



HAL
open science

Fiabilité des systèmes électroniques multiphysiques en environnement critique : application à l'optimisation des composants BGA

Sinda Ghenam

► **To cite this version:**

Sinda Ghenam. Fiabilité des systèmes électroniques multiphysiques en environnement critique : application à l'optimisation des composants BGA. Génie mécanique [physics.class-ph]. Normandie Université; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2023. Français. NNT : 2023NORMIR19 . tel-04516042

HAL Id: tel-04516042

<https://theses.hal.science/tel-04516042v1>

Submitted on 22 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **MECANIQUE DES FLUIDES, ENERGETIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION,
ACOUSTIQUE**

Préparée au sein de l'**INSA Rouen Normandie**

En cotutelle internationale avec l'**Université de Sfax-Tunisie, TUNISIE**

**Fiabilité des systèmes électroniques multiphysiques en
environnement critique : application à l'optimisation des
composants BGA**

Présentée et soutenue par
SINDA GHENAM

Thèse soutenue le 21/09/2023
devant le jury composé de :

M. ELHEM GHORBEL	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - CY Cergy Paris Université	Rapporteur
M. MOHAMED ICHCHOU	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - École Centrale de Lyon	Rapporteur
M. MOHAMED HADDAR	PROFESSEUR - École Nationale d'Ingénieurs de Sfax - ENIS	Membre Co-encadrant
M. ABDELGHANI SAOUAB	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - Université Le Havre Normandie	Membre
M. LASSAAD WALHA	PROFESSEUR - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax	Membre
M. JEAN-YVES CHOLEY	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - SAE- SUPMECA Institut Supérieure de Mécanique de Paris	Président du jury
M. ALI AKROUT	PROFESSEUR - ECOLE D'INGENIEURS DE SFAX	Directeur de thèse
M. ABDELKHALAK EL HAMI	PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS - INSA de Rouen Normandie	Directeur de thèse

Thèse dirigée par **ALI AKROUT** (LABORATOIRE DE RECHERCHE DE MECANIQUE, MODELISATION
ET PRODUCTION) et **ABDELKHALAK EL HAMI** (LABORATOIRE DE MECANIQUE DE NORMANDIE)



THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité MECANIQUE DES FLUIDES, ENERGETIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION,
ACOUSTIQUE

Préparée au sein de l'INSA Rouen Normandie

En cotutelle internationale avec Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie

« Fiabilité des systèmes électroniques multiphysiques en environnement critique : application à l'optimisation des composants BGA »

Présentée et soutenue par
Sinda GHENAM

Thèse soutenue publiquement le (21 / 09 / 2023)
devant le jury composé de

M. JEAN YVES CHOLEY	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ISAE-SUPMECA	PRÉSIDENT
M. MOHAMED ICHCHOU	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ECOLE CENTRALE DE LYON	RAPPORTEUR
MME ELHEM GHORBEL	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE	RAPPORTEUR
M. LASSAAD WALHA	PROFESSEUR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX	EXAMINATEUR
M. ABDELGHANI SAOUAB	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, UNIVERSITE LE HAVRE NORMANDIE	EXAMINATEUR
M. ABDELKHALEK EL HAMI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA DE ROUEN	DIRECTEUR DE THÈSE
M. ALI AKROUT	PROFESSEUR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX	DIRECTEUR DE THÈSE
M. HADDAR MOHAMED	PROFESSEUR, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE SFAX	CO-ENCADRANT

Thèse dirigée par :

M. Abdelkhalak EI HAMI (Laboratoire de Mécanique de Normandie)

M. Ali AKROUT (Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Productique)

L'électronique occupe une place prépondérante dans notre société moderne, jouant un rôle essentiel dans les domaines des communications, de l'informatique et de l'industrie. La fiabilité des composants électroniques est primordiale pour garantir des performances durables et un fonctionnement optimal des appareils électroniques. Parmi les nombreux composants des systèmes électroniques, les joints de soudure, en particulier ceux utilisés dans les composants Ball Grid Array (BGA), jouent un rôle crucial dans la connexion fiable des composants. Cette recherche s'inscrit dans une approche rigoureuse et méthodique visant à étudier en détail la fiabilité et à optimiser la conception des joints de soudure pour les composants BGA. Pour atteindre ces objectifs, des outils de modélisation numérique tels que ANSYS Workbench et APDL ont été utilisés pour simuler et analyser le comportement des joints de soudure. De plus, l'utilisation de MATLAB en conjonction avec ANSYS a permis d'optimiser les paramètres de conception des joints de soudure. L'étude se concentre sur l'identification des principaux facteurs de défaillance des joints de soudure, en tenant compte de variables telles que la géométrie, les matériaux, les conditions de refusion et les contraintes thermomécaniques. Une attention particulière a été accordée au couplage électro-thermomécanique des joints de soudure, afin de comprendre son impact sur la fiabilité des composants BGA. Dans le cadre de cette recherche, trois générations principales d'alliages de joints de soudure ont été étudiées. Une analyse de fatigue a été réalisée pour évaluer la performance et la fiabilité de ces alliages, ce qui a permis de sélectionner l'alliage le plus fiable parmi les trois. Des simulations avancées ont été effectuées pour analyser le comportement des joints de soudure dans différentes conditions de charge, évaluant ainsi leurs performances mécaniques et leur fiabilité. L'optimisation déterministe (DDO) a été utilisée pour améliorer la conception des joints de soudure et optimiser leurs performances mécaniques. De plus, une approche d'optimisation de la fiabilité (RBDO) a été développée pour prendre en compte les incertitudes liées aux matériaux, aux conditions de charge et au vieillissement des joints de soudure. Cette approche permet d'améliorer la prise de décision en matière de conception en prenant en considération les aspects de fiabilité. Cette thèse présente une approche approfondie et complète, combinant des outils de modélisation numérique tels que ANSYS Workbench, APDL et MATLAB, pour optimiser les joints de soudure des composants BGA. Les principaux objectifs de cette recherche sont d'identifier les facteurs de défaillance, d'étudier le couplage électro-thermomécanique des joints de soudure, de sélectionner l'alliage le plus fiable parmi les trois

généralisations étudiées, et enfin, d'améliorer la conception des joints de soudure par l'optimisation déterministe (DDO). Le but ultime de cette étude est d'augmenter la fiabilité et l'efficacité des joints de soudure dans les composants BGA en utilisant une approche intégrée de modélisation numérique et d'optimisation, tout en prenant en compte les aspects de couplage électro-thermomécanique et les incertitudes liées aux matériaux, aux conditions de charge et au vieillissement.

Abstract

Electronics play a crucial role in our modern society, encompassing areas such as communications, computing, and industry. The reliability of electronic components is essential to ensure sustainable performance and optimal operation of electronic devices. Among the various components in electronic systems, solder joints, particularly those used in Ball Grid Array (BGA) components, play a critical role in reliable component interconnection. This research follows a rigorous and systematic approach aimed at studying the reliability and optimizing the design of solder joints for BGA components. To achieve these objectives, advanced numerical modeling tools such as ANSYS Workbench and APDL were employed to simulate and analyze the behavior of solder joints. Additionally, the utilization of MATLAB in conjunction with ANSYS facilitated the optimization of solder joint design parameters. The study primarily focuses on identifying the key failure factors associated with solder joints, taking into consideration various variables such as geometry, materials, reflow conditions, and thermomechanical stresses. Special attention has been given to studying the electro-thermo-mechanical coupling effects of solder joints to understand their impact on the reliability of BGA components. Within this research framework, three main generations of solder alloy compositions have been investigated. Fatigue analysis was conducted to evaluate the performance and reliability of these alloys, leading to the selection of the most reliable alloy among the three. Advanced simulations were carried out to analyze the behavior of solder joints under different loading conditions, thus assessing their mechanical performance and reliability. Deterministic Design Optimization (DDO) techniques were employed to enhance solder joint design and optimize their mechanical performance. Furthermore, a Reliability-Based Design Optimization (RBDO) approach was developed to account for uncertainties associated with materials, loading conditions, and solder joint aging. This approach enhances the decision-making process in design by considering reliability aspects. This thesis presents a comprehensive and thorough approach, integrating numerical modeling tools such as ANSYS Workbench, APDL, and MATLAB, to optimize solder joints in BGA components. The main objectives of this research are to identify failure factors, study the electro-thermo-mechanical coupling effects of solder joints, select the most reliable alloy among the studied generations, and ultimately improve solder joint design through Deterministic Design Optimization (DDO). The ultimate goal of this study is to enhance the reliability and efficiency of solder joints in BGA components, utilizing an integrated approach of numerical modeling and optimization

while considering the aspects of electro-thermo-mechanical coupling and uncertainties associated with materials, loading conditions, and aging.

Abbreviations

BGA Ball Grid Array

PCB Printed Circuit Board

FEM Finite Element Method

CTE Coefficient Thermal Expansion

JEDEC Joint Electron Device Engineering Council

IMC Intermetallic Compound

DDO Deterministic Design Optimisation

RBDO Reliability-Based Design Optimisation

Symboles

λ Conductivité thermique

α Coefficient de dilatation thermique

C_p Chaleur spécifique à pression constante

E Module d'élasticité

ρ Densité

ν Coefficient de Poisson

ρ Résistivité électrique

$\Delta\varepsilon_p$ Amplitude de la déformation plastique

r_0 Rayon initial

h_0 Hauteur initiale

$\{x_0\}$ Variables de conception initiales

$\{y_i^*\}$ Variables du point de conception

$\{x_i^*\}$ Variables de la solution optimale

β Indice de fiabilité

β_t Indice de fiabilité cible

T Température

V Tension

θ : Coefficient de ductilité à la fatigue
 γ : Exposant de ductilité à la fatigue
 $\{x\}$ Vecteur des variables de conception
 $F(x)$ Fonction objective
 $g_k(x)$ Contraintes d'inégalité
 $h_j(x)$ Contraintes d'égalité
 x_L Bande inférieure
 x_u Bande supérieure
 a Semi-grand axe (plus grande dimension)
 b Semiminor axis (plus petite dimension)
 AF Facteur d'accélération
 N_f Nombre de cycles d'essai jusqu'à la rupture
 N_r Nombre de cycles réels jusqu'à la rupture
 m Exposant de Norriz-Landzberg
 ΔT_f Plage de température appliquée pendant l'essai thermique
 ΔT_r Plage de température opérationnelle

Table des matières

Chapitre 1 : Contexte et problématique de la thèse	16
1.1 INTRODUCTION	17
1.2 PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE	18
1.3 OBJECTIFS DE LA THÈSE	19
1.4 CONTEXTE CONCEPTUEL DU PROBLÈME.....	20
1.5 MOTIVATION DE LA RECHERCHE.....	21
1.6 DÉMARCHE DE LA THÈSE	21
1.7 ARCHITECTURE DE LA THÈSE	24
Chapitre 2 : Revue de la littérature	27
2.1 INTRODUCTION	29
2.2 SYSTÈMES MÉCATRONIQUES	29
2.2.1 Définition de la mécatronique.....	30
2.2.2 Définition du système mécatronique.....	31
2.2.3 Processus de développement d'un système mécatronique.....	31
2.2.4 Cycles de vie d'un système mécatronique	32
2.2.5 Modes de défaillances dans les systèmes mécatroniques	33
2.2.5.1 Défaillance électrique	33
2.2.5.2 Défaillance thermique.....	34
2.2.5.3 Défaillance mécanique	34
2.2.5.4 Défaillance logicielle	35
2.3 LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES	35
2.3.1 Les types de Boîtiers électroniques.....	35
2.3.1.1 Boîtiers par insertion	35
2.3.1.2 Boîtiers pour montage en surface (SMT)	36
2.3.2 Composition des Boîtiers électroniques.....	40
2.3.2.1 Les boîtiers en plastique	40
2.3.2.2 Les boîtiers en métal.....	40
2.3.2.3 Les boîtiers en céramique	40
2.3.2.4 Les boîtiers en verre	41

2.3.2.5	Les boîtiers hybrides.....	41
2.3.3	Rôles des composants électroniques.....	42
2.3.4	Niveaux d'emballage et des interconnexions.....	43
2.3.4.1	Emballage des composants électroniques.....	43
2.3.4.2	Emballage des cartes électroniques.....	44
2.3.4.3	Emballage des systèmes complets.....	44
2.3.5	Assemblage et technologie d'interconnexion.....	45
2.3.5.1	Assemblage par brasage.....	45
2.3.5.2	Assemblage par collage.....	46
2.3.5.3	Assemblage par impression.....	47
2.4	LES COMPOSANT ÉLECTRONIQUES BGA.....	47
2.4.1	Définition du composant BGA.....	47
2.4.2	Les Propriétés électro-thermomécaniques du composant BGA.....	47
2.4.3	Fonctionnement du composant BGA.....	48
2.4.4	Le BGA dans les systèmes mécatroniques industriels.....	49
2.5	LES MECANISMES DE DEFAILLANCE DU COMPOSANT BGA.....	50
2.5.1	Fatigue thermique.....	51
2.5.2	Fracture fragile.....	52
2.5.3	Deformation plastique.....	52
2.5.4	Le délaminage.....	53
2.6	MODÈLES DE FATIGUE.....	53
2.7	CONCLUSION.....	56

Chapitre 3 : Modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique 57

3.1	INTRODUCTION.....	59
3.2	PRÉSENTATION DU COUPLAGE MULTIPHYSIQUE.....	60
3.2.1	Définitions du Couplage multiphysique.....	60
3.2.2	Types de Couplage multiphysique.....	60
3.2.2.1	Couplage faible (Couplage séquentiel).....	60
3.2.2.2	Couplage fort (couplage simultané).....	61
3.2.2.3	Couplage hybride.....	62
3.2.3	Exemples de phénomènes multi-physique.....	62
3.2.3.1	Le couplage thermo-mécanique.....	62

3.2.3.2	Le couplage électromécanique	63
3.2.3.3	Le couplage fluide-structure	63
3.3	MODÉLISATION DU COUPLAGE ÉLECTRO-THERMIQUE	63
3.3.1	Effet Peltier	64
3.3.2	Effet Seebeck	64
3.3.3	Effet joules	66
3.3.4	Analogie électrique-thermique.....	66
3.4	EQUATIONS FONDAMENTALES DU COUPLAGE THERMO-MECANIQUE	67
3.4.1	Transfert thermique au sein du composant BGA.....	67
3.4.1.1	Transfert par conduction.....	68
3.4.1.2	Transfert par convection	69
3.4.1.3	Transfert par rayonnement.....	70
3.4.2	Modélisation thermomécanique.....	70
3.5	MODELISATION DU COUPLAGE ELECTRO-THERMOMECANIQUE	72
3.6	APPROXIMATION PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	73
3.6.1	Méthode des éléments finis (EF)	73
3.6.2	Le logiciel ANSYS	74
3.6.2.1	ANSYS Workbench.....	75
3.6.2.2	ANSYS APDL.....	76
3.7	CHARGEMENTS APPLIQUÉS	76
3.8	RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE ELECTRO-THERMOMECANIQUE DU COMPOSANT BGA	79
3.8.1	Calcul des déplacements	79
3.8.2	Effet de charge électrothermique sur le déplacement	82
3.8.3	Effet de charge électrothermique sur la déformation plastique	83
3.9	DETERMINATION DES ZONES DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES.....	85
3.10	FORMATION DE LA COUCHE IMC	89
3.11	CONCLUSION	92
 Chapitre 4 : Etude comparative et choix de l'alliage des joints de brasure.....		93
4.1	INTRODUCTION	94
4.2	ETUDE DES ALLIAGES DES JOINTS DE BRASURE	95
4.2.1	Etat de l'art des alliages des joints de brasure	95

4.2.2	Présentation des lois de comportement des joints de brasure	99
4.2.3	Modèles unifiés viscoplastiques	100
4.3	PRÉSENTATION DU SYSTÈME BGA	101
4.4	METHODOLOGIE DE L'ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES ALLIAGES.....	105
4.5	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	106
4.5.1	Étude de l'état de contrainte initial des alliages de brasage	107
4.5.2	Comparaison de l'effet de la charge électrothermique sur différents alliages de soudure.....	109
4.5.2.1	Étude de la contrainte équivalente de VonMises des alliages de soudure	109
4.5.2.2	Étude de la déformation des alliages des joints de soudure	110
4.5.2.3	Impact de la densité d'énergie de déformation sur les des alliages de soudure ..	114
4.5.3	Comparaison des différentes compositions d'alliages de soudure avec IMC	115
4.5.3.1	Étude du cyclage thermique sur la contrainte équivalente des alliages de joints de soudure	116
4.5.3.2	Étude du cyclage thermique sur la déformation des alliages de joints de soudure	117
4.5.4	Résumé.....	119
4.6	CONCLUSION	121

Chapitre 5 : Optimisation fiabiliste des joints de brasure du composant BGA 123

5.1	INTRODUCTION	124
5.2	OPTIMISATION DES JOINTS DE BRASURES	125
5.2.1	Definition	125
5.2.2	Etat de l'art des méthodes d'optimisation pour le composant BGA.....	126
5.3	DÉMARCHE DU TRAVAIL.....	127
5.4	CARACTERISATION DU VOLUME DU JOINT DE SOUDURE	129
5.5	ANALYSE DE FATIGUE DES JOINTS DE BRASURE	131
5.6	PRESENTATION DES METHODES D'OPTIMISATION DE CONCEPTION.....	134
5.6.1	Optimisation de conception déterministe (DDO)	135
5.6.2	Optimisation de conception fiabiliste (RBDO).....	136
5.6.2.1	Approche classique.....	137
5.6.2.2	Méthode hybride (HM).....	138

5.6.2.3	Méthode de Facteur de Sécurité Optimal (OSF)	139
5.6.2.4	Méthode hybride robuste (RHM)	141
5.7	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	143
5.7.1	Description du problème d'optimisation.....	144
5.7.2	Résultats du DDO et RBDO	145
5.7.2.1	Résultats de l'optimisation déterministe (DDO)	145
5.7.2.2	Résultats de l'optimisation fiabiliste (RBDO).....	151
5.8	CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	154
	Conclusion Générale.....	152
	Références.....	153

