant dans un système isolé de température uniforme et en l'absence de tout chargement extérieur. Dans une section, la répartition des contraintes résiduelles résulte de l'équilibre mécanique entre la zone occupée par la source des contraintes résiduelles caractérisée par une fonction de distribution bien définie et le reste de la section déformée élastiquement. Dans le cas des traitements de précontrainte, les sources de contraintes résiduelles sont toujours localisées dans les couches superficielles du matériau. Les contraintes résiduelles qui nous intéressent sont celles d'origine thermique.[12]

Lorsqu'on fait varier la température d'un système composé de différents matériaux (collés ou soudés) qui ont des coefficients de dilatation différents, l'en résulte des contraintes résiduelles. En effet l'un des matériaux va se dilater plus que l'autre et le « tirer » au niveau de la jonction [12].

La figure 2.42 illustre précisément ce phénomène.

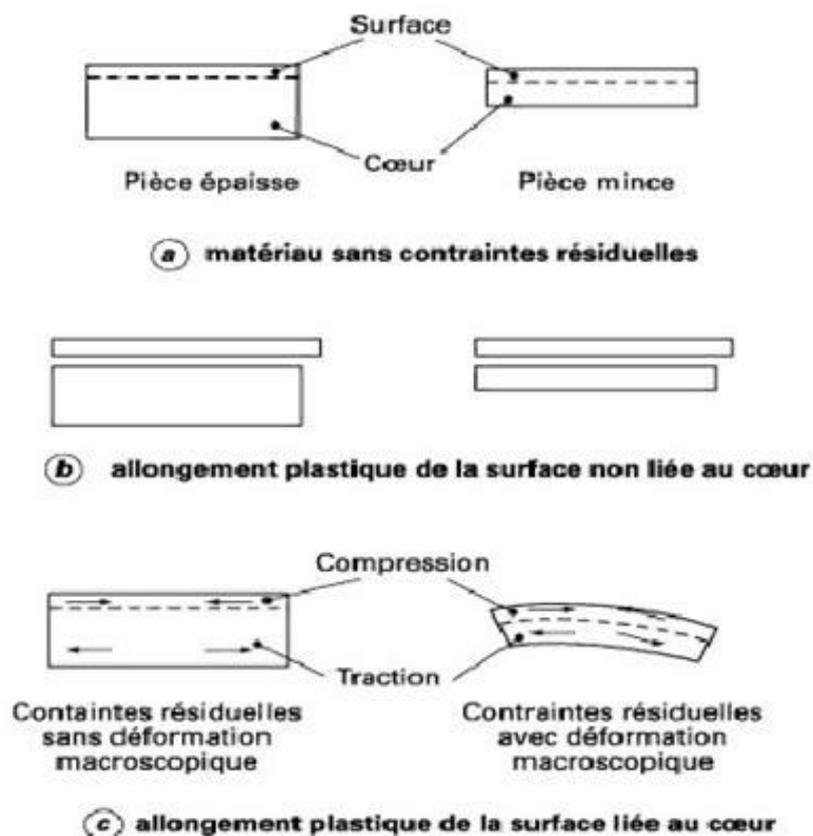


Figure II.1: schéma de la mise en compression des couches superficielles [12].

Ces contraintes résiduelles existent à différents niveaux. On en distingue en général trois qui dépendent de l'échelle à laquelle on les observe [12].

### **I. 1.1. Contraintes de 3ème ordre :**

A l'échelle du cristal, on atteint à ce niveau, la limite de la notion de contraintes. Ce sont les actions créées par tous les types de défauts cristallins dans les grains : lacunes, interstitiels, atomes en substitution, dislocations, défauts d'empilement, macles [12].

### **I. 1.2. Contraintes de 2ème ordre :**

Dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie de chaque cristal ou grain dans un matériau polycristallin. Lors d'une sollicitation mécanique (traction uniforme d'une éprouvette lisse par exemple), certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement, ce qui provoquera une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée. Les retours élastiques se feront donc différemment et plus ou moins librement suivant les grains, ce qui conduira ceux-ci dans des états de contraintes résiduelles du 2e ordre non nulles. Cependant, la moyenne de ces contraintes, c'est-à-dire la résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle du 1er ordre). Ce type de contraintes pourrait être mesuré par diffraction des rayons X [12].

### **I. 1.3. Contraintes de 1er ordre :**

Ou macroscopiques, qui se situent à l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par rayons X [12].

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent les unes sur les autres. Ce sont bien sûr les contraintes du premier ordre ou macro contraintes qui intéressent le mécanicien ou les bureaux d'études. Mais les contraintes résiduelles de 2e ordre sont également très importantes, car elles sont l'indicateur de l'état d'écrouissage et d'endommagement du matériau [12].

## **I.2 Origines des contraintes résiduelles :**

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique et métallurgique. On assiste souvent à une combinaison de ces différentes causes pour la genèse des contraintes résiduelles [12].

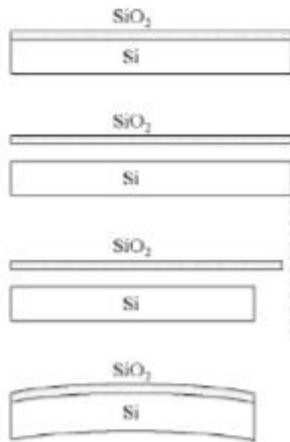
En général, les contraintes résiduelles macroscopiques peuvent être dues :

- « À un écoulement plastique non homogène sous l'action de forces extérieures

(Grenaillage, auto frettage, galetage, martelage, choc laser).

- « À une déformation plastique non homogène au cours d'un chauffage ou d'un refroidissement non uniforme (trempe banale, moulage des matières plastiques).
- « Aux déformations structurales de transformation de la matière (traitement thermique).

- « Aux hétérogénéités d'ordre chimique ou cristallographique (nitruration, cémentation).
- « À des traitements superficiels divers (émaillage, nickelage, chromage, PVD, CVD) ;
- « Aux différences de coefficients de dilatation et aux incompatibilités mécaniques des différents composants des composites (composites à matrice métallique et organique, revêtements céramiques). Le schéma de la figure 2.43 donne le comportement d'une structure constituée d'une mince couche d'oxyde de silicium déposée sur un épais substrat en silicium de coefficient de dilatation différent subissant à un cycle thermique [12].



a) Température d'oxydation. Film non contraint.

b) Film « décollé » du substrat. Les dimensions longitudinales du film et du substrat sont identiques.

c) Retour à la température ambiante. Contraction différentielle de l'oxyde et du substrat .

d) Film « récollé » en compression sur le substrat.

Courbure de la structure

Figure II.2: schéma descriptif des contraintes résiduelles apparaissant à l'interface dans des couches minces [12].

### I.2.1 Les contraintes résiduelles :

Sont des contraintes mécaniques qui demeurent au sein des matériaux à température ambiante en l'absence de tout chargement externe. Elles sont définies comme étant la somme des contraintes intrinsèques et des contraintes thermomécaniques. [3]

$$\sigma \text{ résiduelle} = \sigma \text{ intrinsèque} + \sigma \text{ thermomécanique}$$

#### ➤ Contrainte intrinsèque :

Les contraintes intrinsèques peuvent apparaître lors des dépôts des couches minces sur le substrat. Les ions ou atomes vaporisés ou pulvérisés occupent des sites qui seraient normalement plus petits qu'eux, sous l'effet du champ électrique créé entre la couche et le

substrat .Ce qui génère des contraintes intrinsèques qui deviennent importantes en fonction de la différence de potentiel. Elles sont liées à l'interaction élastique atomique entre la couche et le substrat. Après le dépôt, les réorganisations atomiques peuvent entraîner un changement du volume de la couche et par le même effet l'apparition des contraintes. Après le dépôt, les réorganisations atomiques peuvent entraîner un changement du volume de la couche et par le même effet l'apparition des contraintes. [3]

-Contraintes mécaniques et thermomécaniques :

Ces contraintes apparaissent lors du retour à l'ambiance des dépôts à chaud, et lors des recuits, du fait des différences des coefficients de dilatation thermique des matériaux. [3]

## II. Conséquence des contraintes résiduelles :

En raison de l'exposition continue à des facteurs climatiques variables, le matériau est conforté au phénomène de contraintes résiduelles qui conduit à sa déformation.

Comme il a été défini précédemment, les matériaux voient leurs dimensions évoluer sous l'action de la température. Si deux matériaux possédant des coefficients de dilatation différents sont liés par une interface, une variation de température induit des contraintes à l'interface dans les matériaux. Ces contraintes peuvent générer des moments qui entraînent la déformation de la structure .Ce phénomène est habituellement représenté et étudié à l'aide de la structure bilame. [12]

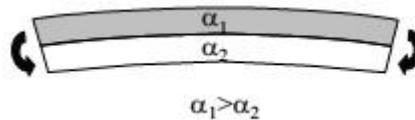


Figure II.3: Structure bilame se déformant sous l'augmentation de la température [12].

Pour les microcomposants électroniques, ces déformations dues aux contraintes résiduelles, provoque des défauts relatifs à la réponse électronique ce qui se traduit par une perte de productivité et une diminution de qualité et de fiabilité. [12]

## I. Techniques expérimentales de mesure des contraintes résiduelles :

En raison de l'importance de l'influence des contraintes résiduelles sur les qualités et la durée de vie des matériaux dans l'ensemble des domaines d'activité de notre société, il n'est pas surprenant d'observer un intérêt continu pour le développement de nouvelles méthodes de mesure des contraintes résiduelles. [13]

Chacune des méthodes utilisées pour la détermination des contraintes résiduelles possède des avantages et ses propres limitations. Leur utilisation dépend de la forme de la pièce, de ses dimensions, du matériau du dépôt et du substrat, de la possibilité d'endommager irréversiblement les échantillons. [13]

Il existe plusieurs approches de mesure des contraintes résiduelles destructives ou non : la diffraction des rayons X, l'étude de la propagation des ultrasons, le magnétisme, l'étude de la déformation en cours de projection, le trou incrémental...

Nous présentons dans ce qui suit, les principales techniques actuellement employées pour évaluer le niveau et la répartition des contraintes résiduelles. [13]

### III. 1-Etude de la propagation des ondes acoustiques :

Le développement de l'acousto-élasticité qui utilise la dépendance de la vitesse des ondes ultrasonores au niveau de contrainte du matériau permet aujourd'hui une étude très localisée (zone de plus de 0,01 mm<sup>2</sup>) des contraintes dans les solides.

La vitesse d'une onde acoustique dans un solide est relativement facile à mesurer en utilisant un équipement simple, elle dépend de la racine carrée du module d'Young E. Sous l'hypothèse d'un matériau élastique, le niveau de contrainte est proportionnel à la Déformation :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Loi de Hooke.}$$

Il y a cependant des constants élastiques d'ordre supérieur :

$$\sigma = E\varepsilon + A\varepsilon^2 + B\varepsilon^3 + \dots$$

En conséquence, en conservant les deux premiers termes, une meilleure approximation est :

$$\sigma \approx (E + A\varepsilon) \cdot \varepsilon + M'\varepsilon$$

Ainsi, la vitesse de propagation V d'une onde est :

$$v = k\sqrt{M'} = k\sqrt{E + A\varepsilon}$$

La vitesse de l'onde dépend donc de l'état de déformation dans le matériau, et donc du niveau de contrainte. [13]

**III. 2-Méthode magnétique (effet magnétique Barkhausen) :**

Au sein des matériaux ferreux, les parois de Bloch sont les interfaces entre les régions dont la magnétisation spontanée a des directions différentes. Au niveau de ces parois, la magnétisation change de direction. Ces “frontières” magnétiques soumises à un champ magnétique se déplacent de façon saccadée et discontinue. Cette réponse à une sollicitation magnétique est nommée effet magnétique Barkhausen aussi appelé “bruit Barkhausen” en raison de sa mise en évidence à l’aide d’un haut-parleur branché sur une bobine enroulée autour (ou proche) de la zone sujette à sollicitation magnétique.

Les champs de contraintes du matériau et sa microstructure affectent l’effet Barkhausen, et perturbent le déplacement des domaines magnétiques. Ainsi, des études sont nécessaires afin de calibrer l’intensité de l’effet Barkhausen en fonction de contraintes ou déformations externes pour pouvoir ensuite déduire le niveau des contraintes résiduelles d’une sollicitation magnétique [13]

Cette technique est simple à mettre en œuvre. Cependant, elle est réduite aux alliages ferreux. Le signal du bruit arrive à saturation aux alentours de 500 MPa (en valeur absolue). [13]

**III. 3-Technique de diffraction des rayons-X et des neutrons :**

Le moyen non destructif de mesure des contraintes résiduelles le plus répandu est la diffraction des rayons-X (DRX). La détermination des contraintes résiduelles par les méthodes de diffraction est basée sur la mesure des angles pour lesquels l’intensité diffractée est maximale lorsqu’une structure cristalline est irradiée par des rayons-X. A partir de ces angles, la loi de Bragg donne la distance entre les plans du réseau cristallin dont la valeur dépend du champ de contrainte au sein du matériau étudié. La mesure de  $d$  et l’application du modèle élastique de Hooke permettent d’obtenir la valeur de la contrainte. [13]

Distribution globale des contraintes n’aura pas été modifiée.