Liste des figures

Figure 1.1 Principales causes de défaillances électroniques en 1990	17
Figure 1.2 Phase initiale : choix de la structure à étudier.....	22
Figure 1.3 Méthodologie suivie dans la thèse	24
Figure 2.1 schématisation de la mécatronique	30
Figure 2.2 Processus de développement en V d'un système mécatronique.....	32
Figure 2.3 Courbe en baignoire.....	33
Figure 2.4 DIP: Dual in-line.....	36
Figure 2.5 Boîtiers LQFP	37
Figure 2.6 Boîtiers QFN.....	38
Figure 2.7 Boîtiers BGA	39
Figure 2.8 Boîtiers CSP.....	39
Figure 2.9 Modes d'interconnexion des composants montés en surface avec la carte électronique	46
Figure 2.10 Assemblage par collage.....	46
Figure 2.11 Domaines industriels d'application du BGA	50
Figure 2.12 les mécanismes de défaillances des composants électroniques	51
Figure 3.1 démarche d'une simulation numérique.....	75
Tableau 3.2 Profils de températures selon les domaines	77
Figure 3.3 Courbe du déplacement selon axe X.....	80
Figure 3.4 Courbe du déplacement selon axe Y.....	80
Figure 3.5 Courbes des déplacements selon axe Z.....	81
Figure 3.6 Influence de la densité de courant.....	82
Figure 3.7 Influence de flux thermique	83
Figure 3.8 Influence de la densité de courant.....	84
Figure 3.9 Influence de la densité du flux thermique.....	85
Figure 3.10 Billes de soudure critiques	86
Figure 3.11 Comportement mécanique des billes de soudure choisies	86
Figure 3.12 Zone critique dans le joint de brasure	87
Figure 3.13 Distribution des défaillances des coins de l'alliage InnoLot.....	88
Figure 3.14 Localisation de l'initiation de la fissuration	88
Figure 3.15 Propagation expérimentale des fissures	89

Figure 3.16 La répartition des couches de l'IMC	90
Figure 4.1 Modèle global d'éléments finis pour un quart d'assemblage BGA avec conditions aux limites	103
Figure 4.2 Distribution des contraintes équivalentes pour l'alliage InnoLot.....	108
Figure 4.3 Cycles de températures appliqués	109
Figure 4.4 Courbes de contraintes équivalentes	110
Figure 4.5 Courbes de déformation élastique.....	111
Figure 4.6 Courbes de déformation thermique.....	112
Figure 4.7 Courbes de déformation plastique accumulée	113
Figure 4.8 Impact de la concentration d'Ag sur les caractéristiques mécaniques et thermomécaniques.....	114
Figure 4.9 Courbes d'énergie de déformation	115
Figure 4.10 Contrainte équivalente	116
Figure 4.11 Déformation thermique	117
Figure 4.12 Déformation plastique accumulée pour les cinq alliages.....	118
Figure 4.13 Déformation plastique accumulée pour les alliages SAC.....	118
Figure 5.1 Organigramme d'étude d'optimisation	129
Figure 5.2 (a) Ellipsoïde de révolution aplati (b) Présentation des variables géométriques ..	130
Figure 5.3 Espace de conception hybride (HDS).....	139
Figure 5.4 RHM dans l'espace de conception hybride	142
Figure 5.5 Organigramme de la méthode RHM.....	143
Figure 5.6 Coordonnées du point optimal.....	146
Figure 5.7 Fonction objective optimale.....	147
Figure 5.8 Violation de la contrainte maximale	147
Figure 5.9 Comparaison de la contrainte initiale et de la contrainte	149
Figure 5.10 Graphique de l'indice de fiabilité	150
Figure 5.11 Comparaison des contraintes	154

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Modèles de fatigues	54
Tableau 3.1 Analogie thermoélectrique	67
Tableau 3.2 Propriétés matérielles de la couche IMC (Cu ₆ Sn ₅).....	91
Tableau 4.1 Avantages et inconvénients des alliages	98
Tableau 4.2 Caractéristiques des éléments	99
Tableau 4.3 Propriétés matérielles des couches	104
Tableau 4.4 Propriétés matérielles des billes de soudure	104
Tableau 4.5 Paramètres Anand des joints de soudure	105
Tableau 4.6 Résultats de l'état de contrainte initial	107
Tableau 4.7 Comparaison globale entre les résultats initiaux et les résultats des services	120
Tableau 5.1 Caractéristiques relatives à la fatigue de l'alliage SAC305	132
Tableau 5.2 Calcul du facteur d'accélération.....	133
Tableau 5.3 Résultats d'une analyse de sensibilité numérique	133
Tableau 5.4 Facteurs de sécurité pour différents équipements.....	136
Tableau 5.5 Limites inférieures et supérieures des variables	144
Tableau 5.6 Caractéristiques des variables aléatoires	145
Tableau 5.7 Résultats de l'optimisation déterministe	148
Tableau 5.8 Points initiaux	149

Chapitre 1

Contexte et problématique de la thèse

1.1 INTRODUCTION.....	17
1.2 PROBLEMATIQUE DE LA THESE.....	18
1.3 OBJECTIFS DE LA THESE	19
1.4 CONTEXTE CONCEPTUEL DU PROBLEME	20
1.5 MOTIVATION DE LA RECHERCHE.....	21
1.6 DEMARCHE DE LA THESE.....	21
1.7 ARCHITECTURE DE LA THESE.....	24

1.1 Introduction

La conception des modules électroniques de puissance évolue vers la minimisation, représentant un challenge important compte tenu des exigences accrues en termes de puissance et de température acceptables [1]. En raison des exigences miniaturisées et multifonctionnelles de la microélectronique, la fiabilité est devenue une préoccupation majeure malgré l'amélioration de la légèreté et de la puissance. Les appareils électroniques sont devenus partie intégrale de notre quotidien, avec 77 % de la population mondiale possédant un téléphone portable et 59 % un ordinateur. La hausse est due à la multiplication des dépenses consacrées aux produits électroniques au fil des décennies. Alors que par le passé, les technologies électroniques étaient principalement développées par le secteur militaire, les fabricants d'électronique grand public sont devenus les principaux intervenants en matière de recherche et innovation, grâce aux volumes de production élevés et aux cycles de développements plus courts. Actuellement, les secteurs de l'aérospatiale et de l'électronique de haute performance adoptent de plus en plus les technologies grand public afin de réduire les coûts, tant sur le plan technologique que sur celui de la fabrication, tout en bénéficiant des technologies de pointe disponibles sur le marché [2]. Selon la littérature, une étude statistique menée par le programme d'intégrité de l'armée de l'air des États-Unis révèle que les dysfonctionnements électroniques constatés proviennent à 55 % de fluctuations de température, alors que les contraintes vibratoires en sont la cause pour 20 % d'entre eux. Les dommages causés par la corrosion provoquée par l'humidité ou les grains de poussière contribuent également de manière significative aux défaillances rencontrées dans les assemblages électroniques [3].

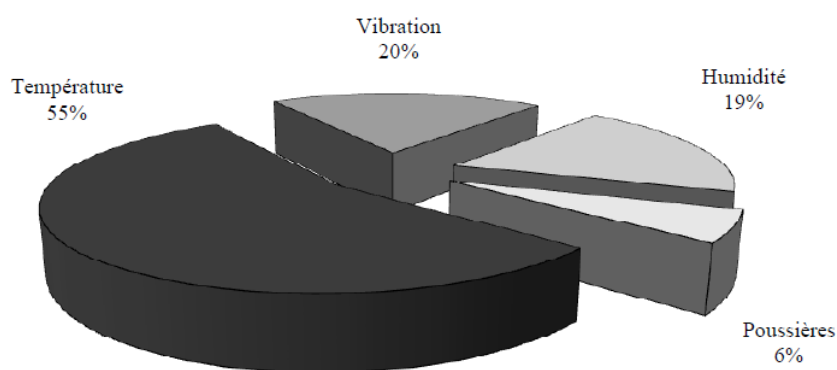


Figure 1.1 Principales causes de défaillances électroniques en 1990

Les composants électroniques sont les éléments fondamentaux de tout circuit électronique, et leur fiabilité est primordiale en vue d'assurer le meilleur rendement possible de ces circuits. Les défaillances des composants électroniques peuvent causer des perturbations importantes dans le système dans lequel ils sont intégrés, allant d'une simple interruption du service à des

conséquences graves voire catastrophiques. Par exemple, une défaillance de composants électroniques dans un avion peut entraîner un accident avec des conséquences dramatiques pour les passagers et l'équipage. Dans les équipements médicaux, il est crucial d'assurer la fiabilité des composants électroniques de façon à leur conférer qualité et sécurité, car une défaillance de ces composants est susceptible de mettre en péril les vies des patients. Cependant, les composants électroniques sont souvent soumis à des conditions opérationnelles rigoureuses telles que des températures élevées, des vibrations, des chocs et des charges électriques, ce qui peut entraîner leur défaillance prématurée. Parmi les facteurs majeurs de dysfonctionnement des composants électroniques figurent la fatigue des matériaux, le vieillissement thermique, les contraintes mécaniques, les effets de l'environnement et les défauts de fabrication. Par conséquent, dans le but de renforcer la fiabilité des composants électroniques, la compréhension des modes de défaillance associés à ces causes et la mise au point de méthodes permettant de les prévenir ou de les atténuer sont fondamentales. La présente thèse a pour but une étude de la fiabilité des composants électroniques, en se concentrant notamment sur les composants montés en surface, tels que les BGAs (Ball Grid Array), largement utilisés dans de nombreux produits électroniques grâce à leur faible encombrement ainsi qu'à leur grande densité de connexion. Les composants BGA sont soumis à des charges électro-thermomécaniques, résultant de combinaisons de tensions électriques et de cycles de température, ce qui peut entraîner leur défaillance prématurée. Ainsi, cette thèse vise à explorer l'influence de ces charges sur le comportement mécanique des composants BGA et leur fiabilité, tout en développant des méthodes d'optimisation visant à améliorer leur fiabilité. L'intention est d'approfondir la compréhension des processus de défaillance spécifiques à ces composants et de proposer des solutions pour les renforcer et les rendre plus fiables dans des conditions opérationnelles exigeantes.

1.2 Problématique de la thèse

Effectivement, l'électronique s'est incorporé dans notre quotidien, présent dans de nombreux appareils et dispositifs que nous utilisons tous les jours à l'instar des ordinateurs, des équipements médicaux, des voitures, des avions, des smartphones et des téléviseurs. Son impact s'étend à divers domaines, notamment la communication, la médecine, l'énergie, l'industrie, les transports et la défense. L'électronique a apporté des avancées technologiques majeures, transformant nos modes de communication, de travail, de divertissement et d'interaction avec le monde. Les progrès continus dans ce domaine ont amélioré notre qualité de vie et ouvert de

nouvelles perspectives dans de nombreux secteurs. La problématique de cette thèse est donc axée sur l'optimisation de la durabilité des composants électroniques, en particulier les composants BGA, qui sont couramment utilisés dans des environnements opérationnels difficiles tels que l'aérospatiale, l'automobile et le secteur militaire. Ces composants sont soumis à des contraintes électro-thermomécaniques, telles que des vibrations, des chocs thermiques et mécaniques, ainsi qu'à des environnements corrosifs. Ces conditions opérationnelles sévères peuvent entraîner des dégradations et des défaillances des composants, ce qui peut avoir un impact dramatique sur la performance et la sécurité des systèmes électroniques. Les coûts associés à la maintenance, à la réparation et au remplacement des composants défaillants, ainsi que les pertes de productivité et les risques pour la sécurité, confèrent à la fiabilisation des composants électroniques un caractère essentiel pour les entreprises et les industries qui les utilisent. Ainsi, la visée de cette thèse est de pencher sur l'étude et le développement des méthodes d'optimisation pour améliorer la fiabilité des composants BGA soumis à des charges électro-thermomécaniques. Cela implique une analyse numérique et une simulation approfondie de la réponse électromécanique et thermique de ces composants dans des conditions d'opération difficiles. La recherche se concentrera sur la compréhension des mécanismes de dégradation spécifiques aux composants BGA et sur la détermination des éléments prépondérants qui impactent leur fiabilité. À partir de là, des méthodes d'optimisation seront développées pour renforcer la résistance des composants et minimiser les risques de défaillance prématurée. Les issues de cette investigation devraient apporter une perception plus minutieuse des mécanismes de dégradation des composants électroniques, ainsi qu'à la proposition de solutions techniques visant à améliorer leur fiabilité dans des environnements opérationnels difficiles. Cela permettra de garantir la sécurité et la durabilité des systèmes électroniques utilisés dans les secteurs critiques tels que le secteur militaire, l'aérospatiale et l'automobile.

1.3 Objectifs de la thèse

Cette thèse vise fondamentalement à renforcer l'efficacité de la fiabilité des composants électroniques, en particulier les composants BGA, en étudiant les phénomènes de dégradation et de défaillance des composants soumis à des charges électro-thermomécaniques. Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes sont envisagées, notamment l'analyse des environnements opérationnels difficiles auxquels sont soumis les composants, la caractérisation des mécanismes de défaillance et de dégradation, édification de modèles de prédiction de la

pérennité des composants et enfin, l'optimisation des paramètres de conception et de fabrication pour garantir la fiabilité des composants. Le but ultime est de fournir aux entreprises et aux industries des solutions pratiques et efficaces pour améliorer la sécurité, la durabilité et la performance des équipements électroniques.

Le prochain chapitre présente une analyse bibliographique complète sur les composants électroniques, visant à consolider les connaissances existantes. Il commence par discuter des systèmes mécatroniques et des composants électroniques, puis se concentre progressivement sur le composant BGA. Ensuite, le chapitre explore les différents mécanismes de défaillance associés à ce composant. Enfin, une attention particulière est accordée aux joints de soudure en raison de leur vulnérabilité dans le composant BGA, car leurs défaillances peuvent entraîner la défaillance globale à la fois du composant et du système entier.

Par conséquent, puisque la fiabilité d'un système est définie par la fiabilité de sa partie la plus faible, l'étude de la fiabilité des joints de soudure est entreprise pour assurer le fonctionnement optimal du composant BGA. Notre objectif est donc d'examiner l'influence des facteurs externes les plus stimulants de la défaillance du composant, à savoir la charge électrique et les cycles de température, ainsi que l'impact des facteurs internes, ce qui correspond à l'ensemble optimal de variables géométriques pour éviter une défaillance prématurée de l'ensemble du système et des catastrophes humaines et matérielles inattendues.

1.4 Contexte conceptuel du problème

La fiabilité revêt une importance cruciale notamment dans le secteur électronique dont elle constitue un indicateur essentiel. Un événement tragique dans la compagnie aérienne AirAsia survenu il y a quelques années met en évidence cette nécessité. En effet, le vol QZ8501 s'est accidenté dans la mer de Java, au large de Bornéo, peu après son décollage le 28 décembre 2014, entraînant la perte de toutes les personnes à bord. L'enquête officielle menée par les autorités de l'aviation a révélé que la défaillance du système de contrôle du gouvernail de l'avion, combinée à une réaction de l'équipage, a contribué à l'accident. Une fissure dans un minuscule module électronique a entraîné l'envoi de signaux d'alerte répétés aux pilotes, qui ont tenté de réinitialiser le système. Cela a entraîné le désengagement du pilote automatique et un mouvement de basculement de l'avion vers la gauche. Lors de l'année précédant l'accident, l'ordinateur de bord avait enregistré 23 dysfonctionnements en raison d'une fissure, et durant les quarante minutes qui ont suivi le décollage de Surabaya jusqu'à la disparition de l'avion, il

y a eu 4 dysfonctionnements supplémentaires. Ces informations ont été reporté par de nombreuses sources telles que [1] – [3].

1.5 Motivation de la recherche

La motivation de cette recherche repose sur une approche exhaustive et méthodique pour étudier la fiabilité et optimiser la conception des joints de brasure pour les composants BGA. Les outils de modélisation numérique, tels qu'ANSYS Workbench et APDL, ont été utilisés en vue de simuler le comportement des joints de brasure. MATLAB a été utilisé en couplage avec ANSYS pour l'optimisation des paramètres de conception des joints de brasure. Les objectifs de cette recherche incluent l'identification des facteurs clés de défaillance des joints de brasure en tenant compte de variables telles que la géométrie, les matériaux, les conditions de refusion et les contraintes thermomécaniques.

Des simulations avancées ont été réalisées pour analyser le comportement des joints de brasure dans différentes conditions de chargement. L'optimisation déterministe (DDO) a été utilisée pour améliorer la conception des joints de brasure en optimisant leur performance mécanique et leur fiabilité. L'optimisation fiabiliste (RBDO) a également été étudiée pour prendre en compte les incertitudes associées aux matériaux, aux conditions de charge et au vieillissement des joints de brasure.

Pour résumer, cette recherche adopte une approche méthodique et complète en utilisant des outils de modélisation numérique tels qu'ANSYS Workbench et APDL, ainsi que MATLAB pour optimiser les joints de brasure dans les composants BGA. Les objectifs principaux comprennent l'identification des facteurs déterminants de la défaillance, l'amélioration de la conception grâce à une optimisation déterministe (DDO) et la considération des aléas par le biais de l'optimisation fiabiliste (RBDO). Le dessein visé de cette enquête est d'accroître la fiabilité et l'efficacité des joints de brasure dans les composants BGA en utilisant une approche intégrée de modélisation numérique et d'optimisation.

1.6 Démarche de la thèse

Le chapitre bibliographique constitue la phase initiale de cette thèse, offrant une base solide pour les chapitres ultérieurs. Cette partie met en évidence la progression de la recherche en explorant divers aspects liés au système mécatronique, aux composants électroniques et plus spécifiquement aux joints de brasure. La première partie de cette progression consiste à fournir des définitions claires et précises des termes clés employés de façon persistante dans l'ensemble

de la thèse. Cela permet de définir les concepts fondamentaux liés au système mécatronique, aux composants électroniques et aux joints de brasure, garantissant une compréhension commune du sujet. Cette démarche est illustrée par la figure 1-2. En outre, cette partie met en lumière le rôle vital des soudures dans le processus l'assemblage des composants électroniques, en soulignant qu'ils sont le maillon le plus faible de l'assemblage. Les joints de brasure sont soumis à diverses contraintes, notamment mécaniques, thermiques et environnementales, ce qui peut entraîner des défaillances et des problèmes de fiabilité.

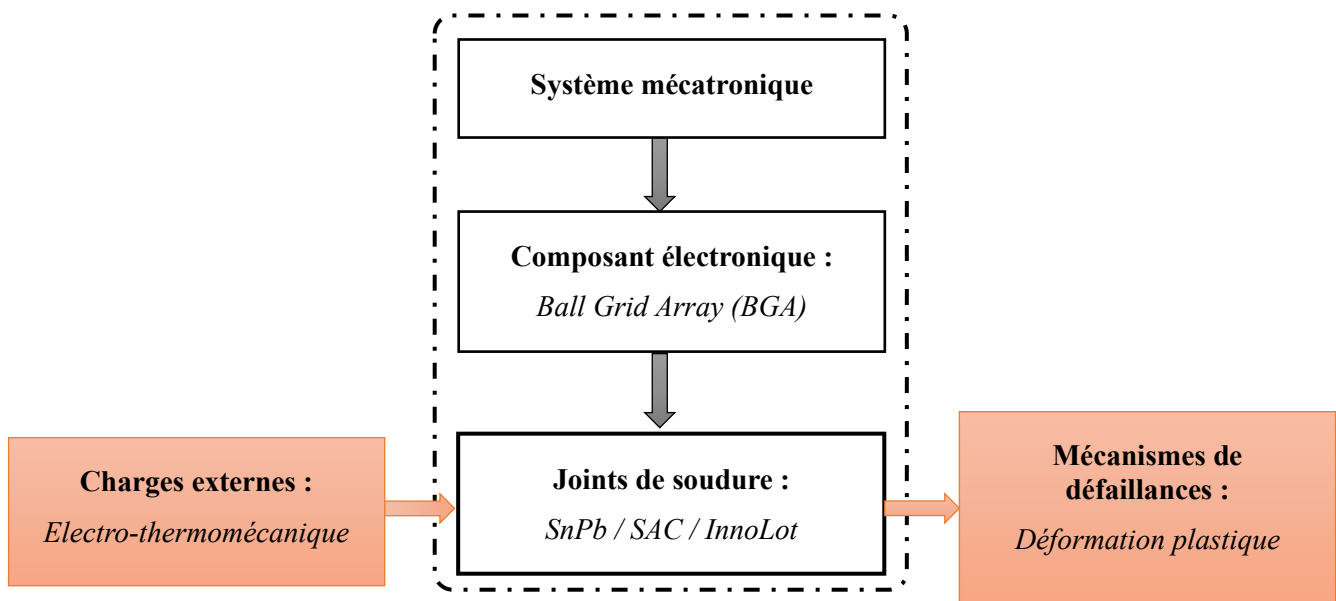


Figure 1.2 Phase initiale : choix de la structure à étudier

Après avoir établi la progression initiale de la thèse, il est essentiel de décrire la méthodologie qui a été suivie pour mener à bien cette recherche. La méthodologie mise en œuvre est fondée sur une approche systématique et rigoureuse, visant à atteindre les objectifs fixés et à répondre aux questions de recherche soulevées.

Pour commencer, une vue d'ensemble approfondie de la littérature a été menée afin d'explorer les travaux antérieurs et les avancées dans les terrains d'investigation de la fiabilité et de l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. Cela nous a permis ainsi de comprendre en profondeur les fondements des techniques et des méthodes existantes.

La stratégie suivie dans le cadre de cette étude se décline en plusieurs étapes fondamentales, visant à étudier et optimiser les joints de brasure dans les composants BGA. Voici une description des différentes étapes illustré dans la figure 1-2 ci-dessous :

✓ *Simulations électro-thermomécaniques* : Dans cette étape, des simulations ont été réalisées sur ANSYS Workbench afin d'étudier le comportement des alliages de brasure (SnPb, SAC, InnoLot). L'objectif était de déterminer l'alliage le plus fiable parmi les trois générations en analysant leur performance électro-thermomécanique.

✓ *Étude des contraintes et de la couche IMC* : Une focalisation spécifique a été dirigée vers l'analyse des concentrations de contraintes dans la bille de soudure, ainsi qu'à l'étude de la formation de la couche d'intermétallique (IMC). Ces aspects sont cruciaux pour comprendre les mécanismes de défaillance potentiels des joints de brasure.

✓ *Modélisation de la forme de la bille de soudure* : Une caractéristique importante des joints de brasure est la forme particulière de la bille de soudure, qui est souvent décrite comme un sphéroïde aplati. Dans cette étape, la forme de la bille a été explicitement définie, et une expression reliant son volume au rayon et à la hauteur a été établie.

✓ *Étude de sensibilité et comportement mécanique* : Une étude de sensibilité a été réalisée en utilisant ANSYS APDL pour évaluer l'influence du comportement mécanique des joints de brasure en variant le rayon et la hauteur de la bille de soudure. Cette étude s'est basée sur le nombre de cycles à la rupture résultant de l'application d'un modèle de fatigue.

✓ *Optimisation déterministe (DDO) et optimisation fiabiliste (RBDO)* : Une fois les paramètres géométriques des joints de brasure identifiés, une optimisation déterministe (DDO) a été effectuée pour obtenir les valeurs optimales de ces paramètres. Par la suite, une optimisation fiabiliste (RBDO) a été réalisée pour tenir compte des incertitudes associées aux matériaux et aux conditions de charge, afin d'obtenir une conception robuste et fiable des joints de brasure.

En résumé, la méthodologie de cette thèse comprend des simulations électro-thermomécaniques, des études sur les contraintes et la couche IMC, la modélisation de la forme de la bille de soudure, une étude de sensibilité du comportement mécanique des joints de brasure, ainsi qu'une optimisation déterministe et fiabiliste pour obtenir une conception optimale des joints de brasure dans les composants BGA.

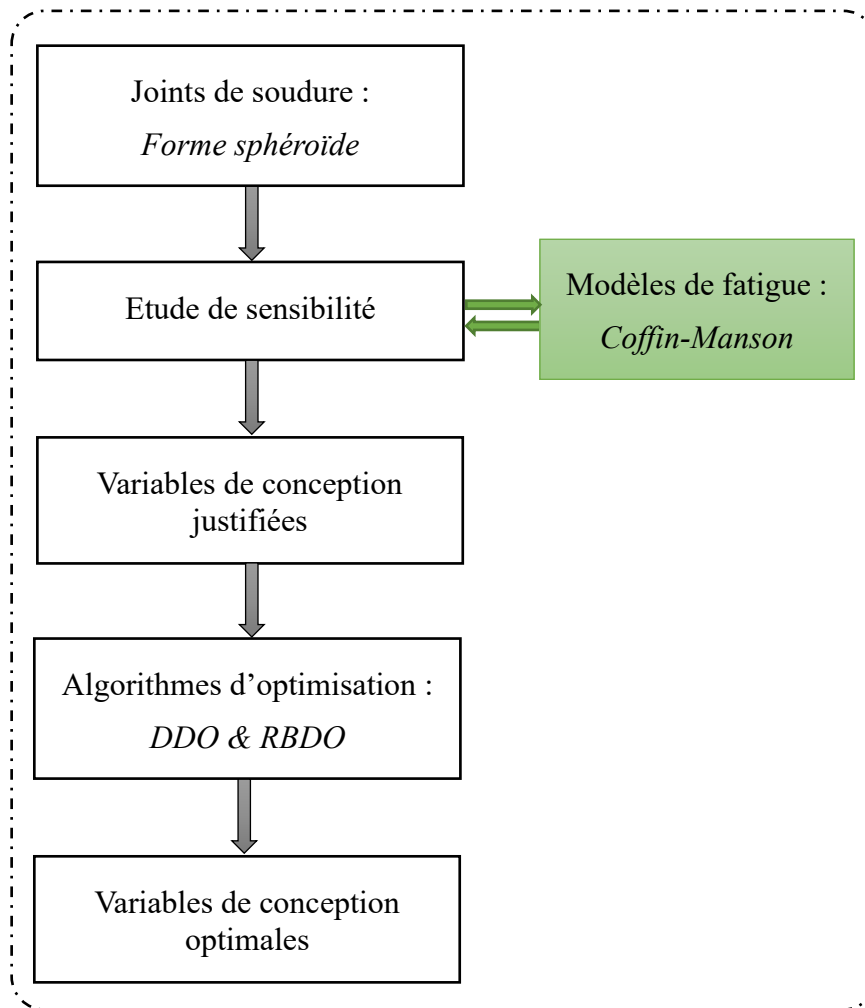


Figure 1.3 Méthodologie suivie dans la thèse

1.7 Architecture de la thèse

Cette mémoire est agencée de façon à fournir une structure claire et cohérente pour la présentation des résultats de recherche. Elle se compose de plusieurs chapitres qui couvrent différents aspects de l'étude sur les joints de brasure dans les composants BGA, en se basant sur la méthodologie décrite précédemment. Le plan de cette thèse est conçu de manière à fournir une structure claire et progressive pour présenter les résultats de recherche. Il se compose des chapitres suivants :

Chapitre 1 : Ce chapitre contextualise la recherche et énonce les objectifs centraux de la dissertation. Il souligne la prépondérance des joints de brasure dans l'assemblage des composants BGA et souligne leur rôle en tant que maillon faible susceptible de causer des défaillances. De plus, il introduit la méthodologie générale suivie dans cette thèse pour améliorer la fiabilité et l'optimisation des joints de brasure.

Chapitre 2 : Ce chapitre constitue une exploration approfondie de la littérature existante sur les systèmes mécatroniques, les composants électroniques et les joints de brasure. Il fournit des définitions claires et précises des termes clés utilisés tout au long de la thèse, principalement en ce qui a trait aux mécanismes de défaillance du composant BGA et les modèles de fatigue des joints de brasure. Cette revue de littérature permet de consolider un pilier robuste de références pour les chapitres ultérieurs.

Chapitre 3 : Ce chapitre se concentre sur la modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique dans les joints de brasure des composants BGA. Il décrit les approches utilisées pour modéliser les interactions électro-thermomécaniques et évalue leur impact sur les performances et la fiabilité des joints de brasure et en évaluant la zone de concentration de contraintes au niveau de la bille de soudure.

Chapitre 4 : Ce chapitre présente les résultats des simulations réalisées sur ANSYS Workbench pour étudier le comportement des alliages de brasure tels que le SnPb, le SAC et l'InnoLot. L'objectif principal est de déterminer l'alliage le plus fiable parmi ces trois générations en analysant leur performance électro-thermomécanique.

Chapitre 5 : Ce chapitre aborde dans un premier temps la modélisation de la forme de la bille de soudure, qui est une caractéristique cruciale des joints de brasure. Une description précise de la forme de la bille, en tant que sphéroïde aplatie, est établie, ainsi qu'une relation exprimant son volume en fonction du rayon et de la hauteur. De plus, une étude de sensibilité est réalisée en variant le rayon et la hauteur de la bille pour évaluer leur impact sur le comportement mécanique des joints de brasure. En deuxième temps, il se concentre sur l'optimisation des paramètres géométriques des joints de brasure pour améliorer leur fiabilité et leur optimisation. Une approche d'optimisation déterministe (DDO) est utilisée pour obtenir les valeurs optimales de ces paramètres, en tirant parti des conclusions des recherches antérieures. Par la suite, une approche d'optimisation fiabiliste (RBDO) est mise en œuvre pour tenir compte des incertitudes inhérentes aux matériaux et aux conditions de charge. Cette étape vise à obtenir une conception robuste et fiable des joints de brasure, en prenant en considération les variations potentielles dans les propriétés des matériaux et les conditions environnementales.

Enfin une conclusion qui récapitule les principales conclusions de la thèse, en mettant en évidence les contributions et les avancées réalisées dans le domaine de la fiabilité et de l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. Les limitations de la recherche sont également discutées, ouvrant ainsi la voie à de futures investigations. Enfin, des recommandations pratiques sont formulées pour guider l'industrie dans l'amélioration des performances et de la fiabilité des joints de brasure.

En suivant cette organisation, la thèse offre une progression logique et cohérente, permettant d'appréhender la progression méthodique de la recherche, depuis la revue de littérature jusqu'à l'élaboration de modèles, les simulations, les études de sensibilité et enfin les méthodes d'optimisation.

Chapitre 2

Revue de la littérature

2.1 INTRODUCTION	29
2.2 SYSTEMES MECATRONIQUES	29
2.2.1 Définition de la mécatronique.....	30
2.2.2 Définition du système mécatronique.....	31
2.2.3 Processus de développement d'un système mécatronique.....	31
2.2.4 Cycles de vie d'un système mécatronique	32
2.2.5 Modes de défaillances dans les systèmes mécatroniques	33
2.2.5.1 Défaillance électrique	33
2.2.5.2 Défaillance thermique.....	34
2.2.5.3 Défaillance mécanique	34
2.2.5.4 Défaillance logicielle	35
2.3 LES COMPOSANTS ELECTRONIQUES	35
2.3.1 Les types de Boîtiers électroniques.....	35
2.3.1.1 Boîtiers par insertion	35
2.3.1.2 Boîtiers pour montage en surface (SMT)	36
2.3.2 Composition des Boîtiers électroniques.....	40
2.3.2.1 Les boîtiers en plastique	40
2.3.2.2 Les boîtiers en métal.....	40
2.3.2.3 Les boîtiers en céramique	40
2.3.2.4 Les boîtiers en verre	41
2.3.2.5 Les boîtiers hybrides.....	41
2.3.3 Rôles des composants électroniques	42
2.3.4 Niveaux d'emballage et des interconnexions.....	43
2.3.4.1 Emballage des composants électroniques.....	43
2.3.4.2 Emballage des cartes électroniques	44
2.3.4.3 Emballage des systèmes complets	44
2.3.5 Assemblage et technologie d'interconnexion	45
2.3.5.1 Assemblage par brasage	45

2.3.5.2	Assemblage par collage	46
2.3.5.3	Assemblage par impression	47
2.4	LES COMPOSANT ELECTRONIQUES BGA	47
2.4.1	Definition du composant BGA	47
2.4.2	Les Propriétés électro-thermomécaniques du composant BGA	47
2.4.3	Fonctionnement du composant BGA.....	48
2.4.4	Le BGA dans les systèmes mécatroniques industriels	49
2.5	LES MECANISMES DE DEFAILLANCE DU COMPOSANT BGA	50
2.5.1	Fatigue thermique	51
2.5.2	Fracture fragile.....	52
2.5.3	Deformation plastique.....	52
2.5.4	Le délaminage	53
2.6	MODELES DE FATIGUE.....	53
2.7	CONCLUSION	56

2.1 Introduction

L'introduction de cette thèse vise à poser le contexte et à présenter les fondements de la recherche menée sur la fiabilité et l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. Ce chapitre permettra de comprendre les motivations qui ont conduit à cette étude, ainsi que les objectifs poursuivis. La technologie des composants BGA (Ball Grid Array) joue un rôle crucial dans l'industrie microélectronique, offrant des avantages en termes de densité d'intégration, de performances et de facilité d'assemblage. Cependant, les joints de brasure utilisés pour connecter ces composants à la carte électronique peuvent être désignés le point à risque de l'ensemble de l'assemblage. En raison des contraintes mécaniques, thermiques et environnementales auxquelles ils sont soumis, les joints de brasure sont susceptibles de présenter des défaillances, mettant ainsi en péril la fiabilité et les performances globales du système. Dans ce contexte, cette recherche s'inscrit dans une démarche systématique et rigoureuse visant à améliorer la fiabilité et l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. La finalité est de cerner les principaux déterminants de la défaillance, d'explorer les mécanismes de dégradation et de proposer des solutions d'optimisation pour renforcer la résistance et la durabilité des joints de brasure.

Ce premier chapitre offre donc une introduction détaillée aux concepts fondamentaux liés à cette étude. Il présentera une revue de la littérature spécialisée, qui fournira les définitions claires et précises des termes clés utilisés à tous les niveaux de la thèse. Cette revue de littérature permettra de définir les concepts essentiels relatifs au système mécatronique, aux composants électroniques, aux joints de brasure et aux mécanismes de défaillance du composant BGA.

En résumé, ce premier chapitre constitue la porte d'entrée vers les chapitres subséquents, en offrant une compréhension approfondie du domaine d'étude, de ses enjeux et des définitions essentielles. Il posera les bases nécessaires pour la compréhension et l'analyse approfondie des problématiques liées à la fiabilité et à l'optimisation des joints de brasure dans les composants BGA. Maintenant que nous avons défini la problématique de la thèse et ses objectifs, il est important de définir le domaine d'étude qui est la mécatronique.

2.2 Systèmes mécatroniques

Les systèmes mécatroniques sont des systèmes qui combinent des composants mécaniques, électroniques et informatiques pour former un système global performant. La mécatronique est un domaine en pleine expansion et est utilisée dans un large éventail de domaines industriels tels que l'électronique grand public, l'aéronautique, la robotique et l'automobile. Cette science

a été largement étudiée par de nombreux chercheurs tels que [7] – [10]. Avant de détailler les composants et caractéristiques de la mécatronique, il est essentiel de posséder une maîtrise fondamentale de cette discipline.

2.2.1 Définition de la mécatronique

La mécatronique est un domaine interdisciplinaire qui combine la mécanique, l'électronique et l'informatique dans la conception de systèmes complexes conformément à la représentation graphique dans la figure 2.1. Elle vise à améliorer la performance et la précision des systèmes mécaniques en intégrant des composants électroniques et informatiques, tels que des capteurs, des actionneurs et des calculateurs. L'importance de la mécatronique dans le domaine électronique est cruciale car elle permet la conception de systèmes plus efficaces et plus précis, en diminuant les coûts et en accroissant les rendements. La mécatronique participe activement dans l'innovation technologique en permettant la conception de nouveaux systèmes et produits qui répondent aux besoins et aux exigences des utilisateurs. Les applications de la mécatronique sont vastes et touchent de nombreux domaines. Dans le cadre de cette thèse, La mécatronique joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la fiabilité des composants électroniques en les intégrant dans des systèmes mécaniques complexes. La compréhension des concepts des systèmes mécatroniques et de leur application pratique sera donc cruciale pour atteindre les objectifs de cette recherche.

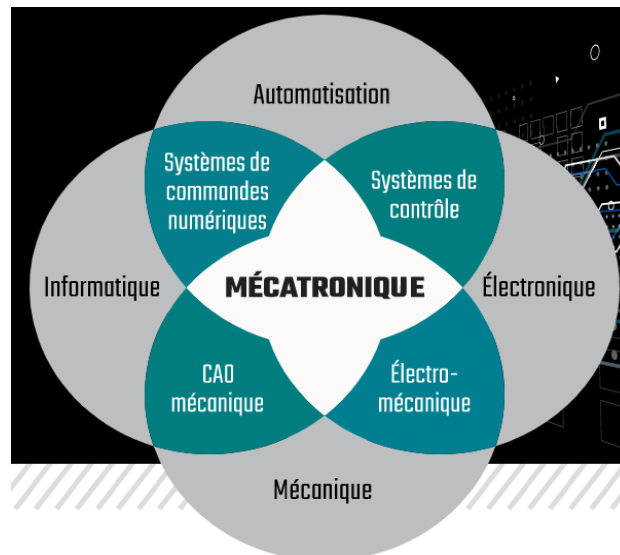


Figure 2.1 schématisation de la mécatronique [11]

2.2.2 Définition du système mécatronique

Un système mécatronique est un système complexe qui intègre des composants mécaniques, électroniques et informatiques pour assurer une fonction spécifique. Il est conçu pour répondre à des exigences de performances élevées et de fiabilité tout en optimisant l'utilisation de ressources telles que l'énergie et les matériaux. L'importance des systèmes mécatroniques dans le domaine électronique est primordiale car ces systèmes offrent une multitude d'avantages, tels que des performances améliorées, une efficacité accrue, une sécurité renforcée et une plus grande précision. Dans le contexte de cette investigation, la conception d'un système mécatronique fiable est essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité des équipements électroniques, en particulier pour les composants BGA soumis à des charges électro-thermomécaniques. Par conséquent, l'étude et l'optimisation des systèmes mécatroniques sont des enjeux majeurs en vue d'accroître l'efficacité et de la durabilité des équipements électroniques.