**III. 4-Méthode du trou incrémental :**

Cette méthode se classe parmi les méthodes dites de relaxation. Elle consiste à enregistrer les effets mécaniques des relaxations de contraintes internes à la pièce lorsqu’on procède à des enlèvements successifs de matières (perçage d’un trou pas à pas)

. Le trou est percé au centre d’une rosette de jauges d’extensomètre (à  $120^\circ$ ), son centre détermine l’endroit précis où sont évaluées les contraintes. [13]

L'enlèvement d'un volume de matière et donc le relâchement des contraintes dans le volume retiré redistribue les contraintes internes de l'échantillon jusqu'à un nouvel équilibre mécanique. Les déformations liées à la redistribution des contraintes sont enregistrées par les jauges de déplacement. Afin de pouvoir connaître le niveau de contrainte au sein chaque incrément de matière retirée, il est nécessaire d'établir la relation entre le champ de déplacement autour du trou et l'état de contrainte résiduelle. Pour cela, l'utilisation d'un modèle mécanique numérique tridimensionnel permet de retrouver les coefficients d'étalonnage (recalculés pour chaque pas de perçage) qui lient les contraintes principales et l'angle de la première contrainte principale avec une direction de référence au champ de déplacement, sous conditions des hypothèses suivantes:

- le matériau percé est homogène, isotrope et élastique.
- la valeur de la contrainte résiduelle est homogène et le cisaillement est nul dans la partie retirée.
- la composante normale à la surface de la contrainte est négligeable,
- les niveaux de contrainte mesurés sont inférieurs à la limite élastique.



Figure II.4: photographie du dispositif de mesure des contraintes résiduelles sans les dépôts, méthode du trou incrémental. UTT-LASMIS. [13]

### III. 5-Méthode de la flèche :

L'ensemble des techniques développées pour la détermination des contraintes résiduelles ne peut, en général, pas renseigner sur la valeur de chacune des composantes mais sur la valeur globale de la contrainte résiduelle. L'étude de la courbure d'une pièce après un traitement particulier (traitement thermique, sablage...) permet la détermination de l'état de contrainte généré par celui-ci

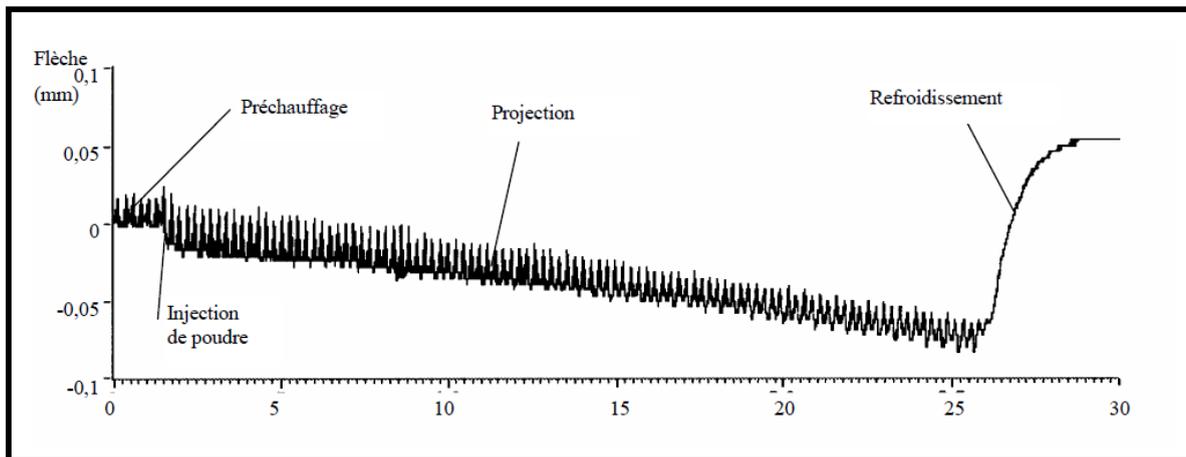


Figure II.5: Courbe représentative de l'évolution de la flèche d'un substrat AISI 304L pendant une projection plasma (BARADEL, 1999). [13]

La contrainte thermique est évaluée par la mesure de la déformation liée au refroidissement final de la pièce entre la température de projection et la température ambiante.

Selon la démarche entreprise, la déformation d'une plaquette de faible épaisseur (environ 2mm) est enregistrée grâce à un capteur de déplacement placé contre la face arrière de l'échantillon ou grâce à des lasers qui permettent l'évaluation de la déformation du substrat (MATEJICEK ET AL, 2003). La flèche et donc la courbure de la pièce sous l'action des diverses sollicitations mécaniques (contraintes) et thermiques (gradient thermique dans l'épaisseur du bilame) sont ainsi mesurées en continu. [13]

#### IV. Approches numériques visant à estimer les contraintes résiduelles :

La théorie des éléments finis repose sur des notions mathématiques concernant l'étude des équations aux dérivées partielles.

La simulation par éléments finis ou « méthode des éléments finis », au sens premier du terme, désigne un ensemble de techniques numériques permettant de résoudre approximativement une certaine classe de problèmes mathématiques, basés sur des équations aux dérivées partielles, dont on ne sait généralement pas trouver les solutions exactes. Il s'agit d'un outil mathématique qui possède de nombreuses applications, allant de la physique des milieux continus au calcul de probabilités. [14]

Nous utilisons le modèle de comportement pour relier le tenseur des contraintes au champ de déplacement et, ainsi, exprimer les efforts nodaux intérieurs  $f_i$  en fonction des déplacements nodaux  $u_j$ . On obtient après calcul un système de  $n$  équations linéaires : pour  $i$  allant de 1 à  $n$

$$\sum_{j=1}^n K_{ij} u_j = f_i^e$$

K désigne le tenseur d'élasticité (il s'agit d'une notation compacte et générale de la loi de Hooke)

Le champ de déformation et le champ de contrainte : Le champ de déformation est calculé en prenant la partie symétrique du gradient du champ de déplacement, conformément à sa définition. Les contraintes sont déduites des déformations à l'aide du modèle du comportement du matériau. En appliquant cette technique, pour l'exemple ci-dessus, on obtient un champ de contrainte comme celui de la figure II.6. Les logiciels permettant généralement de tracer n'importe quelle composante ou n'importe quel invariant des contraintes ou des déformations ; la quantité représentée ici est la contrainte équivalente de Von Mises. [14]

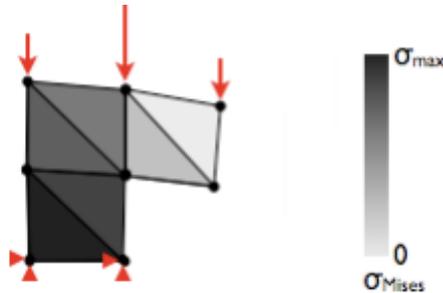


Figure II.6: Allure du champ de contraintes de Von Mises. Chaque teinte de gris correspond à une valeur. [14]

Le champ obtenu ne vérifie clairement pas l'équation d'équilibre des milieux continus, puisque les contraintes sont discontinues d'un élément à l'autre. De plus, si l'on traçait les différentes composantes des contraintes (et non l'équivalent de Von Mises), on verrait que les conditions de bord libre ne sont pas respectées. Enfin, on remarque que la contrainte est constante dans chaque élément, ce qui ne semble guère réaliste pour un modèle sollicité principalement en flexion. [14]

## **V. Difficultés rencontrées dans l'estimation numérique des contraintes résiduelles dans les microcomposants électroniques (grand nombre de motifs) :**

L'utilisation de la méthode des éléments finis dans l'estimation du comportement thermomécanique des microstructures est présentée comme une solution prometteuse visant à améliorer la qualité et les performances des solutions développées. Néanmoins, cette approche se heurte à la complexité géométrique des microcomposants électroniques. On parle ici à l'effet d'échelle, (couches extrêmement fines déposées sur un substrat relativement épais) ainsi que les motifs à répétition formant le microcomposant. Surmonter ces difficultés de simulations passe par des simplifications géométriques et des approches d'homogénéisation visant à réduire la taille du modèle.

## **VI. Hypothèses simplificatrices dans les simulations (négligence des motifs) :**

Dans un modèle avec de nombreux motifs similaires et des caractéristiques comparables on peut tout simplement réaliser une étude de sensibilité géométrique. A titre d'exemple, on simule la structure entière et une structure comparable avec une négligence de certaines régions. Si les deux modèles donnent des résultats comparables, on dit que notre modèle est insensible à la zone négligée, sinon, on doit passer par d'autres approches comme l'homogénéisation par exemple.

## **VII. Utilisation de l'homogénéisation pour estimer numériquement les contraintes résiduelles :**

A une échelle suffisamment fine, tous les matériaux sont hétérogènes, même ceux dits homogènes. Pour s'en convaincre, il suffit de commencer au niveau des atomes et des molécules. Si les matériaux d'ingénierie habituels devaient être caractérisés à ce niveau d'observation, la tâche serait écrasante. Pour surmonter cette difficulté, les ingénieurs introduisent l'hypothèse de continuité d'un matériau. Cette hypothèse implique une notion de moyenne statistique dans laquelle la constitution réelle du matériau est idéalisée en considérant le matériau comme continu. Une fois le modèle de continuité admis, le concept d'homogénéité s'en déduit. Un milieu homogène se caractérise alors par des propriétés identiques en tout point.[15]

Au niveau de l'ingénierie, le caractère d'hétérogénéité apparaît chaque fois que les propriétés physiques ou mécaniques d'un matériau sont fonction d'un point. Les variations des propriétés peuvent être de deux types: soit continues, soit discontinues comme dans le cas de matériaux composites. Dans ce cas, les propriétés du matériau varient de point en point de manière discontinue aux interfaces entre ses différentes phases. Chaque phase est supposée homogène et isotrope. [15]

Dans le cas d'une phase 1 dispersée avec dans la phase 2 il existe en général une dimension caractéristique de l'hétérogénéité. Par exemple, dans le cas d'un matériau composite en fibres, cette dimension serait la distance moyenne entre les fibres. Cette dimension est en fait une description idéalisée d'une distribution statistique à l'intérieur du matériau hétérogène réel. D'un autre côté, il existe généralement une échelle de taille  $\delta$  à laquelle les propriétés du matériau peuvent être moyennées à une bonne approximation. Cela signifie que, dans ce cas, les propriétés mesurées dans un échantillon de taille  $\delta$  sont indépendantes de la place (du point) dans le matériau où l'échantillon a été prélevé. En termes d'un tel concept, le matériau peut alors être considéré comme étant effectivement homogène, et les problèmes de conception de structures peuvent être résolus en considérant les propriétés de moyenne mesurées sur l'échelle  $\delta$ . Dans le cas où il existe une telle échelle (intermédiaire entre l'échelle microscopique - celle des constituants - et l'échelle de la structure), on dit que le matériau peut être homogénéisé. On parle alors d'homogénéité macroscopique (par opposition à l'échelle des constituants, que l'on appelle microscopique), ou d'homogénéité statistique. Le concept de rendre «homogène» un matériau «hétérogène» est appelé homogénéisation. [15]

La grande majorité des techniques d'homogénéisation sont appliquées aux structures dont les comportements globaux sont orthotropes, donc définis par 9 coefficients élastiques explicites; Modules de Young  $E_x$ ,  $E_y$  et  $E_z$ , modules de cisaillement  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$  et  $G_{zx}$  et coefficients de Poisson  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$  et  $\nu_{zx}$  lorsque l'on considère les directions x, y et z.

Relativement peu d'entre eux sont à la fois précis et simples à mettre en œuvre dans le cas de structures 3D, et conduire rarement à des matrices d'élasticité équivalentes. Il existe pourtant certaines situations dans lesquelles les matériaux orthotropes ne sont pas suffisamment précis pour modéliser le comportement d'une structure hétérogène donnée. Dans de tels cas, les matériaux équivalents sont appelés anisotropes (ou parfois «triclinique») et doivent être définis par leur expression la plus générale. Au lieu des 9 coefficients élastiques explicites, les matériaux anisotropes sont définis par 21 constantes indépendantes composant la matrice d'élasticité C dans la loi de Hooke généralisée [16]

le système linéaire est détaillé comme suit:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ sym & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2 \cdot \varepsilon_{23} \\ 2 \cdot \varepsilon_{13} \\ 2 \cdot \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

où les indices 1, 2 et 3 se réfèrent respectivement aux directions x, y et z.[12]

Pour déterminer les constantes équivalentes nous avons choisi la méthode décrite par l'organigramme suivant :

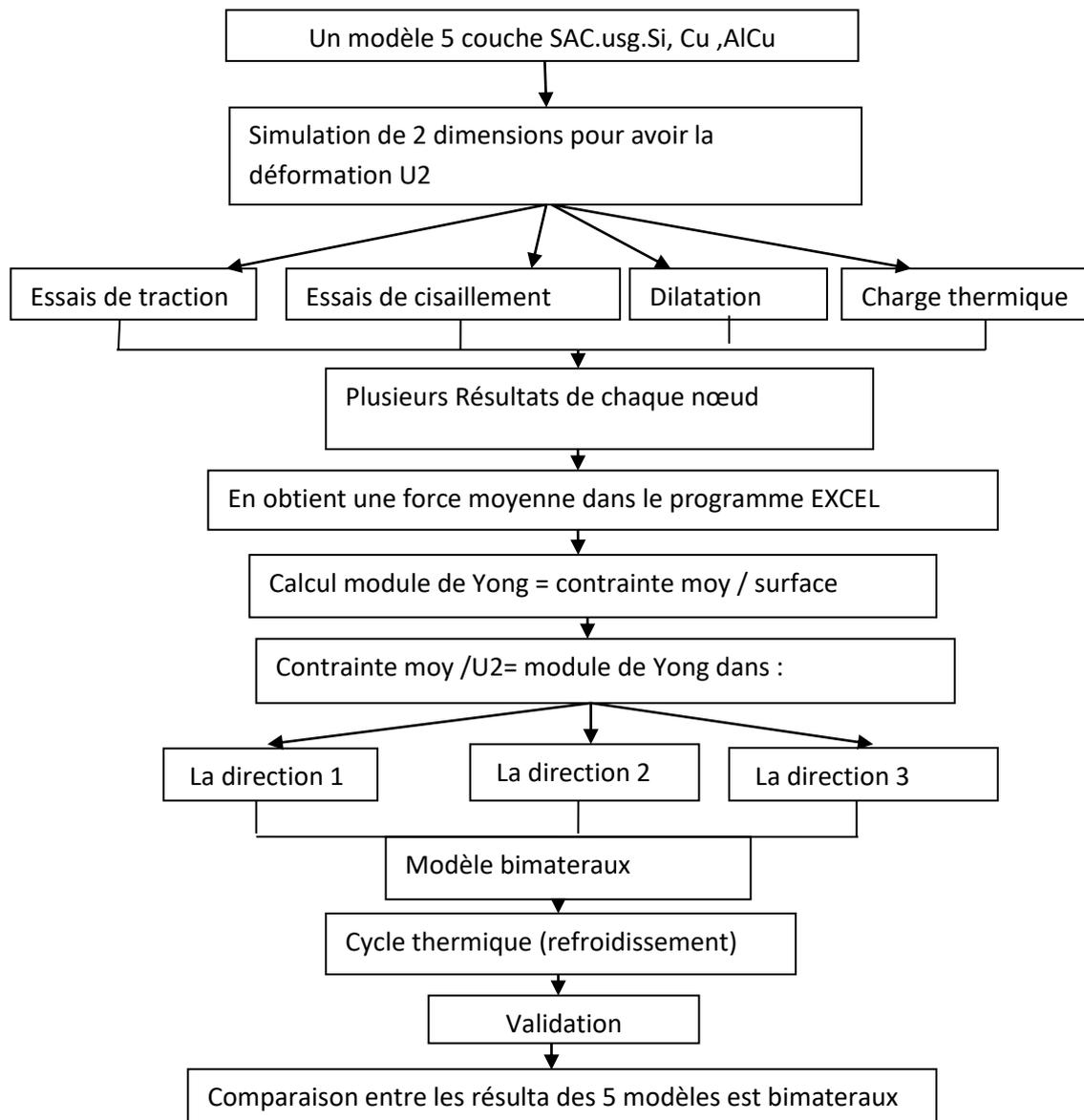


Figure II.7: organigramme de la technique d'homogénéisation.

### VIII. Proposition d'une technique d'homogénéisation pour notre étude :

La technique utilisée pour notre étude est la loi des mélanges

#### 1. Règle des mélanges:

La règle des modèles de mélange est dérivée de l'approche de la mécanique des matériaux. La principale caractéristique de l'approche de la mécanique des matériaux est que certaines hypothèses de spécification doivent être faites concernant le comportement mécanique d'un matériau composite afin d'obtenir une solution efficace. Un Élément de volume représentatif (RVE) typique est illustré à la figure 24. [17]

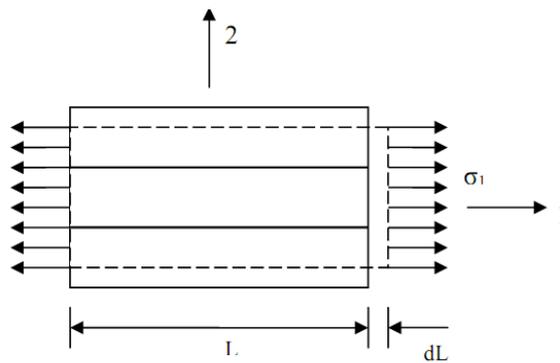


Figure II.8: RVE chargé dans le sens 1. [17]

Il se compose uniquement de la fibre et de la matrice. Cette représentation est applicable à la fois  $x_1$ - $x_2$  et plans, et il est valable pour une symétrie transversalement isotrope. Les seuls paramètres déterminants sont les constantes élastiques et la fraction volumique des phases, et ont été indépendamment de la géométrie de phase et de la distribution spatiale. Sur la base de cette RVE, on peut prédire quatre constantes élastiques  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$  et  $G_{12}$ . [17]

Détermination de  $E_1$  :

Les conditions aux limites associées pour trouver la  $E_1$  est une déformation axiale  $\varepsilon_1$  dans le sens des fibres

$$\varepsilon_1 = dl/l$$

Ou  $\varepsilon_1$  s'applique à la fois aux corps et à la matrice selon l'hypothèse de base que la déformation à travers le matériau en vrac est uniforme (iso-déformation) d'après Voigt (1889) [17].

Ensuite, si les deux matériaux constitutifs se comportent élastiquement, les contraintes dans le sens des fibres sont

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m$$

la contrainte moyenne  $\sigma_1$  agit sur la section A du RVE,  $\sigma_f$  agit sur la coupe transversale surface des fibres  $A_f$  et  $\sigma_m$  agit sur la surface en coupe de la matrice. Ainsi, la force résultante sur le RVE

$$P = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

agit sur la surface en coupe de la matrice. Ainsi, la force résultante sur le RVE

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$$

Apparemment

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}$$

Mais la fraction volumique des fibres et de la matrice peut s'écrire

$$V_f = \frac{A_f}{A}$$

$$V_m = \frac{A_m}{A}$$

Donc,

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m$$

Détermination de E2:

Pour déterminer E2, la condition aux limites associée est la contrainte transversale  $\sigma_2$  normal à la direction des fibres. On suppose que, la même contrainte transversale  $\sigma_2$  doit être appliqué à la fois à la fibre et à la matrice [17].

Les déformations dans la fibre et dans la matrice sont donc issues de la contrainte:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}$$

La dimension transversale sur laquelle, en moyenne,  $\varepsilon_f$  agit est d'environ  $V_f W$ , où comme  $\varepsilon_m$  agit sur  $V_m W$ . Ainsi, la déformation transversale totale est

$$dW = \varepsilon_2 W = V_f W \varepsilon_f + V_m W \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_2 = V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m}$$

Où

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

Détermination de  $v_{12}$ :

Soi-disant coefficient de Poisson majeur  $V_{12}$  est déterminée par une approche similaire à l'analyse de  $E_1$

$$V_{12} = v_f V_f + v_m V_m$$

Détermination de  $G_{12}$  :

Le module de cisaillement dans le plan du module de la lame  $G_{12}$  est déterminé en supposant que les contraintes de cisaillement sur la fibre et sur la matrice sont les mêmes. Donc, cette condition donne le module de cisaillement axial  $G_{12}$ . [13]

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}$$

Où  $G_f$  et  $G_m$  sont respectivement le module de cisaillement de la fibre et de la matrice. La règle de mélange fournit une estimation rapide des modules efficaces d'une manière simple. Les quatre constantes décrivent les composites dans des conditions de contrainte plane. [17]

**Chapitre III**  
**Analyse numérique des contraintes résiduelles**  
**dans les plaquettes de silicium avec motifs et**  
**homogénéisées**

## I. La simulation numérique par éléments finis dans le domaine de la microélectronique :

### I-1 La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (FEM) est basée sur trois entités fondamentales :

**Le maillage :** Le maillage peut être en 1D (des lignes), 2D (des triangles, des quadrilatères...etc) ou 3D (des tétraèdres, des hexagones, des prismes triangulaires). La méthode des éléments finis peut utiliser en même temps plusieurs types de mailles (1D, 2D et 3D) afin de couvrir toute la géométrie simulée avec des éléments finis sans que ces derniers se chevauchent. Le type et la taille des mailles choisies influent sur la précision du résultat de résolution.

**Les nœuds :** Points de l'espace sur lesquels les champs physiques des équations des PDE sont discrétisés. Ils peuvent être positionnés n'importe où au sein de l'élément : sur les sommets, sur les bords et même à l'intérieur de l'élément. L'ensemble des nœuds détermine le nombre d'équations qu'il y aura dans le système d'équations différentielles.

**Les fonctions de formes :** déterminent comment le champ physique à modéliser sera approximé sur le domaine d'un élément. Les fonctions de forme sont régies par le degré de continuité imposé par les PDEs. Les principales étapes de la construction d'un modèle élément fini peuvent être résumées comme suit :

**Étape 1 :** La discrétisation du milieu continu en sous domaines Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu  $D$  en sous domaines  $D_e$  selon l'équation 1.1. Ceci est équivalent à remplacer le domaine  $D$  avec un nombre infini de degrés de liberté (Dof) par un système avec un nombre fini de Dof.

$$\sum_{e=1}^{n_e} D_e \quad \text{tel que} \quad \lim_{e \rightarrow 0} \coprod_e D_e = D$$

Pour avoir des résultats précis, il est indispensable de représenter au mieux la géométrie étudiée par des éléments aux formes géométriques les plus adaptées. Dans la méthode des éléments finis, il ne doit y avoir ni chevauchement ni espace vide entre deux éléments se partageant la même frontière. L'étape de discrétisation géométrique est le processus le plus compliqué, qui provoque souvent des erreurs, surtout si les frontières de la géométrie étudiée sont complexes. Dans ce cas, il faut agir en faisant des approximations sur la forme et la taille des mailles afin d'éviter les erreurs de convergence des calculs.

**Étape 2 :** L'approximation nodale La méthode des éléments finis est basée par la suite sur la construction systématique d'une approximation des composantes du champ physique à modéliser par sous domaine discret, i.e. par élément. Pour cela, le champ physique,  $P(x)$ , au point de coordonnée  $x$ , est approximé par une combinaison de fonctions simples, appelées fonctions de forme,  $\Phi_i(x)$  :

$$P(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Phi_i(x)$$

D'un point de vue mathématique, ces fonctions de forme représentent une base vectorielle sur laquelle la fonction  $P(x)$  est projetée. Le nombre de fonctions de forme, i.e. le degré de la base, doit être égal au nombre de nœuds de l'élément,  $N$ . A noter que si l'on modélise un volume, la coordonnée  $x$  correspond à un triplet  $(x_1, x_2, x_3)$ , mais par souci de concision, nous garderons par la suite la dénomination  $x$ . D'autre part,  $P(x)$  peut par exemple représenter la température au point  $x$ . C'est alors un scalaire. Ce peut-être aussi le déplacement  $u(x)$  du point sous l'action d'une contrainte mécanique. Dans ce cas,  $P(x)$  est un vecteur à 3 composantes. . .

De par la simplicité des calculs polynomiaux, on utilise généralement des fonctions de forme polynomiales. D'autre part, au sein d'un élément, on s'arrange pour que  $\Phi_i(x_i) = 1$  et  $\Phi_i(x_j) = 0$ , où  $x_i$  représente la coordonnée du point  $i$  et  $x_j$  celle d'un point  $j$  différent du point  $i$ . La technique pour cela passe par l'utilisation de coordonnées locales, dont l'introduction n'a pas d'intérêt ici. Ainsi, les coefficients  $\alpha_i$ , qui peuvent être des scalaires (modélisation d'un champ scalaire) ou des triplets (modélisation d'un champ vectoriel), correspondent à la valeur du champ physique au point de coordonnée  $x_i$ . Ce sont les inconnus à calculer.