2.2.3 Processus de développement d'un système mécatronique

Le processus de développement d'un système mécatronique est un niveau déterminant dans la construction de tout système qui combine des composants mécaniques, électroniques et informatiques. Ce processus a été abordé par plusieurs thèses tel que [12] – [14]. Il se compose de plusieurs phases, telles que l'analyse des besoins, la spécification, la conception, la validation et la fabrication tel que représenté dans la figure 1.2. Chaque phase est cruciale pour assurer la qualité, la fiabilité et la performance du système final. L'analyse des besoins consiste à identifier les exigences fonctionnelles, les performances et les contraintes pour le système. La spécification permet de définir les caractéristiques techniques, les fonctionnalités et les critères de qualité du système. La conception implique la modélisation et la simulation du système pour optimiser sa performance et sa fiabilité. L'intention du stade de validation est de s'assurer que le système satisfait aux exigences spécifiques définies, tandis que la phase de fabrication est chargée de produire et d'assembler le système final.

Le processus de développement d'un système mécatronique est crucial dans ma thèse, car il permet de garantir la fiabilité et la performance des composants électroniques intégrés dans les systèmes mécatroniques. Les méthodes d'optimisation étudiées dans ma thèse doivent être intégrées pendant le processus de développement afin maximiser l'efficacité du système final.

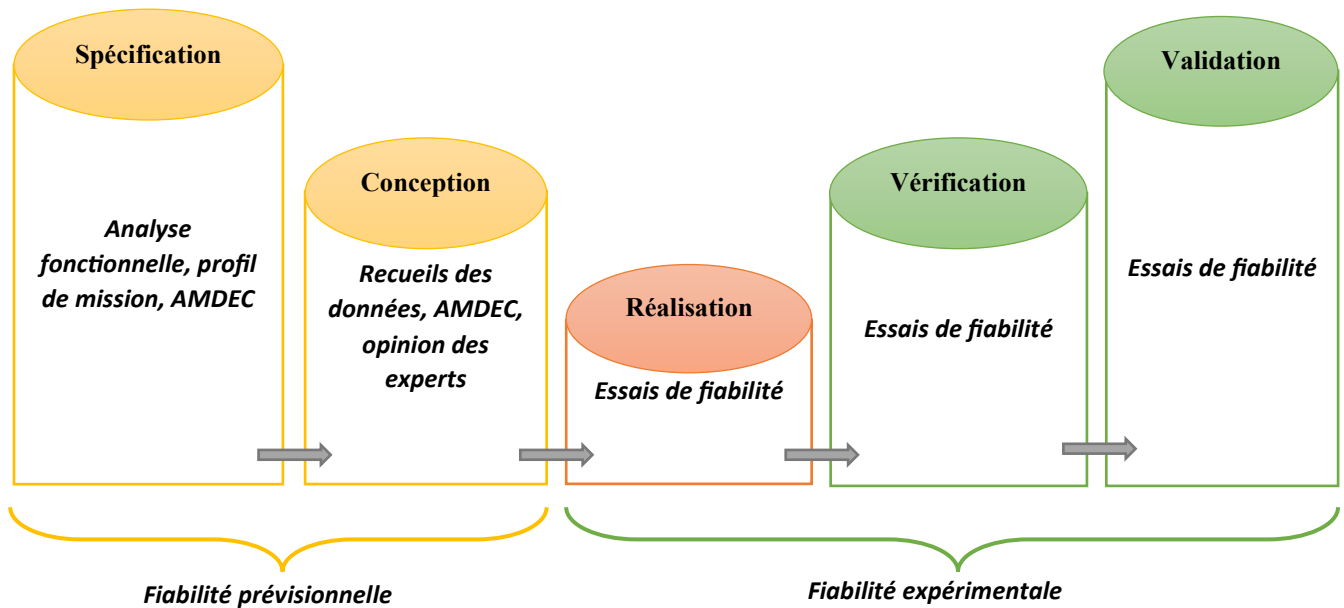


Figure 2.2 Processus de développement en V d'un système mécatronique [14]

Une meilleure compréhension de ce cycle peut aider à améliorer la qualité des systèmes mécatroniques, minimiser les coûts et les temps de développement, et augmenter la satisfaction des clients.

2.2.4 Cycles de vie d'un système mécatronique

Les boîtiers électroniques peuvent subir des défaillances fonctionnelles ou environnementales pendant leur durée de vie, qui est généralement divisée en trois phases principales. La courbe de taux de défaillance suit trois zones distinctes selon la période tel que montré dans la figure 2.3. Tout d'abord, la zone de jeunesse, également appelée période de déverminage, est caractérisée par des défaillances précoces qui sont dû aux défauts de fabrication ou de conception. Le taux de défaillance baisse rapidement graduellement, éliminant les composants les plus vulnérables ou défectueux. Ensuite, la zone de vie utile est la période d'exploitation, pendant laquelle le taux de défaillance reste constant, et les défaillances sont principalement dues à des facteurs externes tels que des conditions d'utilisation inappropriées. Enfin, la zone d'usure ou de vieillissement est la période pendant laquelle le taux de défaillance s'accroît de façon croissante, généralement en conséquence de la détérioration ou de l'usure du composant. Pour prévoir le vieillissement, deux paramètres sont importants : le moment où le vieillissement commence et la cinétique de l'augmentation du taux de défaillance. La compréhension et l'étude de cette courbe sont d'une importance capitale, c'est pourquoi de nombreux chercheurs ont consacré leurs travaux à son étude [15], [16].

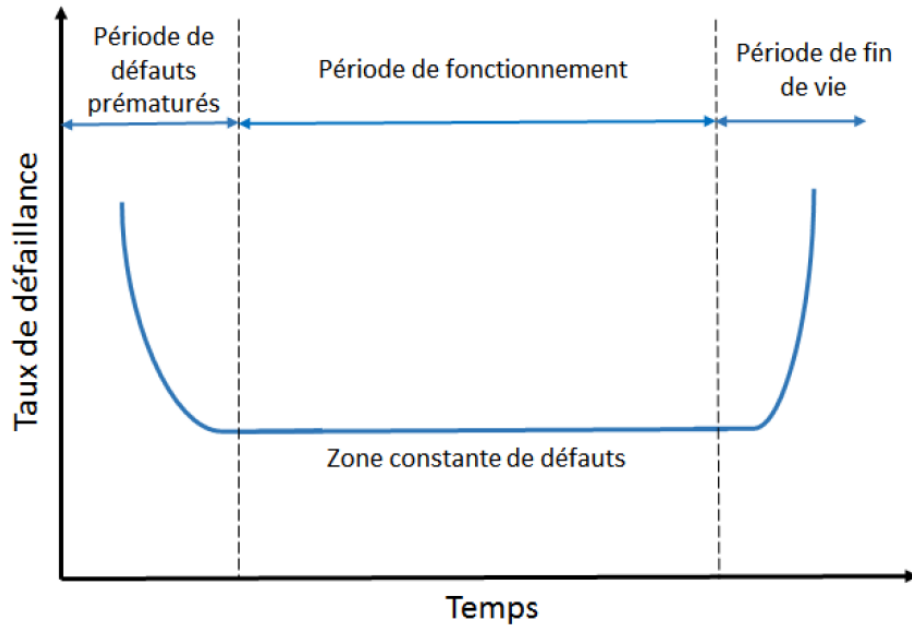


Figure 2.3 Courbe en baignoire

2.2.5 Modes de défaillances dans les systèmes mécatroniques

Les modes de défaillance dans les systèmes mécatroniques peuvent être variés et dépendent de plusieurs facteurs tels que les composants utilisés, les charges appliquées, les conditions d'environnement, etc. Ce point a suscité l'attention de plusieurs chercheurs tel que [8], [12]. Les défaillances peuvent être causées par une rupture mécanique, une usure, une corrosion, un court-circuit, une surchauffe, une défaillance logicielle, une interférence électromagnétique, et bien plus encore. Dans les systèmes mécatroniques, les défaillances peuvent être particulièrement problématiques car elles peuvent se propager à travers différents domaines d'expertise, rendant leur détection et leur résolution plus complexe. Par conséquent, une profonde maîtrise des modes de défaillance potentiels et des stratégies de prévention et de correction des défaillances pour garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes mécatroniques est indispensable.

2.2.5.1 Défaillance électrique

Les défaillances électriques sont l'un des types de défaillances les plus courantes dans les systèmes mécatroniques. Elles sont souvent causées par des surtensions, des sous-tensions, des courts-circuits, des erreurs de câblage ou des problèmes de connexion. Les conséquences de ces défaillances peuvent être graves et peuvent entraîner des pannes ou des dommages aux composants électriques du système mécatronique, tels que les circuits imprimés, les capteurs,

les actionneurs ou les alimentations électriques. Les défaillances électriques peuvent également entraîner des dommages aux composants mécaniques par l'effet de la surchauffe ou de la surcharge. Pour éviter les défaillances électriques le respect des normes et les réglementations en matière de conception électrique, de sélectionner les composants appropriés, de réaliser une maintenance régulière et d'effectuer des tests de fonctionnement et de sécurité préalablement à l'exploitation du système mécatronique est primordial.

2.2.5.2 Défaillance thermique

Les défaillances thermiques dans les systèmes mécatroniques peuvent survenir à cause du transfert de chaleur au sein des composants électroniques, notamment les transistors et les diodes, ainsi que dans les composants mécaniques, tels que les moteurs et les actionneurs. La surchauffe peut causer des dommages importants, tels que la déformation des pièces, la rupture des soudures et la dégradation des propriétés des matériaux. Les systèmes mécatroniques doivent donc être conçus pour éviter les points chauds et favoriser une dissipation efficace de la chaleur. Les techniques de refroidissement, telles que le refroidissement par air ou par liquide, peuvent être utilisées pour maintenir les températures à des niveaux acceptables. Les méthodes de refroidissement sont détaillées dans beaucoup de travaux tel que [17], [18]. En outre, la surveillance continue de la température peut être nécessaire pour détecter les anomalies et éviter les défaillances thermiques.

2.2.5.3 Défaillance mécanique

Les défaillances mécaniques dans les systèmes mécatroniques peuvent avoir de nombreuses causes, telles que la fatigue des matériaux, les surcharges, les erreurs de conception, les vibrations, l'usure et les problèmes de lubrification. Ces défaillances peuvent entraîner des problèmes tels que des pertes de précision, des bruits, des vibrations excessives, des arrêts de production, des risques pour la sécurité et des dommages matériels. Pour prévenir ces défaillances, les ingénieurs mécatroniques utilisent des méthodes d'analyse de contraintes, de simulations numériques et de tests expérimentaux pour évaluer la durabilité et la résistance des composants mécaniques. Ils peuvent également utiliser des technologies telles que les capteurs de contrainte et les systèmes de surveillance pour détecter les signes avant-coureurs de défaillance et prendre des mesures préventives.

2.2.5.4 Défaillance logicielle

Les défaillances logicielles sont un autre type de défaillance qui peut survenir dans les systèmes mécatroniques. Elles sont souvent liées à des erreurs de programmation ou à des incompatibilités entre les différentes parties du logiciel. Les défaillances logicielles peuvent avoir des conséquences graves, notamment des pannes système, des erreurs de mesure, ou des comportements imprévus du système. Les développeurs de logiciels mécatroniques doivent donc être rigoureux et vigilant afin d'identifier et corriger les erreurs dans le code. Ils doivent également tester soigneusement le logiciel avant de le déployer sur le système pour garantir sa performance optimale et sa résistance aux défaillances. Les techniques de vérification et de validation des logiciels sont donc essentielles pour garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes mécatroniques.

2.3 Les composants électroniques

Maintenant que nous avons discuté des différents types de défaillances qui peuvent affecter les systèmes mécatroniques, il est essentiel d'analyser comment les différents composants électroniques peuvent contribuer à ces défaillances. Dans la prochaine section, nous aborderons les composants électroniques fréquemment utilisés dans les systèmes mécatroniques et examinerons leur contribution au fonctionnement de ces systèmes.

2.3.1 Les types de Boîtiers électroniques

Les boîtiers électroniques se déclinent en plusieurs types, chacun avec des avantages et des inconvénients pour les différentes applications.

2.3.1.1 Boîtiers par insertion

Les boîtiers par insertion sont une catégorie de boîtiers électroniques qui sont conçus pour être insérés dans un emplacement prévu dans un circuit imprimé. Ces boîtiers ont généralement un corps en plastique et des broches de connexion qui sont soudées ou insérées dans des trous du circuit imprimé pour fournir une connexion électrique. Les boîtiers par insertion sont souvent utilisés pour des composants électroniques tels que les résistances, les transistors, circuits intégrés, les condensateurs, les diodes, etc. Les avantages de ces boîtiers incluent une installation facile et rapide, une densité de composants élevée, une meilleure dissipation thermique et une réduction du coût de production. En revanche, les boîtiers par insertion peuvent être plus vulnérables aux contraintes mécaniques et aux dommages lors de la soudure

des broches, ce qui peut affecter leur fiabilité à long terme. Les boîtiers d'insertion se déclinent en différentes tailles, formes et configurations pour être en adéquation avec les spécifications particulières des utilisations électroniques.



Figure 2.4 DIP: Dual in-line [12]

2.3.1.2 Boîtiers pour montage en surface (SMT)

Les boîtiers pour montage en surface, ou SMT (Surface Mount Technology), sont une catégorie de boîtiers électroniques qui sont conçus pour être montés directement sur la surface d'un circuit imprimé sans nécessiter de trous de montage. Les boîtiers SMT ont généralement un corps en plastique et des broches de connexion en métal qui sont soudées directement sur les coussinets de soudure du circuit imprimé. Cette méthode de montage est plus efficace et économique que les méthodes de montage traditionnelles car elle permet une densité de composants plus élevée, une installation rapide et un coût de production réduit. Les boîtiers SMT sont largement utilisés pour les composants électroniques tels que les circuits intégrés, les résistances, les condensateurs, les diodes, etc. Cependant, les boîtiers SMT peuvent être plus sensibles aux contraintes thermiques et mécaniques, ce qui peut affecter leur fiabilité à long terme. Les fabricants de boîtiers SMT mettent donc en place des normes strictes pour assurer une fiabilité maximale des produits

- **Boîtiers de type QFP**

Les boîtiers QFP (Quad Flat Package) sont les plus utilisés en électronique en raison de leurs avantages significatifs. Leur conditionnement compact permet une haute densité de composants, tandis que leur comportement thermomécanique fiable garantit une performance stable face aux variations de température. Adaptés au montage en surface, ils offrent une méthode d'assemblage efficace. Disponibles en différents formats (PQFP, LQFP, TQFP), ils répondent aux exigences spécifiques des circuits imprimés. En outre, ils sont économiques

grâce à leur production en grande quantité. Les boîtiers QFP continuent d'être essentiels pour les conceptions à haute densité et le développement de produits électroniques modernes.

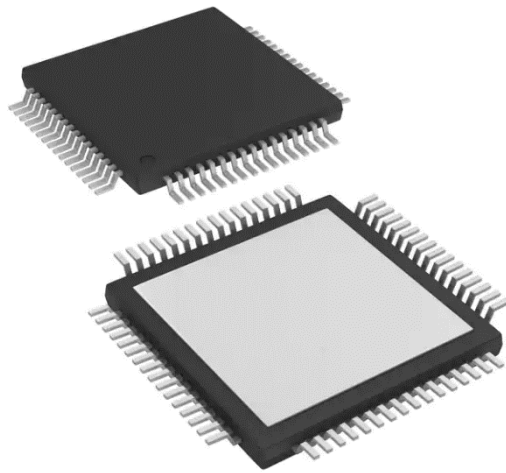


Figure 2.5 Boîtiers LQFP

- **Boîtiers de type QFN**

Ces boîtiers (Quad Flat No-Lead) sont une variante des boîtiers pour montage en surface (SMT) qui offrent des avantages tels qu'une faible taille, une densité de broches élevée, une dissipation thermique améliorée et une meilleure performance électrique. Les boîtiers QFN sont conçus pour les composants électroniques tels que les circuits intégrés et les transistors, et sont de plus en plus populaires dans les applications électroniques où la taille et la performance sont des préoccupations importantes. Les boîtiers QFN ont un corps rectangulaire avec des broches qui sortent des quatre côtés du boîtier, sans broches de soudure visibles sur la face inférieure. Cela permet une conception de circuit imprimé plus compacte, avec une densité de composants plus élevée. Cependant, l'absence de broches de soudure visibles rend le processus de soudure plus difficile, nécessitant des équipements et des compétences de soudure spécifiques. De plus, les boîtiers QFN ont une surface de soudure inférieure par rapport aux autres boîtiers SMT, ce qui peut affecter leur fiabilité sous des contraintes thermiques et mécaniques. Les fabricants de boîtiers QFN poursuivent en permanence l'amélioration de la conception et des procédés de fabrication pour accroître la fiabilité de leurs produits.

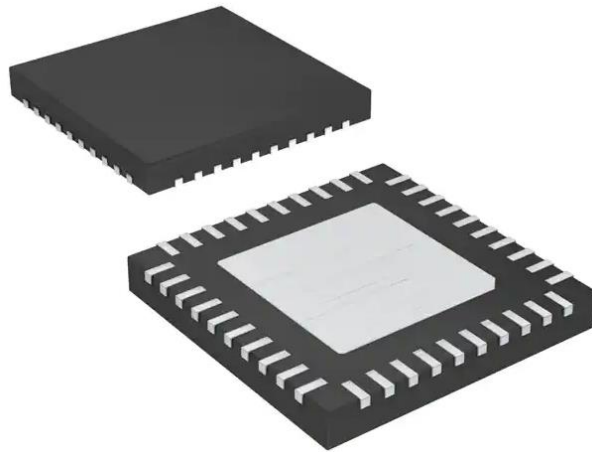


Figure 2.6 Boîtiers QFN

- **Boîtiers matriciels (de type BGA)**

Les boîtiers matriciels de type BGA (Ball Grid Array) sont des boîtiers électroniques pour montage en surface (SMT) qui sont utilisés pour les composants électroniques tels que les microprocesseurs et les FPGA. Les boîtiers BGA permettent d'établir une liaison à la fois électrique et mécanique entre le composant électronique et la carte de circuit imprimé. Cette connexion assure le transfert de signaux électriques et garantit la stabilité physique du composant lorsqu'il est fixé à la carte de circuit imprimé. Les boîtiers BGA offrent une densité de broches élevée et une dissipation thermique améliorée, ce qui les rend populaires dans les applications électroniques à haute densité de composants et à haute puissance. Cependant, le processus de soudure des boîtiers BGA est plus complexe que celui des boîtiers à broches en raison de l'absence de broches visibles sur la face inférieure, ce qui nécessite des équipements et des compétences de soudure spécifiques. De plus, les boîtiers BGA sont sensibles aux contraintes thermiques et mécaniques, en particulier les contraintes thermiques, qui peuvent causer des défaillances du composant. Les fabricants s'engagent activement dans l'amélioration de la fiabilité des boîtiers BGA en mettant l'accent sur plusieurs aspects essentiels. Cela comprend l'amélioration des processus de fabrication, de la conception et des matériaux, en outre le perfectionnement du design de la carte de circuit imprimé afin de réduire les contraintes exercées sur le composant électronique.