**Étape 3 :** L'extraction des fonctions élémentaires La valeur des coefficients  $\alpha_i$  dépend des lois physiques régissant le comportement du système à modéliser. En écrivant ces lois pour chacun des éléments, on établit des fonctions élémentaires décrivant le comportement physique de l'élément. Pour cela trois approches peuvent être utilisées :

L'approche directe : Utilisée pour des cas simples à calculer, souvent 1D ou 2D, elle est basée sur un raisonnement physique direct. Les fonctions élémentaires sont établies à partir de l'observation du comportement de chaque nœud de l'élément en interaction avec ses voisins.

L'approche variationnelle : La plupart des phénomènes physiques peuvent être formulés sous forme d'une intégrale énergétique. Par exemple, si l'on considère élément solide se déformant de manière élastique, l'énergie potentielle élastique stockée dans l'élément est proportionnelle à l'intégrale sur cet élément du produit de la contrainte (tenseur de contrainte) par la déformation (tenseur de déformation). En unidimensionnel, ceci est équivalent à l'énergie  $\frac{1}{2}k\Delta x^2$  stockée dans un ressort,  $k\Delta x$  correspondant à la contrainte et  $\Delta x$  à la déformation. D'un point de vue physique, cette énergie stockée doit être égale au travail des forces externes (des contraintes) ayant conduit à la déformation, i.e. dans notre exemple simple du ressort au travail de la force  $k\Delta x$  sur le déplacement  $\Delta x$ . De manière générale, au sein d'un élément, les grandeurs physiques en jeu, i.e. pour notre exemple la contrainte, la déformation, le travail des forces externes 1, s'expriment en fonction du champ physique à modéliser 2. Dans notre exemple de mécanique du solide, ce champ physique  $P(x)$  serait le déplacement  $u(x)$  du point de coordonnée  $x$ . Au final, pour chaque élément, l'intégrale énergétique peut s'exprimer en fonction des  $\alpha_i$ , c'est-à-dire des valeurs de la grandeur physique sur les nœuds de l'élément. Cette formulation conduit à autant de fonctions élémentaires qu'il y a de nœuds dans l'élément.

L'approche des poids résiduels : Dans cette approche, les fonctions élémentaires sont extraites à partir des équations différentielles régissant le problème physique, sans avoir besoin de le formuler sous une forme variationnelle. C'est la procédure la plus générale. Elle peut utiliser la méthode des moindres carrées, la méthode de Galerkin ...etc.

**Étape 4 :** Le calcul et l'assemblage des matrices élémentaires Après l'extraction fonctions élémentaires, ces fonctions sont assemblées en une matrice à résoudre afin d'obtenir les valeurs numériques du champ physique modélisé pour chacun des nœuds. Cet assemblage se fait de manière naturelle puisque tous les éléments du système s'aboutent. [1]

## **II. Présentation des modèles numérique :**

Le présent travail consiste à simuler l'assemblage d'un microcomposant électronique sur un circuit imprimé. L'assemblage génère des contraintes résiduelles d'origine thermique provoquées par le cycle de fusion de la brasure. Les différentes simulations que nous avons menées illustrent l'impact d'un certain nombre de paramètres géométriques sur la répartition et l'intensité des contraintes. Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la brasure ainsi que ses propriétés sur la réponse thermomécanique de la microstructure.

## II. -1- Modèles Géométriques :

L'assemblage simulé est représenté par la figure III.1 est constitué des éléments suivants :

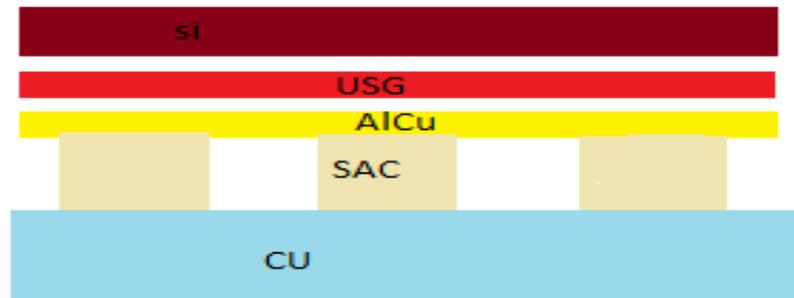
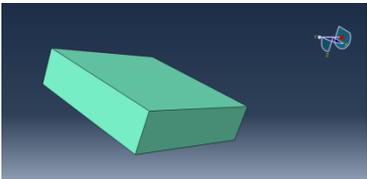
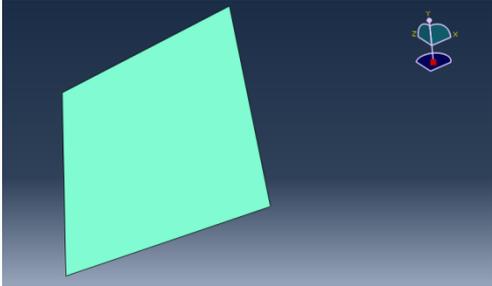
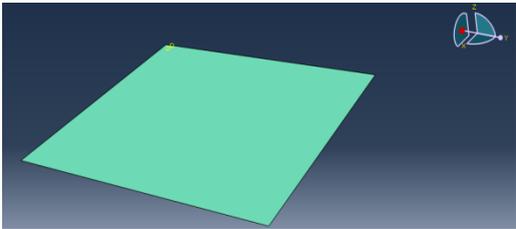
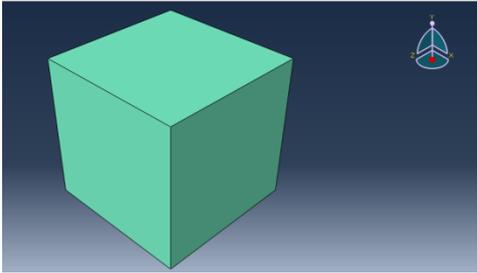
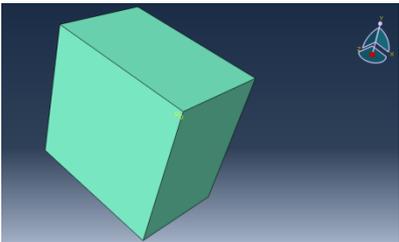


Figure III.1 : Représentation schématique du microcomposant simulé.

Le tableau suivant résume toutes les dimensions des pièces constituant notre microstructure.

**Chapitre III : analyse numérique des contraintes résiduelles dans les plaquettes de silicium avec motifs et homogénéisées**

Matériaux	Modèle	Géométrie
silicium (si)		$(1.5mm \times 1.5mm \times 0.4mm)$
Usg		$(1.5mm \times 1.5mm \times 0.4\mu m)$
Aluminium Cuivré [AlCu]		$(1.5mm \times 1.5mm \times 0.2\mu m)$
SAC (brasure en alliage SnAgCu)		$(1.5mm \times 1.5mm \times 0.4mm)$
Cuivre (Cu)		$(1.5mm \times 1.5mm \times 1mm)$

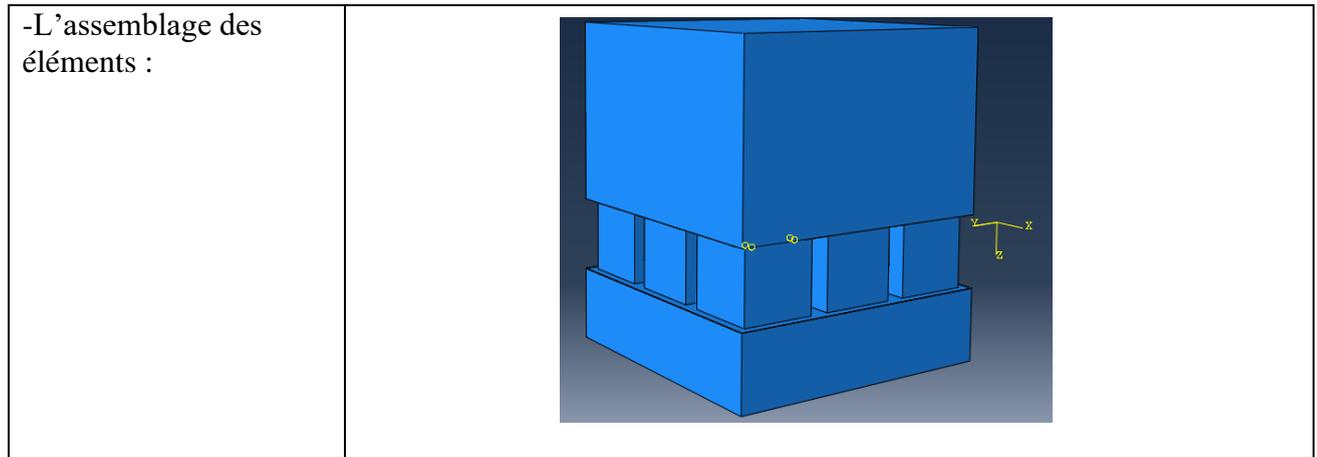


Tableau III.1 : Les différentes pièces constituant notre microstructure.

## II. -2-Matériaux :

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude présentent une certaine complexité. En effet contrairement à ce qu'on peut penser, nous ne disposons pas de bibliothèque des matériaux dans le logiciel Abaqus. Nous avons effectué des recherches bibliographiques pour constituer notre base de données matériaux. Cette dernière a été complétée par notre encadreur.

Les caractéristiques principales ainsi que les lois de comportement des matériaux sont résumées dans le tableau ci-après :

Nom	Coefficient de dilatation thermique( $\alpha$ )	Module d'Young E (GPa)	Coefficient du poisson $\nu$	Propriété elastoplastiques MPa ( $\sigma/\epsilon$ )
Silicium	2.8 e-006	131	0,3	
USG	2.67 e-006	90	0,3	
Aluminium cuivré (AlCu)	2.3 e-005	71	0.33	
(SAC)	2.2 e-005	45	0,3	(15/ 0) (25/ 0.006) (29/ 0.019) (30/ 0.052)
Cuivre	1.8 e-005	110	0,34	(0/33) (210/0.6)

Tableau III.2 : Les propriétés mécaniques utilisées dans les simulations.

## **II. -3-Maillage :**

Une bonne réalisation du maillage est essentielle pour obtenir des résultats cohérents. Cependant, certains composants de notre géométrie sont des couches minces avec une épaisseur micrométrique, il est nécessaire d'utiliser un maillage approprié.

Nous avons utilisé l'outil de maillage (Meshed) du logiciel Abaqus pour notre microstructure comme l'illustre la figure 43. La simulation a été réalisée avec un maillage comportant 31600 éléments de type C3D8R et de 39225 nœuds.

Le temps moyen de calcul pour le modèle homogénéisé est de 10min et 13 seconde.

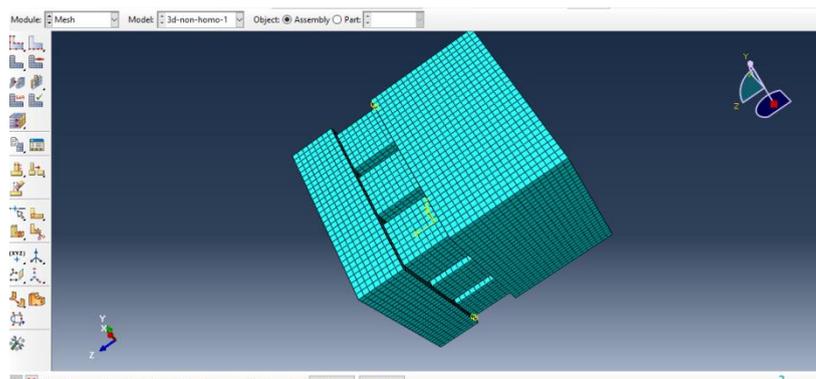


Figure III.2: maillage de la microstructure.

## **II. 4- Condition Aux Limites Et Chargement :**

### **II. .4.1. Condition Aux Limites :**

Les conditions aux limites sur lesquelles nous avons travaillé sont :

Un blocage en déplacement ( $U_y=0$ ) de la face libre du cuivre comme le montre la figure III.3

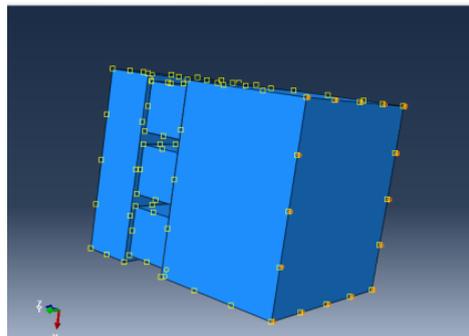


Figure III.3 : représentation des chargements

## II. 4.2. Condition de Chargement :

Dans toutes les simulations que nous avons réalisées, notre assemblage ne subit qu'à un chargement thermique qui représente l'assemblage par brasage du microcomposant sur le cuivre.