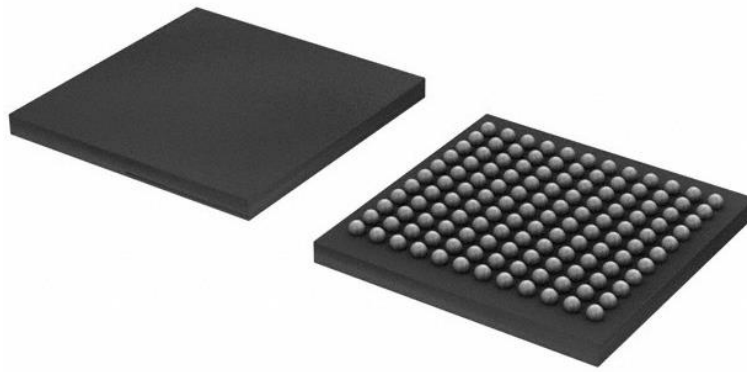


Figure 2.7 Boîtiers BGA [4]

- **Chip Scale Packages (CSP)**

Les packages à puce de taille réduite (CSP) gagnent en popularité de leurs attributs favorables en termes de taille compacte, de légèreté et de consommation d'énergie réduite. Les CSP sont spécialement conçus pour abriter des puces électroniques et assurer une connexion électrique fiable avec d'autres composants électroniques. Contrairement à d'autres types de boîtiers, les CSP adoptent une approche novatrice en permettant une maximisation de l'exploitation de l'espace disponible tout en rétrécissant considérablement la taille de la carte de circuit imprimé (PCB). Cette approche unique permet de maximiser l'efficacité de la conception et de réduire la taille globale du système. De plus, les CSP offrent une excellente résistance aux vibrations et aux chocs, les rendant particulièrement adaptés aux applications nécessitant une fiabilité élevée. En raison de leur polyvalence et de leur capacité à s'intégrer dans des conceptions électroniques complexes, les CSP sont de plus en plus utilisés dans une grande variété d'appareils électroniques.

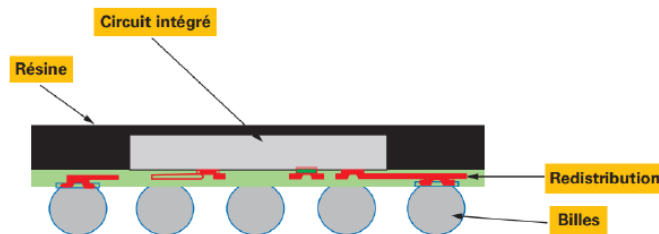


Figure 2.8 Boîtiers CSP [5]

2.3.2 Composition des Boîtiers électroniques

2.3.2.1 Les boîtiers en plastique

Les boîtiers en plastique sont largement utilisés dans l'industrie électronique en raison de leurs nombreux avantages, tels que leur coût abordable, leur légèreté et leur flexibilité. Ils peuvent être fabriqués en utilisant différents types de plastiques tels que le l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), le polypropylène et le polycarbonate. Les boîtiers en plastique peuvent être moulés en différentes formes et tailles pour s'adapter à une variété d'applications électroniques. Ils peuvent également être personnalisés en utilisant des techniques telles que l'impression en sérigraphie ou l'étiquetage pour afficher des noms de marque, des logos ou des instructions. En termes de protection, les boîtiers en plastique offrent une bonne résistance aux chocs électriques et mécaniques, ainsi qu'une protection efficace contre la poussière et l'humidité. Cela en fait un choix idéal pour les environnements difficiles où les équipements électroniques sont exposés à des contraintes et à des conditions rigoureuses. Les boîtiers en plastique contribuent à assurer la durabilité et la fiabilité des composants électroniques en les protégeant des éléments extérieurs nuisibles.

2.3.2.2 Les boîtiers en métal

Les boîtiers en métal sont spécialement conçus pour protéger de manière robuste et fiable les composants électroniques qu'ils renferment, notamment dans des environnements exigeants. Ces environnements peuvent présenter des défis tels que des vibrations, des températures extrêmes, une humidité importante ou des chocs. Les boîtiers en métal sont généralement conçus en utilisant des matières telles que l'aluminium, l'acier inoxydable ou le zinc, qui offrent à la fois une résistance mécanique exceptionnelle et une bonne conductivité thermique. Ces boîtiers peuvent prendre la forme de boîtiers fermés ou de boîtiers ouverts, selon les besoins spécifiques de chaque application. Ils sont largement utilisés dans des secteurs tels que les équipements militaires, les télécommunications, l'industrie, les dispositifs de contrôle et de mesure, ainsi que dans de nombreux autres domaines où la fiabilité et la robustesse sont des critères essentiels.

2.3.2.3 Les boîtiers en céramique

Les boîtiers en céramique sont un choix commun pour les composants électroniques nécessitant une haute performance et une durabilité accrue. Les boîtiers en céramique sont fabriqués à partir

de poudres céramiques qui sont formées et cuites à haute température pour créer une structure rigide et résistante aux chocs. Les avantages des boîtiers en céramique incluent une grande résistance aux vibrations, une excellente stabilité dimensionnelle, une résistance à la corrosion, et résistance aux températures élevées. Ils sont également utilisés pour les composants électroniques qui nécessitent une haute densité de puissance, tels que les circuits intégrés de haute performance et les diodes électroluminescentes (LED). Les inconvénients des boîtiers en céramique sont leur coût plus élevé que les boîtiers en plastique et en métal et leur fragilité en cas de choc ou de vibrations excessives.

2.3.2.4 Les boîtiers en verre

Les boîtiers en verre sont des composants électroniques spécialement conçus afin de garantir la résistance à la corrosion requise et de transparence optique dans diverses applications. Ils sont principalement fabriqués à partir de verre borosilicate, un matériau réputé pour sa résistance thermique et chimique élevée ainsi que sa faible dilatation thermique. Les boîtiers en verre sont fréquemment employés dans divers secteurs tels que les diodes laser, les capteurs optiques, les dispositifs optoélectroniques, et les cellules solaires où une transmission optique élevée est essentielle pour garantir une précision optique optimale. Il convient de noter que les boîtiers en verre peuvent être moins adaptés aux environnements difficiles où des chocs ou des vibrations peuvent se produire en raison de leur fragilité relative. De plus, leur coût de production est généralement plus élevé par rapport aux boîtiers en plastique ou en métal, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications où des considérations économiques sont prioritaires. Néanmoins, pour les applications nécessitant une résistance à la corrosion et une transmission optique exceptionnelle, les boîtiers en verre restent un choix privilégié.

2.3.2.5 Les boîtiers hybrides

Les boîtiers hybrides combinent des caractéristiques de boîtiers en plastique, en métal, en céramique et en verre pour offrir des performances optimales dans des environnements de fonctionnement spécifiques. Ces boîtiers utilisent des substrats en céramique ou en verre pour offrir des propriétés mécaniques et thermiques supérieures, tandis que le revêtement en polymère garantit une atténuation des vibrations et des chocs. Les boîtiers hybrides sont souvent utilisés pour les applications de haute fiabilité telles que les systèmes spatiaux et les équipements militaires. Ils sont également utilisés dans les applications haute température et haute pression telles que les moteurs d'avions et les systèmes de forage pétrolier. Les boîtiers

hybrides sont souvent plus coûteux que les autres types de boîtiers en raison de leur complexité de fabrication et de leurs performances supérieures.

2.3.3 Rôles des composants électroniques

Les composants électroniques sont indispensables dans la conception des systèmes mécatroniques en leur permettant de fonctionner avec précision et efficacité. Ils sont utilisés pour la conversion et le traitement des signaux électriques, le contrôle des mouvements et la gestion de l'énergie. Parmi les composants électroniques les plus largement adoptés, on trouve les capteurs, les circuits intégrés, les actionneurs, et les microcontrôleurs. Les microcontrôleurs sont des puces électroniques programmables qui contrôlent et régulent les mouvements et les opérations des systèmes mécatroniques. Les capteurs, quant à eux, permettent de mesurer les variables physiques telles que la température, la pression, la position et le mouvement. Les actionneurs sont utilisés pour produire des mouvements ou des forces en réponse aux signaux électriques. Les circuits intégrés, quant à eux, sont des composants électroniques qui regroupent plusieurs fonctions électriques dans un seul dispositif. Ils sont utilisés pour la conversion et le traitement des signaux, ainsi que pour le contrôle des mouvements. L'utilisation de ces composants électroniques dans la conception de systèmes mécatroniques permet d'obtenir des performances supérieures, une plus grande précision et une meilleure efficacité énergétique. En plus de ces composants électroniques courants, il existe une grande variété d'autres composants tels que les amplificateurs, les convertisseurs de puissance, les dispositifs de protection et les composants de communication, qui sont également importants pour les systèmes mécatroniques. Les amplificateurs sont utilisés pour amplifier des signaux électriques afin d'améliorer leur qualité et leur précision. Les convertisseurs de puissance sont chargés de transformer l'énergie électrique en une forme exploitable pour alimenter les actionneurs. Les dispositifs de protection servent à protéger les composants électroniques contre les surtensions, les surintensités et les surchauffes. Enfin, les composants de communication transmettent les données entre les différents composants du système mécatronique, ce qui facilite la coordination et la synchronisation des opérations. La sélection et la combinaison judicieuse de ces composants électroniques permettent de concevoir des systèmes mécatroniques robustes, précis et efficaces.

2.3.4 Niveaux d’emballage et des interconnexions

Les niveaux d’emballage et d’interconnexions dans les systèmes mécatroniques jouent un rôle crucial dans leur conception et leur fonctionnement. Ils permettent d’assurer la connexion efficace entre les différents composants électroniques, mécaniques et informatiques d’un système et de les intégrer de manière cohérente pour garantir une performance optimale. Les niveaux d’emballage sont classés en trois catégories : l’emballage des composants électroniques, d’emballage des cartes électroniques et d’emballage des systèmes complets. Le processus d’emballage des composants électroniques englobe plusieurs étapes, notamment la production de la puce, son encapsulation ainsi que les tests de validation. L’emballage des cartes électroniques comprend la conception de la carte, l’installation des composants et leur interconnexion. L’emballage des systèmes complets consiste en l’assemblage de plusieurs cartes électroniques et de leurs composants, la connexion des systèmes d’alimentation, la mise en place des interfaces et la réalisation de tests et de vérifications. Les interconnexions sont également importantes afin d’établir une communication transparente entre les divers éléments d’un système mécatronique. Les interconnexions peuvent être réalisées de différentes manières, telles que le câblage, les connecteurs, les bus de communication ou les réseaux sans fil. L’utilisation de niveaux d’emballage et d’interconnexions appropriés dans la conception de systèmes mécatroniques permet d’optimiser leur performance, leur fiabilité et leur durée de vie.

2.3.4.1 Emballage des composants électroniques

L’emballage des composants électroniques est fondamental pour la conception des systèmes mécatroniques. L’emballage fait référence à la façon dont les composants électroniques sont physiquement encapsulés et reliés entre eux pour former un circuit électronique fonctionnel. Le choix du type d’emballage dépendra du type de composant électronique utilisé, de ses dimensions et de ses propriétés électriques et thermiques. Il existe plusieurs types d’emballage, tels que l’emballage en boîtier, l’emballage en surface et l’emballage en montage traversant. Chaque type d’emballage présente des avantages et des inconvénients en matière de coût, de performance, de fiabilité et de facilité de montage. Les avancées dans les technologies d’emballage ont permis de réduire la taille des composants électroniques, d’améliorer leur performance et leur fiabilité, ainsi que d’augmenter la densité des circuits électroniques sur les cartes de circuits imprimés. Le choix du type d’emballage doit être soigneusement étudié en fonction des besoins spécifiques du système mécatronique, pour maximiser les performances et assurer une durée de vie remarquable.

2.3.4.2 Emballage des cartes électroniques

Les cartes électroniques sont des supports de circuits imprimés qui permettent l'assemblage de plusieurs composants électroniques sur une seule et même plate-forme. L'emballage des cartes électroniques est donc une étape importante dans la conception des systèmes mécatroniques car elle permet de garantir la fiabilité et la performance des composants électroniques tout en assurant leur protection contre les contraintes environnementales telles que les vibrations, l'humidité et la température. Les cartes électroniques peuvent être intégrées dans des boîtiers en plastique, en métal ou en céramique pour offrir une protection supplémentaire. En outre, une variété de technologies de montage sont mises en œuvre pour fixer les composants électroniques sur la carte, tels que le montage traversant, le montage en surface, ou le montage mixte. Le choix du type de montage est conditionné par plusieurs éléments tels que les exigences en matière de performance et de coût, la densité de la carte, la taille des composants, et la complexité du système. En somme, l'emballage des cartes électroniques contribue de manière centrale dans la conception de systèmes mécatroniques en garantissant la fiabilité et la performance des composants électroniques tout en assurant leur protection contre les contraintes environnementales.

2.3.4.3 Emballage des systèmes complets

L'emballage des systèmes complets consiste à intégrer tous les composants électroniques et mécaniques dans un boîtier ou une enveloppe qui protège les composants et assure leur fonctionnement optimal. Le choix du type d'emballage dépend de nombreux facteurs tels que les contraintes environnementales, les exigences de performance, la taille du système, et les coûts. Les techniques de packaging peuvent inclure l'utilisation de boîtiers en plastique ou en métal, de plaques de circuit imprimé, de fils de liaison et de connecteurs. L'intégration de tous les composants dans un seul boîtier peut simplifier la conception, faciliter la maintenance et réduire les coûts. Les systèmes mécatroniques intégrés peuvent également être équipés de mécanismes de refroidissement, tels que des radiateurs ou des ventilateurs, afin de gérer efficacement la chaleur engendrée par les composants électroniques et éviter les défaillances thermiques. En somme, le choix des emballages pour les systèmes complets doit être effectué en prenant en compte un ensemble de facteurs pour assurer une performance optimale et une durabilité accrue des systèmes mécatroniques.

2.3.5 Assemblage et technologie d'interconnexion

L'assemblage et la technologie d'interconnexion sont des étapes cruciales dans la fabrication de systèmes mécatroniques. Il s'agit du processus de connexion des composants électroniques entre eux et avec les cartes électroniques et les systèmes complets. Les techniques d'assemblage incluent le brasage, le collage, l'encapsulation et l'impression. Les techniques d'interconnexion incluent la soudure, les connecteurs mécaniques et les contacts élastiques. La qualité de l'assemblage et de l'interconnexion affecte directement la fiabilité et la durabilité du système mécatronique. Il est donc crucial de garantir la qualité des matériaux employés ainsi que l'expertise de l'équipe responsable de l'interconnexion des composants et de l'assemblage. De plus, les progrès technologiques ont ouvert la voie au développement de techniques d'assemblage et d'interconnexion plus avancées, telles que les technologies sans fil et les communications optiques. Ces avancées contribuent à améliorer les performances et la fiabilité des systèmes mécatroniques. En adoptant ces nouvelles méthodes, Il est envisageable de consolider la qualité et l'efficacité des processus d'assemblage, d'interconnexion et de communication au sein des systèmes mécatroniques.

2.3.5.1 Assemblage par brasage

L'assemblage par brasage est une méthode courante pour relier les composants électroniques aux cartes électroniques ou aux substrats dans les systèmes mécatroniques. Le brasage implique l'utilisation d'un matériau de soudure pour former une liaison permanente entre les composants électroniques et les substrats. Il existe plusieurs types de brasage, tels que le brasage à la vague, le brasage à la refusion, le brasage par immersion et le brasage sélectif.

Chaque méthode de brasage a ses propres caractéristiques en termes de température de traitement, de qualité, de coût, et de contrôle des processus. L'assemblage par brasage est un processus délicat qui nécessite une manipulation précise des composants électroniques et des substrats afin d'éviter les erreurs de montage et les défaillances. La qualité de l'assemblage par brasage est un élément clé pour préserver la fiabilité et prolonger la durée de vie des systèmes mécatroniques. Les avancées dans les techniques de brasage ont conduit au développement de méthodes plus sophistiquées, telles que le brasage sans plomb et le brasage par faisceau laser, qui présentent des bénéfices notamment une diminution des défauts de production, une meilleure qualité de liaison et la réduction des déchets. Les différents modes d'interconnexion des composants montés en surface avec la carte électronique sont présentés dans la figure 2.9 ci-dessous :

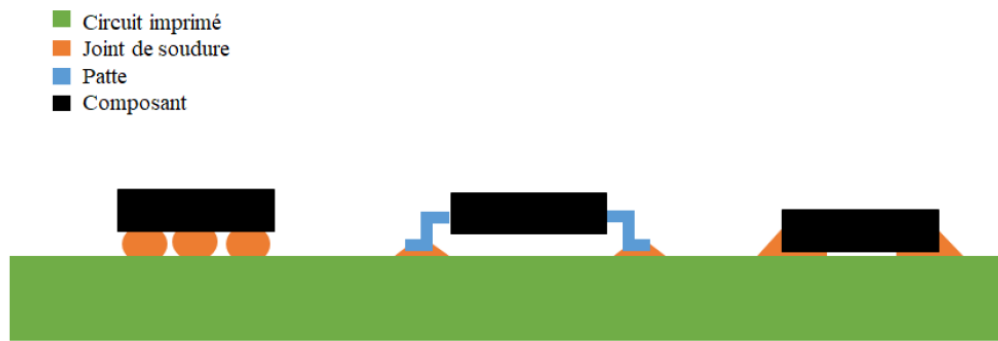


Figure 2.9 Modes d'interconnexion des composants montés en surface avec la carte électronique [20]

2.3.5.2 Assemblage par collage

L'assemblage par collage est une technique utilisée dans l'industrie électronique pour joindre des composants électroniques à une carte électronique ou à d'autres matériaux. Cette méthode consiste à appliquer une colle spéciale sur la surface de la carte électronique ou du composant électronique et à les joindre ensemble. Les adhésifs utilisés pour l'assemblage par collage peuvent être thermiques, chimiques ou à base de rayons UV tel qu'illustré dans la figure 2.10. Cette technique permet d'assembler des composants électroniques plus petits et plus délicats, car elle n'expose pas les matériaux à des températures élevées ou à des contraintes mécaniques excessives. De plus, elle peut être utilisée pour assembler des matériaux ayant des propriétés différentes, tels que les matériaux métalliques et les polymères. Toutefois, l'assemblage par collage peut nécessiter des temps de séchage plus longs et une préparation minutieuse des surfaces pour garantir une adhésion solide et fiable.

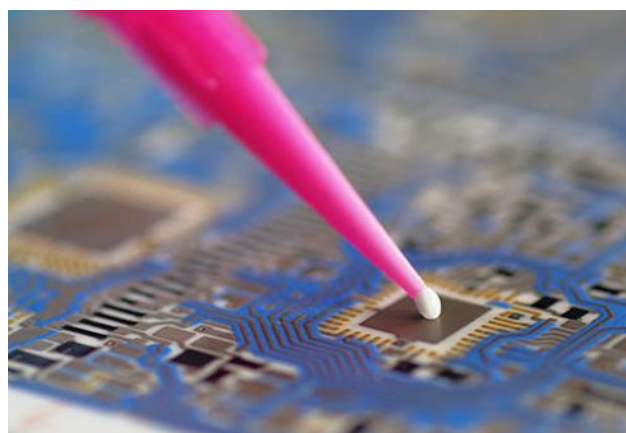


Figure 2.10 Assemblage par collage [6]

2.3.5.3 Assemblage par impression

L'assemblage par impression, également appelé sérigraphie, est une technique d'assemblage couramment utilisée pour les cartes électroniques. Elle consiste à imprimer de la pâte à souder sur les zones où les composants doivent être soudés. Cette pâte à souder est généralement faite d'un alliage de métal en poudre mélangé à un flux pour faciliter la soudure. Une fois la pâte à souder appliquée, les composants sont placés sur les zones appropriées et la carte électronique est chauffée pour faire fondre la pâte à souder et réaliser les soudures. Le potentiel de cette démarche est qu'elle favorise de souder plusieurs composants en même temps, ce qui peut réduire le temps et le coût de production. Cependant, l'inconvénient est que cette méthode ne convient pas aux composants à haute densité de broches, car la pâte à souder peut déborder sur d'autres zones de la carte électronique et causer des courts-circuits ou des erreurs de soudure.

2.4 Les composant électroniques BGA

2.4.1 Définition du composant BGA

Le BGA (Ball Grid Array) est un type de composant électronique qui est utilisé pour les connexions interconnectées entre les composants électroniques et les circuits imprimés. Comparé aux autres types de composants électroniques, les connexions sur le BGA sont réalisées à l'aide d'un réseau de billes de soudure sur la face inférieure du composant, plutôt que des broches ou des pattes. Les billes de soudure sont alignées dans un motif en grille, ce qui résulte en une réduction de l'encombrement sur la carte électronique et une amélioration significative de densité de connexions. Les composants BGA sont couramment utilisés dans les applications qui nécessitent une grande densité de connexions, une haute performance et une fiabilité élevée, tels que les processeurs, les mémoires, les circuits logiques, les FPGA, les ASIC, et les circuits de contrôle de puissance. Les BGA sont également couramment utilisés dans les applications mobiles et les ordinateurs portables. Grâce à leur taille réduite et à leur capacité de dissipation thermique efficace, ces composants assurent une meilleure gestion de la chaleur dissipée.

2.4.2 Les Propriétés électro-thermomécaniques du composant BGA

Les composants BGA (Ball Grid Array) sont connus pour leur densité de broches élevée, leur faible encombrement et leur fiabilité élevée. Ces avantages sont attribuables aux propriétés électrothermiques des BGA, qui permettent une dissipation thermique plus efficace par rapport

aux autres types de composants. La disposition des billes de soudures offre une meilleure conductivité thermique et une résistance réduite à la propagation thermique. Les BGA sont également dotés d'un substrat en céramique ou en polymère, qui est un matériau avec une conductivité thermique élevée. Cela permet à la chaleur de se dissiper rapidement et efficacement à travers le substrat, réduisant ainsi les risques de surchauffe et de défaillance du composant. En somme, les propriétés électrothermiques des composants BGA en font un choix populaire pour les applications nécessitant une haute densité de broches et une dissipation thermique efficace. Les propriétés mécaniques et physiques d'un composant BGA sont importantes pour assurer sa fiabilité et sa durabilité dans des environnements d'utilisation variés. Tout d'abord, la résistance à la traction, la dureté et la rigidité des matériaux utilisés dans le BGA sont des propriétés mécaniques importantes pour assurer la solidité et la robustesse du composant. La capacité du BGA à résister aux contraintes thermiques est également un aspect crucial de sa performance, car il doit être capable de supporter des températures élevées sans se déformer ou se fissurer. Les propriétés thermiques du BGA, comme sa conductivité thermique et sa capacité thermique, sont donc également importantes. En outre, la capacité du BGA à résister aux chocs, aux vibrations et aux contraintes environnementales est un autre aspect important de sa performance. Enfin, les propriétés électriques du BGA, telles que la capacité, l'inductance et la résistance, sont d'une importance capitale pour la transmission sans perturbation des signaux électroniques à travers le composant.

2.4.3 Fonctionnement du composant BGA

Le fonctionnement d'un composant BGA repose sur l'établissement d'une connexion entre les billes de soudure situées sous la puce et les pistes de cuivre du PCB. Les billes de soudure assurent le transfert des signaux électriques entre la puce et le PCB. Ces signaux électriques sont ensuite acheminés par les pistes de cuivre jusqu'aux broches de la puce, qui permettent la connexion avec le reste du système. Pour garantir un fonctionnement fiable et stable du système électronique, le composant BGA dispose d'un dissipateur thermique situé sous la puce, qui contribue à une meilleure dissipation de la chaleur vers l'environnement. Il convient de noter que les composants BGA peuvent présenter des défis à relever lorsqu'il s'agit de réparation ou de remplacement, en raison de la soudure souvent dissimulée sous le boîtier. Dans de tels cas, des techniques de reprise de soudure, telles que le rebillage ou le remplacement du composant, peuvent être nécessaires en cas de défaillance. Il est donc primordial de veiller à la sélection de composants BGA de qualité supérieure et de veiller à ce que l'assemblage et la soudure soient

réalisés en veillant à une grande précision, ce qui garantit une durabilité et une fiabilité optimales du produit final.

2.4.4 Le BGA dans les systèmes mécatroniques industriels

Dans les environnements industriels exigeants, tels que ceux de de l'aérospatiale l'automobile, de la robotique, de la production manufacturière, et de l'énergie, les systèmes mécatroniques sont soumis à des contraintes élevées telles que des vibrations, des chocs et des températures extrêmes. Pour faire face à ces défis, le BGA (Ball Grid Array) a été spécifiquement conçu pour offrir une fiabilité élevée et une durée de vie prolongée dans de telles conditions.

En effet, les composants BGA sont largement utilisés dans les systèmes mécatroniques industriels pour leur capacité à résister aux contraintes environnementales sévères. Leur adoption permet aux ingénieurs et concepteurs de développer des systèmes plus efficaces, fiables et rentables adaptés aux besoins des environnements industriels exigeants. Grâce à la résistance du BGA aux vibrations, aux chocs et aux températures élevées, ces systèmes peuvent fonctionner de manière fiable et durable, contribuant ainsi à l'efficacité globale des opérations industrielles. Ainsi, les avantages offerts par les composants BGA sont précieux pour les ingénieurs et concepteurs qui cherchent à concevoir des systèmes mécatroniques robustes et performants dans les environnements industriels. En utilisant des BGAs, ils peuvent garantir une meilleure fiabilité, une durée de vie prolongée et une meilleure rentabilité de leurs produits dans des conditions de travail exigeantes. Voici quelques exemples de l'utilisation de composants BGA dans les systèmes mécatroniques industriels :

- Dans les systèmes de commande de machines-outils : les composants BGA sont largement utilisés pour la mise en œuvre de cartes de contrôle des machines-outils industrielles. Ils permettent une intégration plus compacte des composants, une dissipation de chaleur efficace et une fiabilité accrue.
- Dans les systèmes de vision industrielle : les caméras industrielles utilisent souvent des composants BGA pour intégrer des processeurs de traitement d'image et de la mémoire dans un seul boîtier. Cela permet une intégration compacte et une grande fiabilité.
- Dans les systèmes de contrôle de la production : les composants BGA sont utilisés dans les cartes de contrôle pour assurer le contrôle de la production, l'analyse des données et la communication avec les systèmes informatiques de l'usine.
- Dans les systèmes de contrôle d'accès : les lecteurs de carte d'accès industriels utilisent des composants BGA pour la communication avec les systèmes informatiques, la collecte de données, et la gestion des accès.

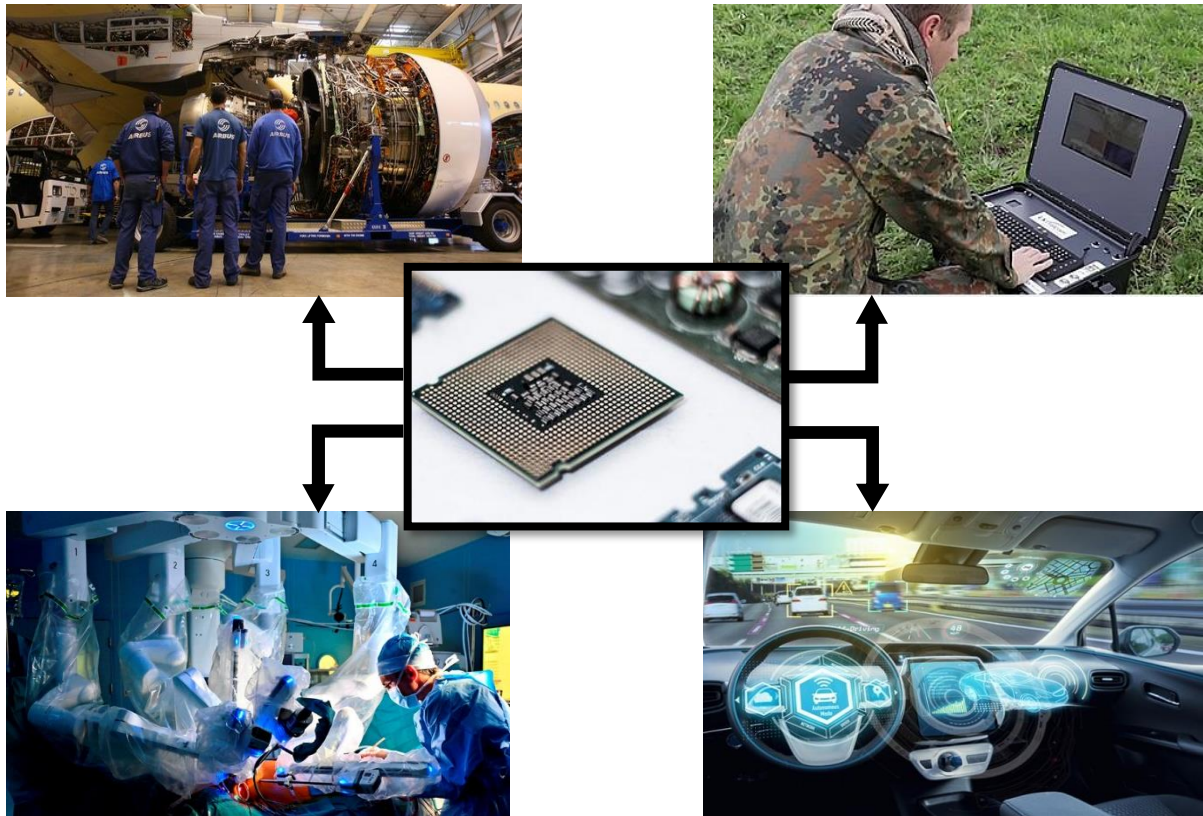


Figure 2.11 Domaines industriels d'application du BGA

En général, les composants BGA sont exploitées dans un large éventail de secteurs industriels, tel que présentés dans la figure 2.11, qui nécessitent une haute fiabilité, une faible consommation d'énergie, une petite taille et une dissipation de chaleur efficace.

Pour continuer notre exploration du BGA, nous allons maintenant aborder les mécanismes de défaillances qui peuvent affecter ce composant électronique.

2.5 Les mécanismes de défaillance du composant BGA

Les mécanismes de défaillance du composant BGA est un sujet important dans le domaine de l'ingénierie électronique. Les BGA sont soumis à diverses contraintes, telles que les contraintes mécaniques, thermiques, électriques et environnementales, qui peuvent entraîner des défaillances du composant. Il est donc crucial de connaître les divers modes de défaillance afin de pouvoir développer des systèmes électroniques solides et fiables. Dans cette optique, nous allons explorer les mécanismes de défaillance les plus courants des BGA et comment ils peuvent être évités ou atténués. Les mécanismes de défaillances du composant BGA peuvent être causés sous l'emprise de plusieurs éléments, tels que les contraintes électriques, les variations de température, les contraintes mécaniques, et l'humidité. Les chercheurs ont consacré des efforts

considérables à l'étude de ces mécanismes, aboutissant à leur classification en deux grandes catégories : le mécanisme de surcharge et le mécanisme d'usure, conformément à ce qui est présenté dans la figure 2.12 ci-annexée :

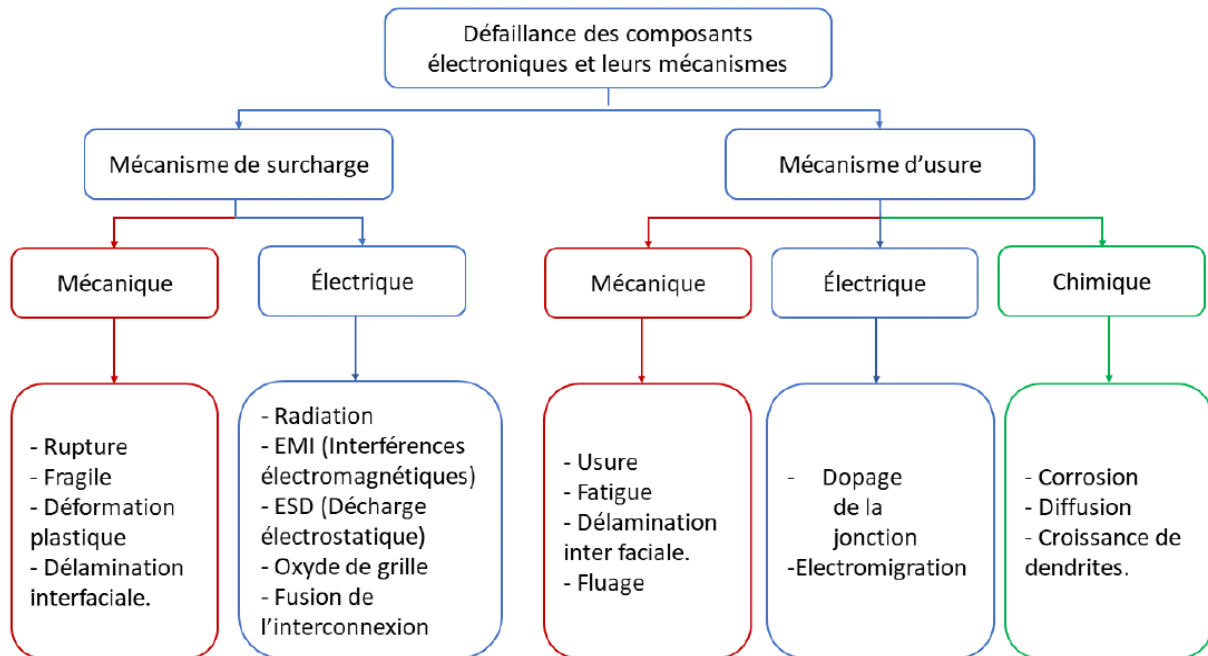


Figure 2.12 les mécanismes de défaillances des composants électroniques [7]

L'un des principaux mécanismes de défaillance est la fatigue des soudures, qui se produit lorsqu'un nombre excessif de cycles thermiques entraîne des fissures dans les soudures BGA. Les soudures peuvent également être endommagées par une surcharge électrique, une corrosion ou une contamination, ce qui peut entraîner une rupture de la connexion électrique. Un autre mécanisme de défaillance courant est la défaillance interne du boîtier, qui peut être causée par des contraintes mécaniques ou des variations de température. Cela peut entraîner une fissuration, une délamination ou une rupture du boîtier affectant ainsi la fiabilité et les performances du composant BGA. Enfin, la contamination peut également causer des défaillances du BGA. Les particules étrangères, telles que les particules métalliques, les résidus de flux et la poussière, peuvent s'accumuler à la surface du BGA et causer des problèmes de connexion électrique et de conductivité thermique.

2.5.1 Fatigue thermique

La fatigue thermique est un mécanisme de détérioration d'un matériau qui se produit en raison de cycles répétés de chauffage et de refroidissement. Dans le cas des BGA, la chaleur générée par le fonctionnement du composant provoque une dilatation thermique différentielle entre le

substrat et la balle, ce qui peut entraîner des contraintes mécaniques. Avec le temps, ces contraintes peuvent causer des microfissures dans les soudures, qui peuvent se propager et causer des défaillances au niveau du joint de soudure. Les BGA sont particulièrement sensibles à la fatigue thermique à cause de leurs dimensions réduites et de leur densité élevée, qui peuvent entraîner des contraintes mécaniques plus importantes. Des exemples de défauts dus à la fatigue thermique dans les BGA peuvent inclure des fissures dans les joints de soudure, des décollements et des fractures des billes de soudure. Ces défauts peuvent entraîner une perte de connectivité électrique et causer des pannes intermittentes ou permanentes du système. Des applications industrielles critiques telles que les systèmes de contrôle de processus, les équipements de production et les systèmes de communication peuvent être particulièrement vulnérables aux défaillances de BGA causées par la fatigue thermique. Il est donc crucial de comprendre et de surveiller les mécanismes de défaillance potentiels pour garantir la fiabilité et la longévité de ces systèmes.

2.5.2 Fracture fragile

La fracture fragile est un autre mécanisme de défaillance commun pour les composants BGA. Ce type de défaillance se produit généralement lorsque le matériau du boîtier est soumis à une contrainte mécanique importante et soudaine, telle qu'une charge excessive. Le matériau peut alors se fracturer sans se déformer significativement, ce qui peut entraîner une rupture complète du boîtier et une défaillance totale du composant BGA. Les dommages causés par des chocs physiques ou des vibrations excessives peuvent également contribuer à la propagation de la fracture fragile, augmentant ainsi le risque de défaillance du composant. Pour prévenir ce type de défaillance, des tests de choc et des simulations de stress sont effectués pour évaluer la résistance du matériau du boîtier et la capacité du composant à résister aux contraintes mécaniques.

2.5.3 Déformation plastique

La déformation plastique est un autre mécanisme de défaillance potentiel pour les composants BGA. Elle se produit lorsqu'un stress important est appliqué au composant, dépassant sa limite élastique et provoquant une déformation permanente. Cela peut se produire lors d'une chute ou d'un choc physique, ou encore lors de l'assemblage si les forces d'insertion sont trop élevées. La déformation plastique peut entraîner des dommages aux connexions électriques ou aux couches internes du composant, entraînant une panne à court ou à long terme. Les fabricants de

BGA mettent en œuvre des techniques pour minimiser les risques de déformation plastique, telles que la sélection de matériaux à faible contrainte et la conception de motifs de montage qui réduisent les contraintes mécaniques sur le composant.