Dans le cas idéal, il faut reproduire le cycle thermique d'assemblage. Le cycle d'assemblage réel comporte une phase de chauffe, une autre de maintien à haute température et une troisième de refroidissement. Nous avons simplifié ce cycle thermique en prenant en compte le refroidissement jusqu'à la température ambiante (22°C). Le cycle de refroidissement (température/temps) utilisés comme conditions de chargement est représenté par la figure III.4

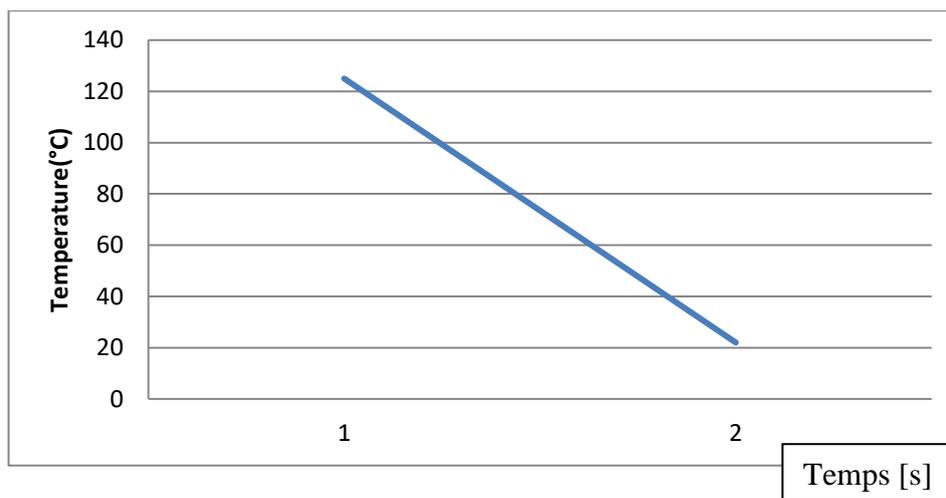


Figure III.4: Evolution de la température en fonction du temps durant la phase de refroidissement.

Remarque : le 1 et 2 ce sont des étapes qui ne sont pas des temps réels

## II. 5. Contact :

Le logiciel considère que les pièces dont les surfaces sont proches les unes des autres ont un contact de type fixe. On considère que notre contact est parfait. La figure suivante représente le type de contact.

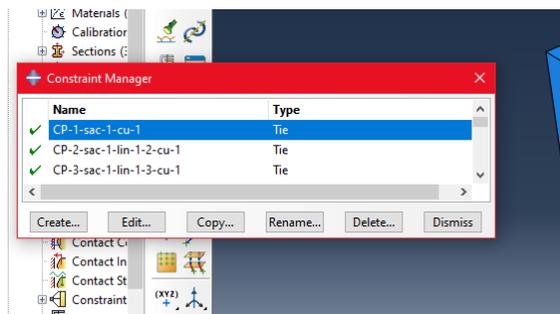


Figure III.5 : Le contact parfait utilisé dans les simulations

## II. 6. Etude De Sensibilité Au Maillage :

Le motif que nous avons utilisé dans notre étude comporte une géométrie complexe à cause de la présence de couches fines assemblées sur des éléments relativement épais.

Nous avons mené une étude de sensibilité au maillage pour fixer la taille optimale des éléments. Nous avons donc effectué des tests successifs avec un maillage de plus en plus raffiné, afin de voir si des différences se font sentir sur les résultats que nous obtenons. Le maillage est bloqué quand on constate l'absence d'influence sur les résultats obtenus. On peut donc valider notre modèle de ce point de vue.

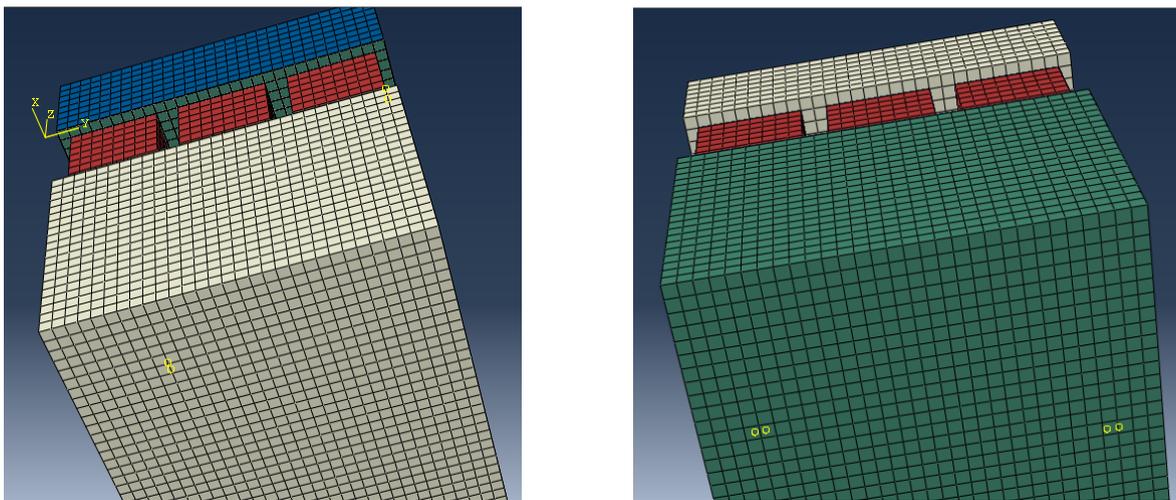


Figure III.6: maillage pour model non homogénéisé et homogénéisé.

## III. homogénéisation de notre structure :

Pour avoir les paramètres de la loi mixe (loi de mélange), on utilise les résultats obtenus par EasyPBC, le choix de cette loi nous a permis d'avoir un model équivalent dont le comportement est semblable à celui réel.

EasyPBC est un plugin ABAQUS CAE développé pour estimer les propriétés élastiques efficaces homogénéisées de l'élément de volume représentatif périodique (RVE) créé par l'utilisateur, le tout dans ABAQUS sans avoir besoin d'utiliser un logiciel tiers. Le plugin applique automatiquement les concepts de la méthode d'homogénéisation RVE périodique dans l'interface utilisateur du logiciel en catégorisant, créant et reliant les ensembles nécessaires pour obtenir des surfaces limites périodiques déformables, qui peuvent déformer et ne plus rester planes. De plus, il permet à l'utilisateur de bénéficier de données d'analyse par éléments finis dans l'interface ABAQUS CAE après avoir calculé les propriétés homogénéisées.[3]

Le logiciel de calcul Abaqus est utilisé pour réaliser ces calculs en petites déformations. Abaqus est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis.

Plusieurs propriétés mécaniques sont utilisées pour valider la technique. La robustesse de la technique d'homogénéisation est étudiée, dans un premier temps, en réalisant des identifications des propriétés mécaniques équivalentes c'est à dire on va calculer le module de Young, la contrainte de Von mises...etc. par la loi mix :  $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$  ensuite on introduit les propriétés mécaniques calculées pour un bimateriaux est on lance la simulation du model. Notons que l'homogénéisation à été utilisée pour remplacer l'empilement Si/USG/AlCu (voir tableau III.2) par un seul matériau équivalent. Les autres matériaux (SAC, Cu) restent inchangés.

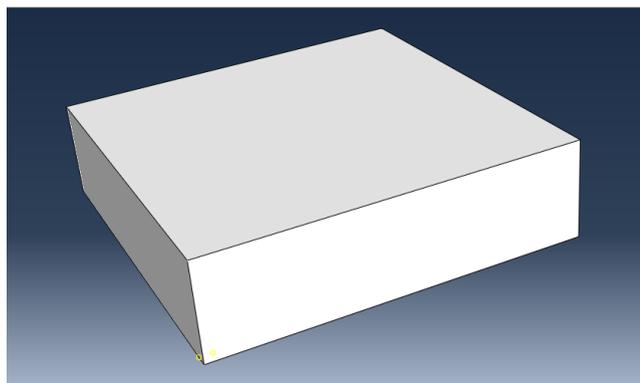


Figure III.7: le model équivalent (Si/USG/AlCu).

**Propriétés équivalentes :**

A laide de l'outil EasyPBC on a trouvé les propriétés équivalentes suivantes de l'empilement Si/USG/AlCu le long des 3 directions :

DERECTION	E(MPa)	V		G	densité	Masse total	Coefficient de dilatation
1	E <sub>11</sub> =79831 .0449219	V <sub>12</sub> =0.3012199 18933	V <sub>13</sub> =0.416541233004	G <sub>12</sub> =30659.70458 98	2.383 e-09	2.383 e- 09	$\alpha_{11}$ = 1.95 e - 005
2	E <sub>22</sub> =79831 .0449219	V <sub>21</sub> =0.30121 9930155	V <sub>23</sub> =0.41654125787	G <sub>23</sub> =404.1452063 7			$\alpha_{22}$ = 1.95 e - 005
3	E <sub>33</sub> =65476 .6210938	V <sub>31</sub> =0.34264 709583	V <sub>32</sub> =0.342647105143	G <sub>13</sub> =404.1452026 37			$\alpha_{33}$ = 9.68 e - 006

Tableaux III.3: les déférentes propriétés mécaniques équivalentes.

### Chapitre III : analyse numérique des contraintes résiduelles dans les plaquettes de silicium avec motifs et homogénéisées

Nous avons utilisé trois paramètres pour mener les comparaisons entre le modèle réel et son équivalent. Ainsi, la contrainte équivalente, le déplacement et la déformation plastique sont comparés. Les résultats de la comparaison sont résumés dans le tableau suivant :

	Von mises	Déformations plastique PE du motif	Déplacements(U)
Model non homogénéisé	$2.589 \text{ e}^{+02}$	$+6.980 \text{ e}^{-03}$	$+5.410 \text{ e}^{-03}$
Model homogénéisé	$3.478 \text{ e}^{+01}$	$+6.949 \text{ e}^{-03}$	$+4.402 \text{ e}^{-03}$

Tableaux III.4 : Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles.

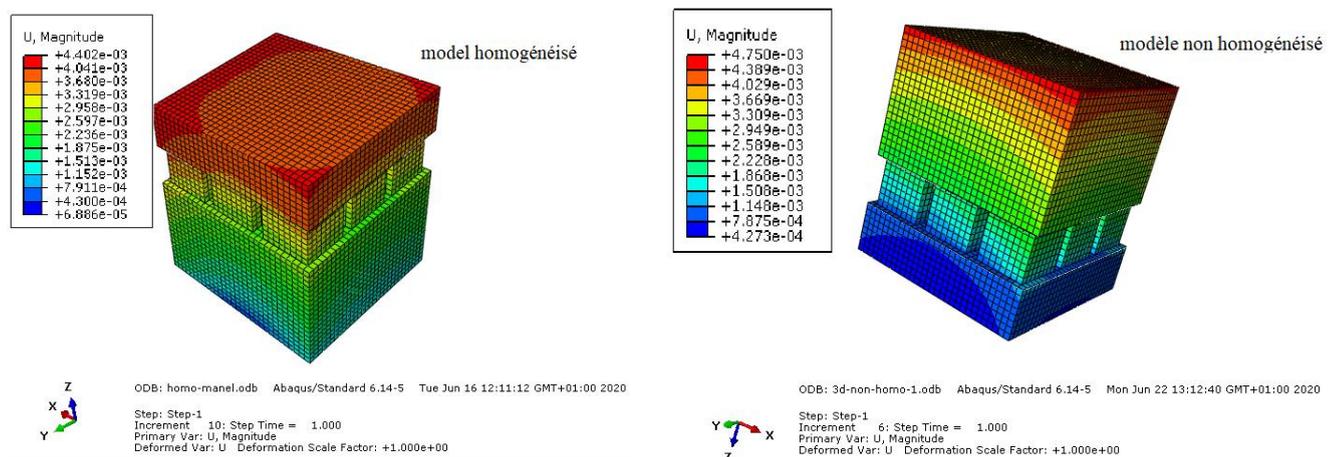


Figure III.8 : Comparaison des Déplacements des modèles homogénéisé et non homogénéisé.

La figure III.8 présente le déplacement simulé des 2 model. Nous pouvons constater les valeurs des déplacements entre les deux modèles sont différentes. Les zones qui enregistrent les déplacements les plus importants sont également différentes. Pour le modèle à gauche (homogénéisé) le déplacement max est sur le Si quant à celui de droite (non homogénéisé), le déplacement max est sur le Cu. Cela s'explique par le fait que la dilatation thermique pour 3 matériaux ne pas la même que pour 5 matériaux... Nous estimons que les erreurs sont acceptables pour mener des études paramétriques.

### Chapitre III : analyse numérique des contraintes résiduelles dans les plaquettes de silicium avec motifs et homogénéisées

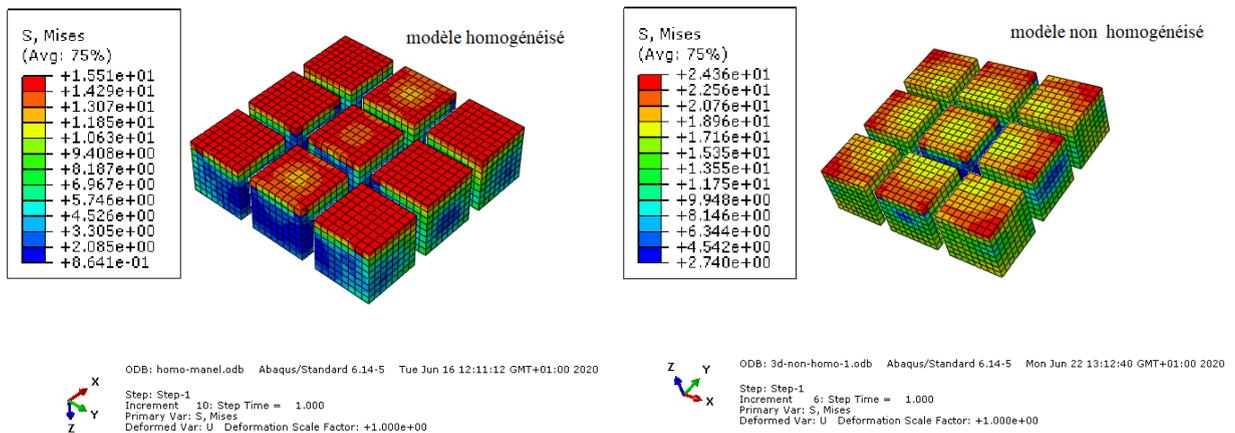
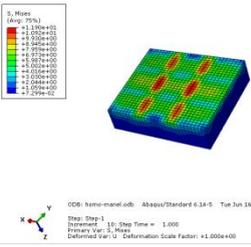
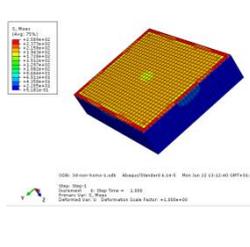
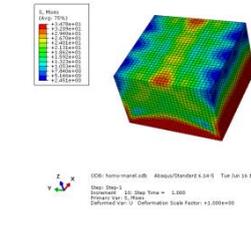
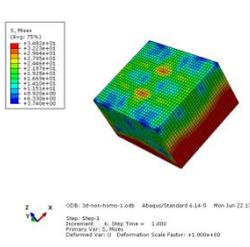


Figure III.9: Comparaison des déformations plastique de la brasure SAC obtenues par les modèles homogénéisé et non homogénéisé

La figure III.9 présente le résultat de déformation plastique sur le SAC. Les comparaisons des résultats montrent que les deux modèles présentent les mêmes zones de concentration de déformation plastique. Pour les valeurs maximales de déformation plastique, on constate une différence légère.

Matériaux model	Model homogénéisé		Model non homogénéisé	
	CONTRAİNTE DE VON MIESES (MPa)	schéma	CONTRAİNTE DE VON MIESES (MPa)	Schéma
Silicium/Si équivalent	$1.190 \text{ e}^{+01}$		$2.589 \text{ e}^{+02}$	
cuivre	$3.478 \text{ e}^{+01}$		$3.482 \text{ e}^{+01}$	

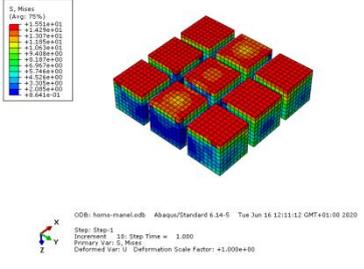
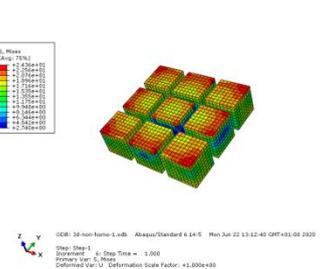
SAC	$1.551 e^{+01}$		$2.436 e^{+01}$	
-----	-----------------	---	-----------------	---

Tableau III.5 : Comparaison des contraintes de Von mises entre le modèle homogénéisé et non homogénéisé des 3 éléments (Si, Cu, SAC).

Le Tableau III.5 donne des comparaisons de contrainte de Von mises du model homogénéisé et non homogénéisé pour les 3 éléments (Si/Si équivalent, Cu/Cu, SAC/SAC). On observe que les zones de concentration des contraintes sont presque identiques dans les deux modèles. Quant aux valeurs de contraintes, le cuivre présente des valeurs très proches. Nous signalons des valeurs différentes pour les deux autres éléments (Sac et Si).

Important : Nous estimons que notre approche d’homogénéisation est loin d’être validée à cause de la forte dispersion des résultats notamment quant aux comparaisons qualitatives (zones de concentration). Notre approche d’homogénéisation nécessite un travail important et lourd notamment sur l’adaptation du maillage et le calcul des coefficients de dilatations thermiques équivalentes.

Pour le reste de notre travail, nous prenons le faible l’hypothèse que notre approche d’homogénéisation est validée. Nous allons alors utiliser le modèle homogénéisé pour mener certaines études paramétriques. Les résultats obtenus sont présentés dans le quatrième chapitre.

**Chapitre IV :**  
**Résultats et discussions.**

Dans cette partie du travail, nous allons présenter les résultats de notre étude paramétrique visant à identifier l'impact de l'épaisseur de la brasure sur les contraintes résiduelles et les déformations plastiques.

### I. Effets de l'épaisseur de la couche SAC sur les contraintes résiduelles:

Le but de la comparaison présentée dans cette partie est d'évaluer les effets de l'épaisseur du matériau SAC sur les amplitudes des contraintes dans notre motif. Dans une logique de miniaturisation (recherche d'actualité dans l'univers de la microélectronique), nous avons procédé à l'évaluation de l'effet d'une réduction de réduire l'épaisseur de la brasure de 20 et de 40 % sur les contraintes équivalentes. Ainsi, les épaisseurs étudiées sont : 400µm (100%), 320 µm (-20%) et 240 µm (-40%). Nous avons étudié l'impact de cette variation sur la répartition des les niveaux des contraintes équivalentes de Von Mises.

La répartition des contraintes équivalentes maximales pour les trois épaisseurs du SAC est illustrée par les figures IV.1, IV.2, IV.3

Pour la figure IV.1 donnant l'évolution des zones de concentration de la contraintes en fonction de l'épaisseur pour la brasure, on constate que les zones à forte concentration de contraintes sont les mêmes pour les trois épaisseurs. Elles sont localisées sur la face des brasures en contact avec le silicium. On conclue donc que l'épaisseur de SAC ne présente aucun effet sur les zones de concentration des contraintes.

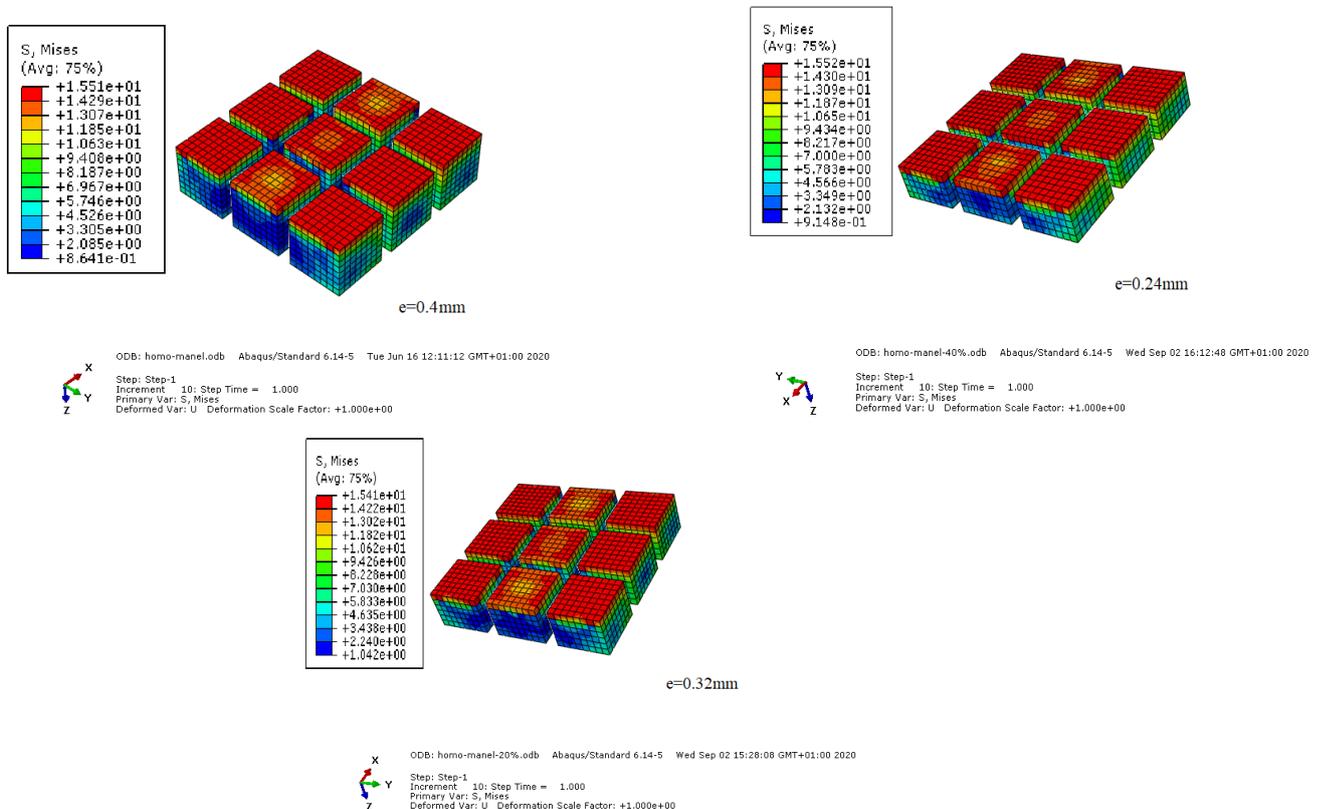


Figure IV.1 : Répartition des contraintes résiduelles dans les billes de brasures pour les 3 épaisseurs

La figure IV.2, montrant la répartition des contraintes équivalentes maximales dans le silicium pour les trois épaisseurs de la brasure, illustre une forte concentration de contraintes au milieu de la puce en Si (zones rouges). Cette remarque est identique quelque soit l'épaisseur de la brasure. On peut dire que l'évolution de l'épaisseur de la brasure n'impact pas la localisation des zones à fortes concentration de contraintes.