2.5.4 Le délaminage

Le délaminage est un phénomène fréquent qui peut causer la défaillance des composants BGA. Il se produit lorsque les différentes couches du substrat du BGA se séparent en raison d'une contrainte excessive. Cette contrainte peut être due à des variations de dilatation thermique entre les couches, à des chocs ou à des vibrations excessives. Le délaminage affaiblit la structure du BGA, ce qui peut entraîner une rupture prématurée du composant. Pour prévenir le délaminage, il est essentiel de concevoir la carte de circuit imprimé de manière appropriée, de choisir des matériaux adéquats et de mettre en œuvre des procédés de fabrication appropriés. Pour assurer la fiabilité et la durabilité des composants BGA, il est impératif de prendre en compte attentivement ces potentiels facteurs de défaillance lors de leur conception et de leur utilisation. Cela garantira leur bon fonctionnement et leur résistance dans la durée.

Après une étude approfondie des mécanismes de défaillance du BGA, tels que la fatigue thermique, la fracture fragile, la déformation plastique et le délaminage, entre autres, il est naturel de se tourner vers l'exploration de modèles de fatigue associés à ces mécanismes.

2.6 Modèles de fatigue

L'utilisation d'outils de simulation dès les premières étapes de la conception permet d'évaluer la fiabilité des composants BGA. Cela permet de détecter et d'anticiper d'éventuels problèmes de fiabilité, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées pour améliorer la robustesse des composants. Cette évaluation repose sur des modèles de fiabilité des joints de soudure qui se basent sur des données d'essais réels, une modélisation constitutive précise et une compréhension approfondie des mécanismes d'endommagement prédominants. Une simulation adéquate est également nécessaire pour mener à bien cette tâche. Les composants électroniques sont fréquemment exposés à des conditions de cyclage thermique et/ou de puissance pendant leur utilisation. Les joints de soudure sont particulièrement vulnérables aux contraintes et aux déformations engendrées par les variations de température et de puissance, ce qui constitue le principal mécanisme de défaillance. Les différences de coefficient d'expansion thermique (CET) entre les matériaux utilisés peuvent accentuer ces contraintes et contribuer à la fatigue des joints de soudure. La modélisation de la fiabilité des joints soudés se décompose en deux

volets principaux. L'étape initiale basé sur la modélisation par éléments finis permet de prédire les contraintes et les déformations des joints soudés pendant le cycle thermique. Cette analyse permet d'obtenir des paramètres de sortie essentiels tels que la déformation plastique ou la densité d'énergie par cycle, qui sont extraits lors du traitement ultérieur des résultats obtenus. Dans la deuxième étape, les paramètres de sortie de l'analyse par éléments finis sont utilisés pour appliquer un modèle de prédiction de la durée de vie des joints de soudure. Ce modèle permet de calculer le nombre de cycles jusqu'à la rupture du joint de soudure. Pour obtenir des résultats précis, les constantes matérielles du modèle de prédiction de la durée de vie des joints de soudure doivent être évaluées en se basant sur des données expérimentales de croissance des fissures pour des composants présentant des facteurs de forme géométrique similaires.

Dans leur étude, Lee et ses collègues [22] ont proposé une classification des modèles de fatigue des soudures en cinq classes distinctes. Ces catégories comprennent les modèles qui se basent sur la contrainte, ceux qui se basent sur la déformation plastique, ceux qui se basent sur la déformation de fluage, ceux qui se basent sur l'énergie, ainsi que ceux qui se basent sur l'endommagement. En plus de ces classes, d'autres méthodes ont été répertoriées en tant que modèles empiriques. Au total, ils ont recensé 14 modèles différents dans la littérature, chacun développé sur la base de diverses hypothèses, en tenant compte des aspects métallurgiques et physiques de la fatigue. Une brève présentation des caractéristiques de ces 14 modèles de fatigue est présentée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Modèles de fatigues [22], [23]

Numéro	Modèles de fatigue	Classe de modèle	Paramètres	Composants d'application
1	Coffin-Manson	Déformation plastique	Déformation plastique	Tous
2	Déformation totale	Déformation élastique + plastique	Plage de déformation	Tous
3	Solomon	Déformation par cisaillement plastique	Déformation par cisaillement plastique	Tous

4	Engelmaier	Déformation totale de cisaillement	Déformation totale de cisaillement	Plombé & sans plomb, TSOP
5	Miner	Superposition (plastique et fluage)	Rupture plastique & Rupture par fluage	PQFP, FCOB
6	Knecht & Fox	Matrice de fluage	Fluage de la matrice Déformation par cisaillement	Tous
7	Syed	Accumulation de l'énergie de déformation de fluage	L'énergie du gbs et l'énergie du mc	PBGA, SMD, NSMD
8	Dasgupta	Énergie totale de déformation	Énergie	LLCC, TSOP
9	Liang	Densité d'énergie de contrainte/déformation	Énergie	BGA et Joints sans plomb
10	Heinrich	Densité d'énergie	Énergie	BGA
11	Darveaux	Densité d'énergie	Dommages + énergie	PBGA, sans plomb
12	Pan	Densité d'énergie de déformation	Énergie de déformation Densité et plastique Densité d'énergie	LCCC
13	Stolkarts	Accumulation des dommages	Dommages	Tous
14	Norris & Landzberg	Température et fréquence	Température Fréquence	Tous

Les modèles de fatigue ont été largement utilisés pour prédire la durée de vie de divers boîtiers, qu'ils contiennent ou non du plomb. De plus, ces modèles ont également été appliqués aux interconnexions des joints de soudure de type BGA ou Flip Chip. L'utilisation de ces modèles

de fatigue nécessite généralement des essais de fatigue à faible cycle de référence afin d'établir les valeurs des constantes spécifiques au modèle de fatigue. Ces données de base sont essentiellement liées à la géométrie du joint de soudure en question. Outre la géométrie du joint de soudure, les conditions de cyclage thermique exercent une influence significative sur la durée de vie en fatigue, et il est donc crucial de les prendre en compte de manière rigoureuse.

2.7 Conclusion

En récapitulant ce premier chapitre, nous avons examiné les fondements nécessaires pour comprendre et aborder la problématique de la fiabilité et de l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. Nous avons examiné en détail les concepts clés liés au système mécatronique, aux composants électroniques, aux joints de brasure, aux mécanismes de défaillance et aux modèles de fatigue. Cette étude bibliographique nous a fourni l'occasion de définir les termes essentiels et de poser les bases nécessaires à notre étude. Au prochain chapitre, nous passerons de l'examen de la littérature existante à la modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique des joints de brasure. Nous explorerons les différents modèles et approches utilisés pour étudier le comportement des joints de brasure sous des charges électro-thermomécaniques, en tenant compte des aspects mécaniques, thermiques et électriques. Cette modélisation sera un outil précieux pour étendre notre connaissance des interactions complexes entre les différents phénomènes et d'anticiper le comportement des joints de brasure dans des conditions réelles.

Chapitre 3

Modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique

3.1	INTRODUCTION	59
3.2	PRESENTATION DU COUPLAGE MULTIPHYSIQUE	60
3.2.1	Définitions du Couplage multiphysique	60
3.2.2	Types de Couplage multiphysique	60
3.2.2.1	Couplage faible (Couplage séquentiel).....	60
3.2.2.2	Couplage fort (couplage simultané)	61
3.2.2.3	Couplage hybride.....	62
3.2.3	Exemples de phénomènes multi-physique.....	62
3.2.3.1	Le couplage thermo-mécanique.....	62
3.2.3.2	Le couplage électromécanique	63
3.2.3.3	Le couplage fluide-structure	63
3.3	MODELISATION DU COUPLAGE ELECTRO-THERMIQUE	63
3.3.1	Effet Peltier	64
3.3.2	Effet Seebeck	64
3.3.3	Effet joules	66
3.3.4	Analogie électrique-thermique.....	66
3.4	EQUATIONS FONDAMENTALES DU COUPLAGE THERMO-MECANIQUE	67
3.4.1	Transfert thermique au sein du composant BGA.....	67
3.4.1.1	Transfert par conduction	68
3.4.1.2	Transfert par convection	69
3.4.1.3	Transfert par rayonnement.....	70
3.4.2	Modélisation thermomécanique.....	70
3.5	MODELISATION DU COUPLAGE ELECTRO-THERMOMECANIQUE	72
3.6	APPROXIMATION PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	73
3.6.1	Méthode des éléments finis (EF)	73
3.6.2	Le logiciel ANSYS	74

3.6.2.1 ANSYS Workbench.....	75
3.6.2.2 ANSYS APDL.....	76
3.7 CHARGEMENTS APPLIQUES	76
3.8 RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE ELECTRO-THERMOMECHANIQUE DU COMPOSANT BGA	79
3.8.1 Calcul des déplacements	79
3.8.2 Effet de charge électrothermique sur le déplacement	82
3.8.3 Effet de charge électrothermique sur la déformation plastique	83
3.9 DETERMINATION DES ZONES DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES.....	85
3.10 FORMATION DE LA COUCHE IMC	89
3.11 CONCLUSION	92

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons minutieusement examiné les éléments clés liés à la fiabilité et à l'optimisation des joints de brasure pour les composants BGA. Cette étude approfondie nous a permis d'identifier les mécanismes de défaillance, les modèles de fatigue et les progrès récents dans ce domaine. Forts de cette compréhension approfondie, nous abordons maintenant une étape cruciale de notre recherche : la modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique des joints de brasure. Le but principal de ce chapitre est de créer des modèles avancés et des outils de simulation pour analyser et anticiper le comportement mécanique, thermique et électrique des joints de brasure dans des situations réelles. En adoptant une approche de couplage multiphysique, nous sommes en mesure de considérer les interactions complexes entre ces différents phénomènes, ce qui rend possible de générer des résultats plus précis et pertinents. Dans ce chapitre, nous entamerons notre exploration des principes fondamentaux de la modélisation analytique et numérique appliquée aux joints de brasure. Nous mettrons en lumière les équations et les méthodes utilisées pour décrire le comportement de ces joints. De plus, nous aborderons les bases du couplage multiphysique, ainsi que les défis inhérents à sa modélisation. Cette approche combinée nous permettra d'acquérir une vision plus claire des interactions complexes entre les différents phénomènes mécaniques, thermiques et électriques qui influencent les performances des joints de brasure. En établissant ces fondements solides, nous serons en mesure de développer des modèles et des outils de simulation avancés, nécessaires pour analyser de manière précise le comportement des joints de brasure dans des conditions réelles de fonctionnement. Par la suite, nous procéderons à une description détaillée de la mise en œuvre de notre approche de modélisation à l'aide de logiciels de simulation ANSYS. Nous présenterons les différentes étapes de la modélisation, allant de la création de la géométrie du joint de brasure à la définition des matériaux, des conditions aux limites et des charges appliquées. Une attention particulière sera accordée aux analyses mécaniques, thermiques et électriques que nous avons effectuées afin de saisir les interactions multiphysiques au sein des joints de brasure. En utilisant ces outils de simulation avancés, nous serons en mesure d'obtenir une compréhension approfondie du comportement des joints de brasure dans des conditions réelles, ce qui nous permettra de mieux appréhender leur fiabilité et d'optimiser leur performance. De plus, nous procéderons à une évaluation de la zone de concentration de contraintes au niveau de la bille de soudure, ce qui nous permettra d'approfondir notre compréhension des contraintes locales et des risques potentiels de défaillance. Cette évaluation revêt une importance cruciale, car elle guidera nos futures analyses

et contribuera à l'amélioration de la fiabilité des joints de brasure. En identifiant les zones de contraintes élevées, nous pourrions prendre des mesures préventives ciblées pour renforcer ces points critiques et minimiser les risques de défaillance. Une telle approche proactive permettra d'accroître la robustesse et la durée de vie des joints de brasure, ce qui est essentiel pour garantir la performance optimale des composants électroniques.

3.2 Présentation du Couplage multiphysique

3.2.1 Définitions du Couplage multiphysique

Le couplage multi-physique est une approche de modélisation qui prend en compte plusieurs phénomènes physiques simultanément pour étudier le comportement de systèmes complexes. Dans cette approche, les différents phénomènes physiques sont étroitement liés et interdépendants, ce qui signifie que la modification de l'un peut avoir un impact significatif sur les autres. Le couplage multi-physique est largement utilisé dans les domaines de la biologie, de la mécanique, de l'énergie, de l'aérospatiale, et de l'environnement car de nombreux systèmes dans ces domaines sont composés de plusieurs phénomènes physiques interdépendants. Par exemple, le comportement des fluides dans un système de combustion est sensible aux réactions chimiques qui se déroulent à l'intérieur, tandis que les réactions chimiques sont influencées par les propriétés du fluide. Le couplage multi-physique peut donc aider à une meilleure compréhension du comportement global du système en modélisant tous ces phénomènes simultanément. Dans cette section, nous allons discuter des différentes approches de couplage multi-physique, notamment le couplage faible et le couplage fort. Nous allons également aborder les points positifs et les restrictions de chaque approche, ainsi que les outils et les techniques disponibles pour résoudre les problèmes de couplage multi-physique. Enfin, nous allons présenter plusieurs exemples d'application pour illustrer l'importance du couplage multi-physique dans la modélisation de systèmes complexes.

3.2.2 Types de Couplage multiphysique

3.2.2.1 Couplage faible (Couplage séquentiel)

Le couplage faible est une approche de couplage multi-physique dans laquelle les modèles physiques sont résolus de manière indépendante, puis les résultats sont transférés d'un modèle à l'autre. Cette approche est souvent utilisée pour les systèmes complexes qui peuvent être

divisés en plusieurs sous-systèmes physiques indépendants, et pour lesquels les interactions entre les sous-systèmes peuvent être modélisées à l'aide de conditions aux limites appropriées. Dans le couplage faible, chaque sous-système physique est résolu en utilisant un modèle physique indépendant, qui est souvent appelé sous-modèle. Les résultats de chaque sous-modèle sont ensuite transférés aux autres sous-modèles en utilisant des conditions aux limites appropriées, qui reflètent les interactions physiques entre les sous-systèmes.

Les avantages du couplage faible sont nombreux. Tout d'abord, il permet de réduire la complexité des modèles physiques en les divisant en sous-systèmes physiques indépendants. De plus, il permet de résoudre chaque sous-modèle de manière plus efficace en utilisant des méthodes numériques adaptées. Enfin, il permet d'utiliser des outils de simulation spécialisés pour chaque sous-modèle, ce qui peut améliorer la précision des résultats de simulation.

Cependant, le couplage faible présente également des limites. Tout d'abord, il peut être difficile de définir les conditions aux limites appropriées pour chaque sous-modèle, en particulier lorsque les interactions entre les sous-systèmes sont complexes. De plus, les résultats de simulation obtenus avec le couplage faible peuvent être moins précis que ceux obtenus avec le couplage fort, car les interactions physiques entre les sous-systèmes sont approximées. Enfin, le couplage faible peut être plus lent que le couplage fort, car il nécessite plusieurs passes de simulation pour transférer les résultats entre les sous-modèles.

3.2.2.2 Couplage fort (couplage simultané)

Le couplage fort est une approche de couplage multi-physique dans laquelle les modèles physiques sont résolus simultanément, en utilisant un seul modèle de simulation global. Cette approche est souvent utilisée pour les systèmes physiques fortement couplés, dans lesquels les interactions entre les sous-systèmes sont complexes et ne peuvent pas être facilement modélisées à l'aide de conditions aux limites.

Dans le couplage fort, tous les sous-systèmes physiques sont résolus simultanément en utilisant un modèle de simulation global. Les équations de chaque sous-système sont intégrées dans le modèle global, qui est ensuite résolu en utilisant des méthodes numériques adaptées.

Les avantages du couplage fort sont nombreux. Pour commencer, il permet de prendre en compte les relations physiques complexes entre les sous-systèmes, ce qui peut améliorer la précision des résultats de simulation. De plus, il permet d'utiliser des méthodes numériques adaptées pour résoudre efficacement les équations de tous les sous-systèmes simultanément. Enfin, il peut être plus rapide que le couplage faible, car il ne nécessite pas de passes de simulation pour transférer les résultats entre les sous-modèles.

Cependant, le couplage fort présente également des limites. Tout d'abord, il peut être plus complexe à implémenter que le couplage faible, car il nécessite la résolution simultanée des équations de tous les sous-systèmes. De plus, les modèles physiques couplés peuvent être plus sensibles aux erreurs numériques et à la convergence, ce qui peut affecter la précision des résultats de simulation. En dernier lieu, le couplage fort peut engendrer des besoins plus importants en ce qui concerne le temps de calcul et les ressources informatiques, notamment pour les systèmes physiques extrêmement complexes.

3.2.2.3 Couplage hybride

Le couplage hybride est une combinaison des deux approches précédentes. Dans cette méthode, les modèles physiques sont résolus de manière séquentielle jusqu'à atteindre un point de couplage, où les résultats de la simulation sont échangés entre les différents modèles. Ensuite, les modèles sont résolus simultanément jusqu'à la fin de la simulation. Cette approche est fréquemment employée pour les systèmes physiques complexes, où certaines parties présentent un couplage plus étroit que d'autres. Il existe plusieurs approches pour le couplage multi-physique, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients selon les besoins de simulation et les caractéristiques des systèmes physiques en question. Il est donc essentiel de sélectionner l'approche la plus pertinente en fonction des exigences particulières de chaque application. Dans notre étude, nous optons pour le couplage fort, car notre objectif est d'analyser en détail tous les domaines qui interagissent et dépendent.

3.2.3 Exemples de phénomènes multi-physique

Le couplage multi-physique est une méthode puissante pour modéliser et simuler des phénomènes physiques complexes qui impliquent des interactions entre différents domaines physiques. Voici quelques exemples de phénomènes multi-physique :

3.2.3.1 Le couplage thermo-mécanique

Ce phénomène se produit lorsque la chaleur et la déformation sont simultanément présentes dans un système physique. Ce type de couplage se produit à titre d'exemple dans les procédés de fabrication où des pièces sont soumises à des températures élevées qui entraînent des contraintes thermiques qui peuvent altérer la forme de la pièce.

3.2.3.2 Le couplage électromécanique

Ce phénomène se produit lorsque des charges électriques sont présentes dans un système physique, entraînant des forces électromagnétiques qui peuvent affecter la déformation ou la forme de la structure. Ce type de couplage se produit dans les dispositifs électroniques, tels que les capteurs et les actionneurs, où la déformation mécanique est contrôlée par des signaux électriques.