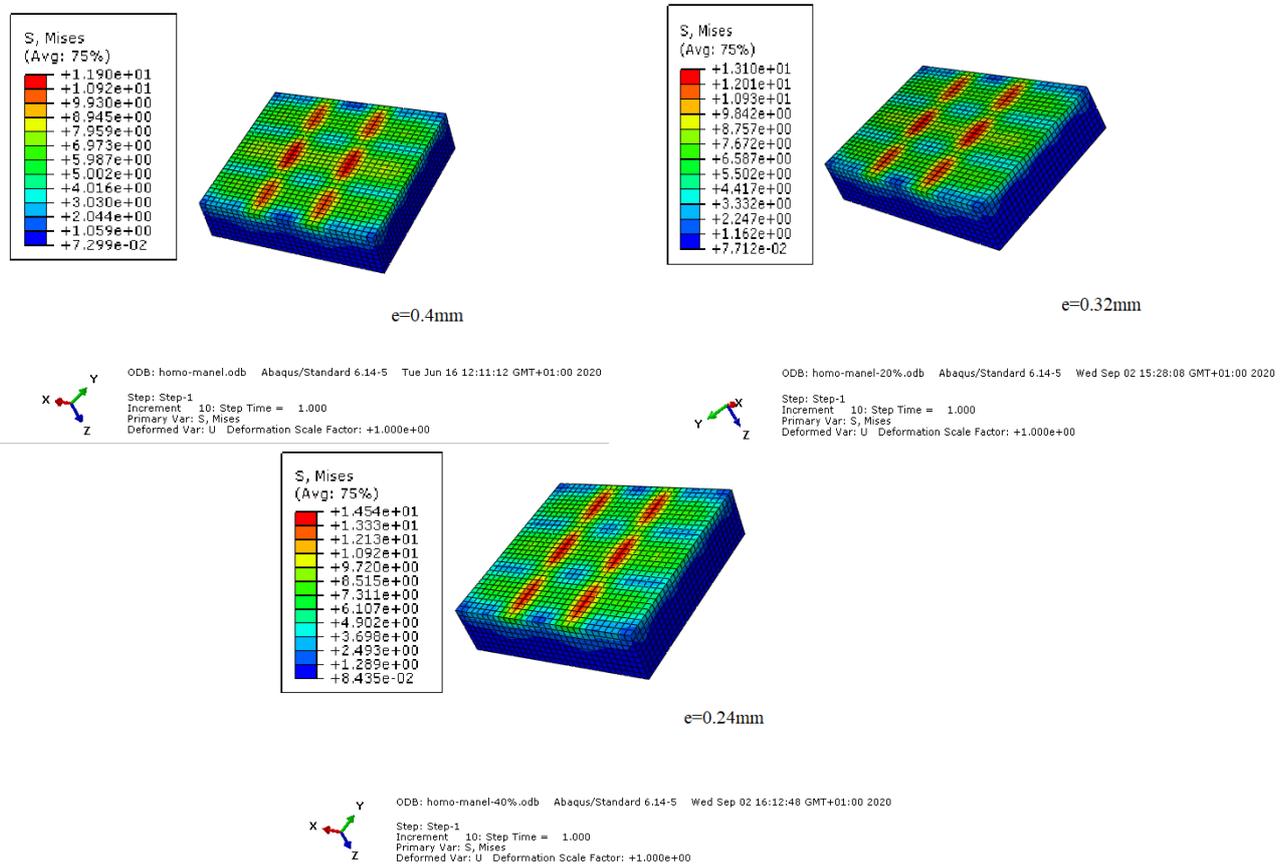


Figure IV.2 : Répartition des contraintes résiduelles dans le Silicium pour les 3 épaisseurs

La figure IV.3, offrant une vue de la répartition des contraintes maximales dans le cuivre, indique une forte concentration des contraintes au niveau de la partie encastée. La remarque est la même pour les trois épaisseurs de la brasure. L'effet de l'épaisseur de la brasure sur la localisation des contraintes dans le cuivre est négligeable.

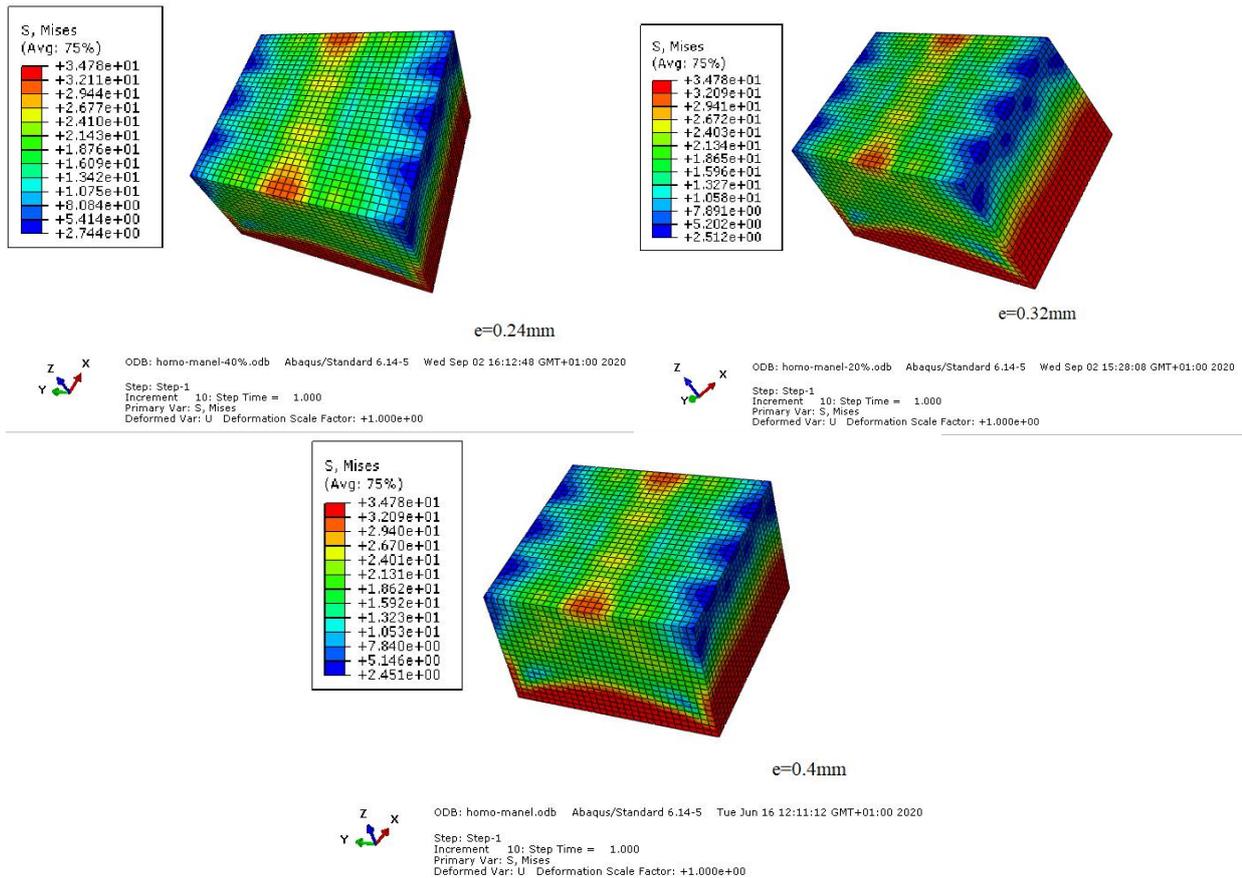


Figure IV.3 : Répartition des contraintes résiduelles dans le cuivre pour les 3 épaisseurs

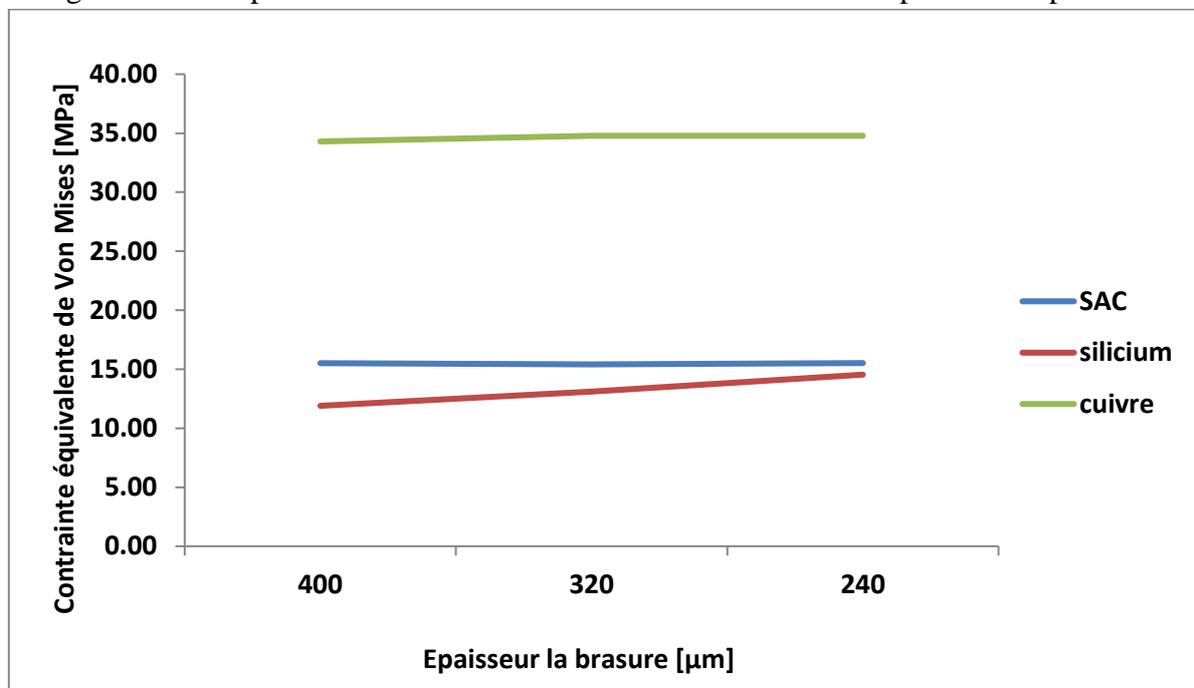


Figure IV.4 : Evolution de la contrainte équivalente de Von miss en fonction de l'épaisseur de la brasure.

La figure IV.4 donne une comparaison quantitative des valeurs de contraintes maximales de Von Mises en fonction de l'épaisseur de la brasure. On constate que le cuivre et le SAC ne présente pas de sensibilité à l'épaisseur de la brasure puisque les valeurs des contraintes demeurent presque constantes pour les trois épaisseurs. Quant au silicium, on remarque une légère augmentation de la contrainte avec la diminution de l'épaisseur de la brasure. Notons également que le silicium et la brasure présentent des valeurs de contraintes comparables.

## II. Effets de l'épaisseur de la couche SAC sur les déformations plastiques:

Les répartitions des déformations plastiques dans le SAC sont données par les figures IV.5. On constate que les zones à forte concentration de déformation plastique sont les mêmes pour les trois épaisseurs. Ces zones à risque sont localisées sur les brasures situées sur l'extérieure de la face du microcomposant.

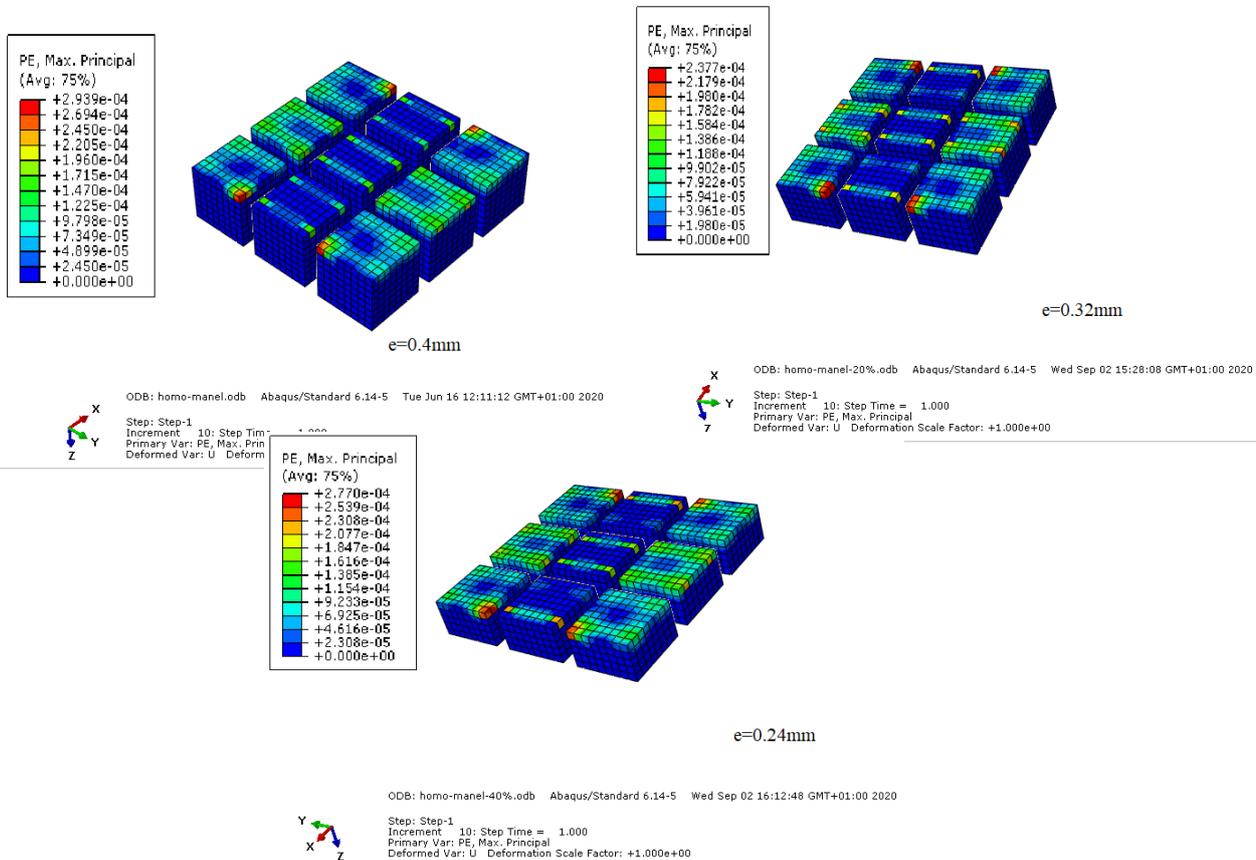


Figure IV.5 : Répartition des déformations plastiques dans les brasures pour les trois épaisseurs.

La répartition de la déformation plastique dans le cuivre pour les trois épaisseurs est donnée par la figure IV.6. Sur les trois images formant la figure, on observe une forte concentration de la déformation plastique sur la face en contact avec la brasure.

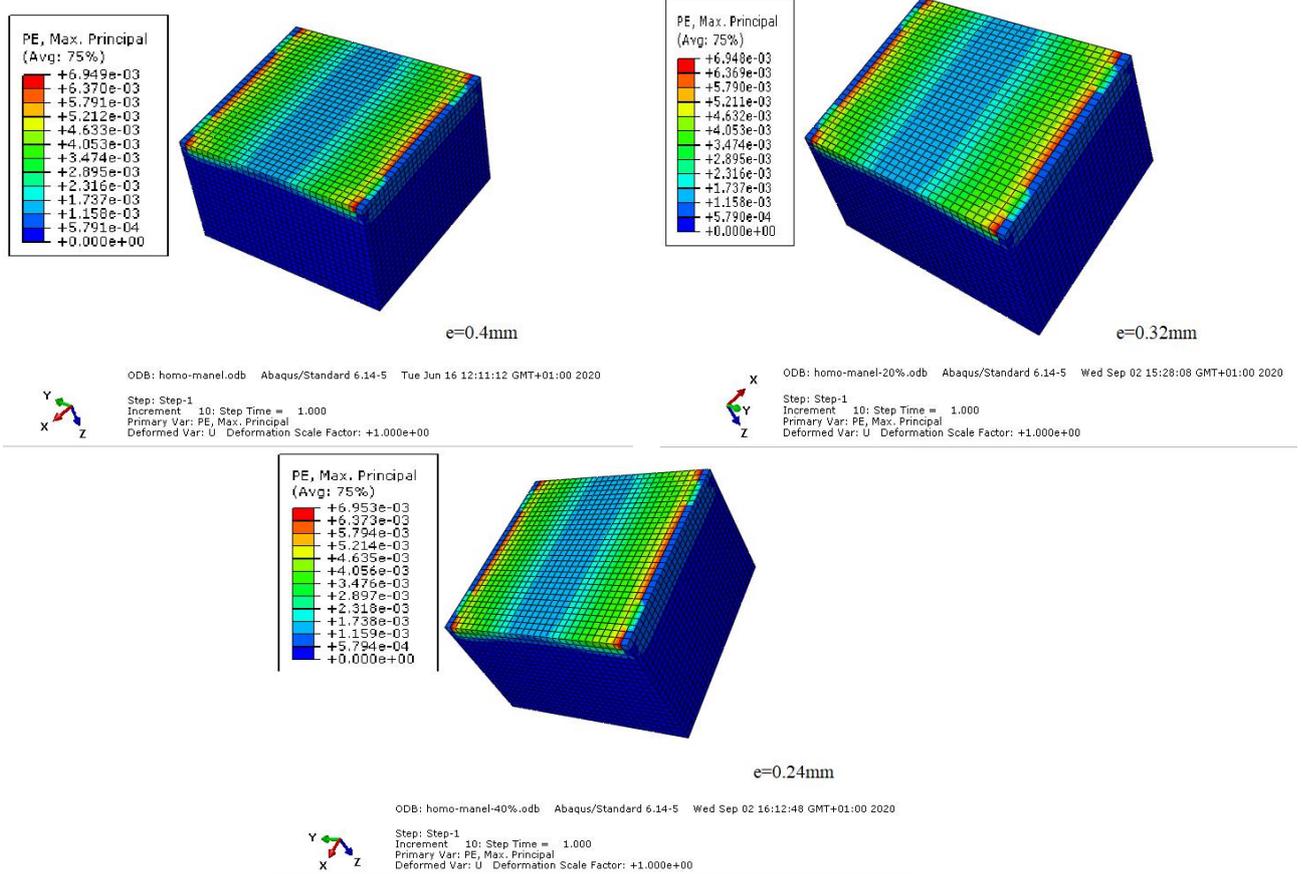


Figure IV.6 : Comparaison des résultats des déformations plastiques pour les 3 model (effet de l'épaisseur 100%, 20%, 40%) du matériau Cuivre.

L'évolution de la déformation plastique en fonction de l'épaisseur de la brasure pour la brasure et pour le cuivre est donnée par la figure IV.7. On constate que le cuivre présente un niveau plus élevé de déformation plastique par rapport à la brasure. On constate également une très faible sensibilité de la déformation plastique en fonction de l'épaisseur de la brasure.

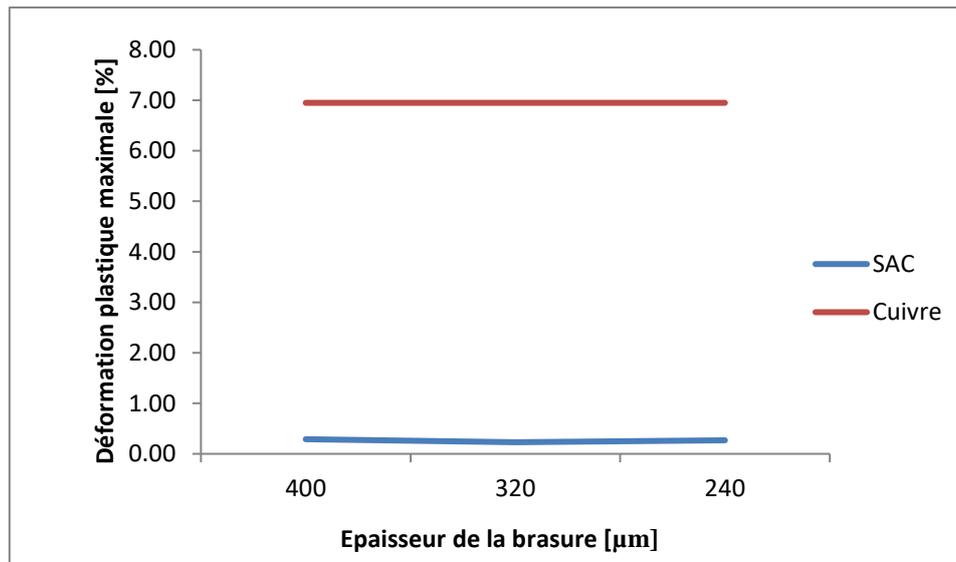


Figure IV.7: Evolution de la déformation plastique en fonction de l'épaisseur.

### III. Conclusion :

Nous avons étudié par ces travaux de simulation, les effets de l'épaisseur du matériau SAC sur le comportement thermomécanique d'un microcomposant électronique à géométrie et propriétés équivalentes. Les analyses de résultats obtenus ont été présentées sous formes de comparaisons. Les résultats obtenus montrent que :

Les contraintes et les déformations sont très faiblement sensibles à l'évolution de l'épaisseur de la brasure.

# Conclusion générale

Dans le domaine de la microélectronique, de nouveaux matériaux et microstructures sont en cours de développement. Ce développement ne se fera pas sans l'utilisation d'outils de conception et de simulation modernes. La simulation numérique par éléments finis est considérée comme une solution prometteuse dans l'estimation des comportements thermomécaniques des microcomposants électronique.

Le présent travail consistait à estimer numériquement le comportement thermomécanique provoqué par le refroidissement d'un microcomposant électronique. Nous avons utilisé la méthode d'homogénéisation pour réduire les temps de calcul. L'effet de l'épaisseur de la brasure sur le niveau et la répartition des contraintes dans les différentes couches a été évalué.

Nous pouvons organiser les principaux résultats obtenus dans les points suivants :

- Les recherches bibliographiques nous ont permis de comprendre les techniques de fabrications des microcomposants électroniques.
- Des connexions étroites entre l'électronique et la mécanique des matériaux rendre obligatoire l'étude du comportement thermomécanique des microcomposants avant de les mettre sur le marché.
- Les contraintes résiduelles dépassant un certain niveau peuvent avoir un impact négatif sur la qualité et la fiabilité.
- La simulation numérique par éléments finis est une solution relativement simple à utiliser pour estimer les contraintes résiduelles.
- La méthode d'homogénéisation est une solution prometteuse pour réduire les temps de calcul des microcomposants sachant que les microstructures sont très complexes.
- Les simulations numériques montrent des zones de forte concentration de contraintes et de déformation plastiques. Ces zones à surveiller représente d'éventuels points de défaillances.
- La réduction de l'épaisseur de la brasure ne présente qu'un effet minime sur le niveau et la répartition des contraintes et des déformations.

Ce projet de fin étude nous a réellement été enrichissant. Nous avons pu améliorer nos connaissances sur la modélisation numérique sous ABAQUS. Nous avons également beaucoup appris sur les comportements mécaniques et thermiques des matériaux ainsi que sur les méthodes d'interprétation des résultats. De plus ce projet nous a permis de découvrir une nouvelle application de la mécanique et de découvrir l'importance de la mécanique dans tous les domaines.

# *Bibliographie*

- [1] : Henri Lilen, une brève histoire de l'électronique, le 03/11/2003 France.
- [2] : LIU Yiyu ; YUAN Sib0, Caractérisation de la résistance mécanique des interconnexions (composants électroniques/circuits imprimés) : approches numérique et expérimentale, PROJET DE FIN D'ETUDES, UNIVERSITE FRANCOIS-RABELAIS DE TOURS, page du 14 au 22.
- [3] : Makhloufi Mahmoud, Sidi yekhlef Abderrezak, Etude Numérique De La Fiabilité Thermomécanique D'un micro Composant Electronique, Projet de fin d'études Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent,, 2016/2017 page du 15 au 23.
- [4] : Thibaut Pengam, LES WAFERS DE SILICIUM, Université de NANTES, 1010/1011, page du 4 au 10.
- [5]: M. NEHILA Louafi M. MOUSSA BOUDJEMA Fethi Analyse des contraintes thermomécanique dans les assemblages des microcomposants électroniques Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016/2017page du 17 Au 21.
- [6]. Matthieu Berthou, « Fiabilité des assemblages sans plomb en environnement sévère », Thèse doctorat Université Bordeaux 1, 2012.
- [7]. [https://cours.etsmtl.ca/mec200/.../Cours\\_7\\_Melanges\\_Diagrammes\\_de\\_phases.pdf](https://cours.etsmtl.ca/mec200/.../Cours_7_Melanges_Diagrammes_de_phases.pdf)
- [8]. Jean Yves Delétage, « Etude de la durée de vie dassemblage microélectronique par l'utilisation de simulation de modèle de dégradation et de circuit intégré spécifiques de test », Thèse doctorat, Université Bordeau 1, 2003.
- [9]. Karl Ring, « Reliability Issues with Lead-free Solders », Fraunhofer-IZM.
- [10]. Soufyane Belhenini, « Etude de structures de composants microélectroniques innovants (3D) Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, 2013.
- [11]: Nicolas COUSIN, Adrien MONTIGNY ; MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT D'UN MICROCOMPOSANT SOUMIS A UN CHARGEMENT THERMOMECHANIQUE ; Projet de Fin d'Etudes ;page 9
- [12] : M. NEHILA Louafi ; M. MOUSSA BOUDJEMA Fethi, Analyse des contraintes thermomécanique dans les assemblages des microcomposants électroniques, Projet de fin d'études, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016/2017.page du 32 au 36.
- [13]: Julien PATRU, Julien PATRU , Modélisation du Développement des Contraintes Résiduelles au Sein de Dépôts Plasma de Zircon et d'Acier. THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES 2005. Du 57 au 66.

[14] :Lionel GENDRE ,La résolution d'un modèle éléments finis : 1. Du modèle aux équations,université paris-saclay, le 10/01/2013page :2-4

[15] : Srihari Kurukuri. A Review of Homogenization Techniques for Heterogeneous Materials, March'2004.page: 2, 3

[16]: P. Millithaler<sup>1</sup>; 2, E. Sadoul et-Reboul<sup>2</sup>, M. Ouisse<sup>2</sup>, J.-B. Dupont<sup>1</sup>, N. Bouhaddi<sup>2</sup>, Article de 3D homogenization: identification of equivalent anisotropic Material properties of heterogeneous structures and dynamic Application on preloaded finite element models and super elements, Ecully Cedex, France, page: 10,11

[17] :Srihari Kurukuri, A Review of Homogenization Techniques for Heterogeneous Materials, Bauhaus Universität, Weimar March'2004page de 13 au 15.

Pour la géométrie des matériaux, a été donnée par notre encadreur.

(CTE): coefficient of thermal expansion

SAC : Désigne les alliages sans plomb de type SnAgCu utilisés pour l'assemblage par brasage des composants électroniques.

Usg : Undoped Silicate Glass : couche diélectrique (passivation)