3.2.3.3 Le couplage fluide-structure

Ce phénomène se produit lorsque des structures sont immergées dans des fluides et soumises à des forces hydrodynamiques, qui affectent leur comportement mécanique. Ce type de couplage se produit dans les champs d'application des énergies renouvelables, de l'ingénierie navale et de l'aéronautique où la réponse des structures aux forces hydrodynamiques est cruciale. Pour le couplage acoustique-structure, il se produit lorsque des ondes acoustiques se propagent dans des structures, entraînant des vibrations mécaniques qui peuvent affecter la performance de la structure. Ce type de couplage se produit dans les domaines de la mécanique des matériaux, de l'ingénierie acoustique et de l'acoustique architecturale où la réduction des vibrations indésirables est cruciale.

Ces exemples montrent la diversité des phénomènes multi-physique qui peuvent être modélisés et simulés grâce au couplage multi-physique. La compréhension de ces phénomènes et de leur couplage est essentielle pour la conception et l'optimisation de systèmes complexes, ce qui justifie l'importance croissante de cette approche en ingénierie et en science.

3.3 Modélisation du couplage électro-thermique

Le couplage électro-thermique dans le cas des composants électroniques se produit lorsque la circulation d'un courant électrique à travers un matériau conducteur entraîne la production ou l'absorption de chaleur. Ce phénomène est régi par divers effets électrothermiques tels que l'effet Peltier, l'effet Seebeck et l'effet Joule. L'effet Peltier se manifeste par la génération ou l'absorption de chaleur aux jonctions de deux matériaux différents lorsque le courant électrique les traverse. À l'inverse, l'effet Seebeck se produit lorsqu'une différence de température appliquée aux jonctions de deux matériaux différents génère une tension électrique. Quant à l'effet Joule, il se manifeste lorsque le courant électrique rencontre une résistance dans le matériau et produit de la chaleur. La compréhension et la modélisation mathématique précise de ces effets sont essentielles dans le cadre du couplage électro-thermique. En effet, une

modélisation précise permet de prédire la réponse thermique et électrique des matériaux conducteurs en présence d'un courant électrique. Ces effets revêtent une grande importance pratique dans de nombreuses applications, telles que le refroidissement des dispositifs électroniques, la mesure de température sans contact, la production d'énergie électrique et la dissipation de chaleur dans les circuits électroniques.

3.3.1 Effect Peltier

L'effet Peltier est un phénomène thermoélectrique qui se manifeste par le transfert de chaleur lorsqu'un courant électrique circule à travers des jonctions de matériaux conducteurs de natures différentes. Ce phénomène est caractérisé par le déplacement de chaleur de l'une des jonctions vers l'autre, créant ainsi un gradient de température. Lorsque du courant électrique circule à travers ces jonctions, l'une d'entre elles se refroidit légèrement tandis que l'autre se réchauffe. L'effet Peltier est donc un exemple de couplage électro-thermique, et sa relation est régie par la loi de Peltier. Cette loi établit la relation entre la quantité de chaleur produite ou absorbée et le courant électrique appliqué. Selon cette loi, la quantité de chaleur Q produite ou absorbée par l'effet Peltier est directement proportionnelle au courant électrique I et à la constante de Peltier π , qui dépend des propriétés thermiques et électriques des deux métaux en contact. Ainsi, la relation mathématique du coefficient Peltier Π qui est défini comme la puissance thermique P_{th} dégagée ou absorbée par unité d'intensité de courant I est donnée par :

$$\Pi_{ab} = \frac{P_{th}}{I} \quad (1)$$

L'effet Peltier a des applications pratiques importantes telles que la production d'énergie électrique. En effet, l'effet Peltier est utilisé dans les cellules thermoélectriques dans le but de convertir la chaleur en énergie électrique. Il est également utilisé pour le refroidissement de dispositifs électroniques, tels que les processeurs et les diodes laser, où l'effet Peltier est utilisé pour dissiper la chaleur générée par ces dispositifs. En conclusion, l'effet Peltier est d'un intérêt particulier en raison de ses applications variées pratiques dans une multitude de secteurs incluant la production d'électricité et le refroidissement efficace des dispositifs électroniques. Sa modélisation mathématique précise est essentielle pour comprendre et prédire la réponse thermique des matériaux conducteurs en présence d'un courant électrique.

3.3.2 Effet Seebeck

L'Effet Seebeck, également appelé effet thermoélectrique, est un phénomène physique qui se produit lorsque deux matériaux différents sont mis en contact à des températures différentes.

Cela engendre un gradient de température et de tension au sein des matériaux, ce qui entraîne un flux de courant électrique. Plus précisément, l'effet Seebeck est causé par la création d'une différence de potentiel électrique due aux porteurs de charge dont l'énergie cinétique varie en fonction de l'écart de température. Lord Kelvin a démontré une relation entre les effets Peltier et Seebeck, où le coefficient Peltier est corrélé au coefficient Seebeck S :

$$S_{ab} = \frac{\Pi_{ab}}{T} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_Y - V_Z}{T_W - T_X} \quad (2)$$

Où T est la température de la jonction considérée.

Les équations constitutives du couplage électro thermique sont basées sur la substitution des deux effets mentionnés ultérieurement dans les équations (16) et (17) dans les équations de flux de chaleur (13) et (14) de sorte que nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} Q + Q^p = \Pi \cdot I - \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ I = \sigma \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - S \cdot \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

Ces termes : $\Pi \cdot I$ et $S \cdot \Delta T$ sont les termes de couplage électrothermique.

La résolution d'un problème thermique consiste à trouver un champ de température $T(t)$ à partir de l'équation de conduction thermique en tenant compte des conditions aux limites et des conditions initiales.

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$\begin{cases} -\lambda \cdot S \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = P_{int}(t) \\ T(t, x=0) = T_a \end{cases} \quad (4)$$

T_a : Température ambiante = 25°C

La puissance d'entrée appliquée au circuit thermique est égale à la puissance dissipée générée par la source de courant I et la résistance R .

Les dispositifs utilisant cet effet sont appelés générateurs thermoélectriques ou thermocouples. Ils sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans l'utilisation de sources de chaleur renouvelables pour produire de l'énergie telles que les déchets industriels et les centrales géothermiques, ainsi que dans les systèmes de refroidissement et de chauffage pour les applications électroniques.

La littérature propose quelques modèles thermiques utiles pour la résolution électrothermique des composants de puissance. Nous distinguons les méthodes par différences finies et les

méthodes par éléments finis. Compte tenu des avantages de la deuxième méthode par rapport à la première, nous avons opté pour l'approche des éléments finis pour développer le modèle.

3.3.3 Effet joules

L'Effet Joule, aussi noté en tant qu'Effet Joule-Thomson, est un phénomène physique qui se produit lorsqu'un courant électrique traverse un matériau qui présente une certaine résistance électrique. Lorsque les électrons circulent à travers le matériau, ils interagissent avec les atomes de celui-ci, provoquant ainsi une agitation thermique. Cette agitation thermique entraîne une élévation de la température du matériau, qui peut à son tour entraîner une variation de ses propriétés physiques, telles que sa conductivité électrique ou sa permittivité. L'Effet Joule est souvent utilisé en électronique pour générer de la chaleur ou pour transformer l'énergie électrique en chaleur. Cependant, il peut également avoir des effets indésirables, tels que la surchauffe de composants électroniques ou la dégradation des performances des dispositifs électroniques. En couplage multi-physique, l'Effet Joule peut être utilisé pour modéliser les interactions électro-thermique dans les matériaux. Effectivement, cette approche permet de considérer l'effet thermique sur les propriétés électriques du matériau, et réciproquement. Elle est particulièrement pertinente pour étudier les phénomènes électrothermiques dans les dispositifs électroniques tels que les transistors, les diodes ou les circuits intégrés.

3.3.4 Analogie électrique-thermique

L'analogie électrique-thermique est une approche permettant de modéliser le comportement thermique d'un composant électronique au moyen d'un circuit électrique équivalent. Cette méthode exploite les similitudes entre les lois de l'électricité et celles de la thermique, en assimilant la chaleur à un courant électrique et la température à une tension électrique. En utilisant un circuit électrique équivalent, il est envisageable de simuler le transfert thermique à l'intérieur du composant et d'étudier les variations de température selon les conditions de fonctionnement. Cette approche présente un avantage majeur en termes de simplicité et sa rapidité d'implémentation, ce qui en fait une méthode couramment utilisée en conception électronique. Toutefois, il convient de noter que cette méthode ne considère pas les effets thermomécaniques et ne permet pas une analyse approfondie du comportement mécanique du composant. Le but est de se focaliser sur l'aspect thermique du système. Par ailleurs, il existe une analogie thermoélectrique entre les domaines électrique et thermique, facilitant ainsi la traduction des concepts électriques en termes thermiques et vice versa. Cette analogie permet

de mieux appréhender et analyser les phénomènes électrothermiques couplés. Elle établit des correspondances entre les grandeurs électriques et thermiques tel que montré dans le tableau 3.1, ce qui permet d'approfondir notre compréhension des interactions complexes entre les différents éléments en présence de ces deux domaines.

Tableau 3.1 Analogie thermoélectrique

Électricité / Loi d'Ohm	Thermique / Loi de Fourier
$V_1 - V_2 = R \cdot I$	$T_1 - T_2 = R_{Th} \cdot \phi$
Différence de potentiel	Différence de température
V : Potentiel électrique	T : Température
R : Résistance électrique	R_{Th} : Résistance thermique
σ : Conductivité électrique	λ : Conductivité thermique
I : Intensité électrique	ϕ : Flux de chaleur
\vec{J} : Densité de courant	$\vec{\varphi}$: Densité du flux thermique
$\vec{J} = -\sigma \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(V)$	$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)$

Sur la base de l'analogie électrique-thermique, nous obtenons l'équation de la conduction électrique :

$$c^v \cdot \frac{\partial V}{\partial t} + c^v \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \sigma \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = I \quad (5)$$

c^v : Permittivité diélectrique

$$\begin{cases} \rho \cdot c_p \cdot \dot{T} + \rho \cdot c_p \cdot \nabla T - \lambda \cdot \Delta T = Q^p(t) \\ c^v \cdot \dot{V} + c^v \cdot \nabla V + \sigma \cdot \Delta V = I \end{cases} \quad (6)$$

3.4 Equations fondamentales du couplage thermo-mécanique

3.4.1 Transfert thermique au sein du composant BGA

Le transfert de chaleur au sein du composant BGA (Ball Grid Array) constitue un phénomène complexe, impliquant le couplage entre les aspects thermiques et électroniques. Ce transfert de chaleur s'effectue à travers les interconnexions reliant la puce électronique au PCB (Printed Circuit Board), qui peuvent agir comme des conducteurs thermiques, et est également influencé par les propriétés thermiques des matériaux utilisés. Les BGA, étant des dispositifs

électroniques à haute densité d'emballage, peuvent générer une quantité significative de chaleur lors de leur fonctionnement. Cette chaleur accumulée peut entraîner une hausse de la température à l'intérieur du système, ce qui peut impacter ses performances et sa durée de vie. Par conséquent, le transfert thermique joue un rôle crucial dans la conception des dispositifs électroniques tels que les BGA. L'objectif du couplage multi-physique est de mieux appréhender les phénomènes liés au transfert thermique au sein des BGA et de développer des méthodes permettant d'améliorer l'efficacité de la dissipation thermique, pour optimiser les performances et d'accroître la fiabilité du dispositif sur le long terme. Après avoir présenté le transfert thermique au sein des composants BGA, il est primordial de comprendre les différents modes de transfert thermique qui peuvent se produire dans ces dispositifs. En effet, la dissipation thermique peut être réalisée par conduction, convection et rayonnement. Dans les sections suivantes, nous décrirons en détail chacun de ces modes de transfert thermique, mettant en évidence leur importance dans le contexte de l'analyse thermique des composants électroniques.

3.4.1.1 Transfert par conduction

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit lorsque la chaleur se propage à travers un matériau solide sans que le matériau se déplace. Ce mode de transfert est important dans les composants électroniques tels que les BGA, car les matériaux qui les composent sont généralement des solides, tels que le cuivre et le silicium. La conduction thermique peut être décrite mathématiquement par la loi de Fourier, qui établit une relation entre le flux de chaleur à travers un matériau, la surface de contact et la différence de température entre les deux côtés du matériau. Dans le cadre de l'analyse thermique des BGA, il est important de comprendre la conduction thermique afin de concevoir un système de refroidissement efficace qui peut dissiper la chaleur générée par le composant de manière optimale. L'équation de conduction thermique découle de l'application du premier principe de la thermodynamique à un élément de volume immobile et indéformable. Dans ce contexte, on suppose une transformation thermodynamique à pression constante. Ainsi, la variation de l'énergie interne du système correspond à la somme de l'énergie thermique qui entre dans le volume à travers sa surface limite et de la chaleur émise par les sources internes. On a donc :

$$dU = \delta Q + \delta W \tag{7}$$

Tandis que le composant est indéformable : $\delta W = 0$

$$\rightarrow dU = \delta Q_1 + \delta Q_2 + Q^p \quad (8)$$

$$dU = \iiint_V \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV \cdot dt \quad (9)$$

δQ_1 : Énergie thermique reçue pendant dt

$$\delta Q_1 = - \oiint_S \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \cdot dS \cdot dt \quad (10)$$

δQ_2 : Énergie thermique générée pendant dt

$$\delta Q_2 = \iiint_V q \cdot dV \cdot dt \quad (11)$$

q: Densité des sources internes

Le théorème de Gauß's permet d'écrire δQ_1 comme une intégrale de volume :

$$\oiint_S \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \cdot dS \cdot dt = \iiint_V \text{div}(\vec{\varphi}) dV \quad (12)$$

En substituant l'équation (10) par (12) et en additionnant les équations (11) et (12), l'équation (8) devient :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = - \text{div}(\vec{\varphi}) + Q + Q^p \quad (13)$$

En utilisant la loi de Fourier, nous obtenons l'équation de conduction de la chaleur indépendante du temps :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)) + Q + Q^p \quad (14)$$

Nous obtenons finalement cette expression :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \Delta T + Q + Q^p = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q + Q^p \quad (15)$$

3.4.1.2 Transfert par convection

La convection thermique est un mécanisme de transfert de chaleur qui se produit lorsque la chaleur est transférée à travers un fluide comme l'eau ou l'air. Dans le cas des composants électroniques comme les BGA, la convection contribue de manière significative dans le refroidissement. Il existe deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée. La convection naturelle se produit lorsque les différences de densité créent des

mouvements de fluide spontanés, tandis que la convection forcée est provoquée par l'utilisation d'un flux d'air ou d'eau externe pour augmenter le transfert de chaleur. Dans l'analyse thermique des BGA, la convection peut être un moyen efficace de dissiper la chaleur générée par le composant. Toutefois, il est essentiel de considérer les limitations associées à la convection, en particulier lorsque les composants génèrent une quantité importante de chaleur. La convection est régie par les lois de Newton et implique un échange de chaleur entre la surface solide du composant et le fluide environnant :

$$\vec{\varphi} \cdot \vec{n} = h (T_f - T_s) = q_0 \quad (16)$$

3.4.1.3 Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un autre mode de transfert thermique important. Il est dû à l'émission d'ondes électromagnétiques par les corps chauds. Dans le cas des composants électroniques, le rayonnement thermique est principalement dû à la surface du composant. Cependant, dans notre étude, nous avons choisi de négliger ce mode de transfert thermique, car il est en général, considérablement inférieure aux autres mécanismes de transfert thermique tels que la conduction et la convection, et cela nous permet de simplifier notre analyse.

3.4.2 Modélisation thermomécanique

La modélisation thermomécanique est une approche essentielle pour étudier les interactions entre la chaleur et la mécanique dans divers systèmes, notamment les composants électroniques. Elle est essentielle pour comprendre le comportement des matériaux soumis à des contraintes thermomécaniques, telles que les contraintes thermiques. En utilisant les principes fondamentaux de la thermodynamique et de la mécanique, la modélisation thermomécanique permet de prédire avec précision les déformations et les contraintes thermiques présentes dans les composants électroniques, ainsi que d'évaluer leur durée de vie en fonction des conditions de fonctionnement. Cette approche de modélisation offre de nombreux avantages pour l'optimisation des performances et la fiabilité des composants électroniques. Elle permet de développer de nouveaux matériaux adaptés aux contraintes thermomécaniques spécifiques et de concevoir des composants électroniques de haute performance capables de résister aux variations de température et aux charges thermiques élevées.

Dans le cas spécifique du composant BGA, il est crucial d'utiliser une modélisation thermomécanique pour étudier les effets de l'élévation de température sur son comportement mécanique. Lorsque le BGA fonctionne, la génération interne de chaleur peut entraîner des

phénomènes mécaniques tels que des déformations, des contraintes et des déplacements, qui peuvent potentiellement causer des défaillances du composant. Pour une analyse précise de ces effets, un modèle thermomécanique est développé. Ce modèle permet de mettre en relation les différents paramètres thermiques, tels que la température, et les paramètres mécaniques, tels que les déformations et les contraintes. Le couplage entre le modèle électrothermique et le modèle mécanique est réalisé à l'aide d'équations basées sur la thermoélasticité, permettant de décrire de manière précise les déformations et la densité d'entropie. En somme, la modélisation thermomécanique est une approche indispensable pour comprendre et prédire les contraintes thermomécaniques dans les composants électroniques. Elle contribue à l'optimisation des performances, à la fiabilité et à la durée de vie des dispositifs électroniques, tout en encourageant l'émergence de nouvelles technologies et de matériaux adaptés aux environnements thermiques exigeants. La charge thermique combinée aux différentes propriétés des matériaux des couches assemblées entraîne une accumulation importante de contraintes et de déformations inélastiques dans les joints de soudure. Cela peut entraîner des fissures et des défaillances dans les interconnexions. Grâce aux équations de la thermoélectricité, les déformations et la densité d'entropie peuvent être définies :

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \cdot \{\sigma\} + \{\alpha\} \cdot \Delta T \quad (17)$$

$$\{S\} = \{\alpha\}^T \cdot \{\sigma\} + \frac{\varrho c_p}{T_0} \cdot \Delta T \quad (18)$$

Selon la deuxième loi de la thermodynamique appliquée à une transformation réversible, la densité d'entropie S peut être substituée par la densité de flux de chaleur Q, avec Q :

$$Q = T_0 \cdot S \quad (19)$$

Ce terme est le terme de couplage thermomécanique. On obtient alors :

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} - \{\beta\} \cdot \Delta T \quad (20)$$

$$\{Q\} = T_0 \cdot \{\beta\}^T \cdot \{\varepsilon\} + \varrho c_v \cdot \Delta T \quad (21)$$

Avec :

$\{\beta\}$: Vecteur des coefficients thermoélastiques ($\{\beta\} = [D] \cdot \{\alpha\}$)

c_v : Chaleur spécifique à volume constant ($c_v = c_p - \frac{T_0}{T} \{\alpha\}^T \{\beta\}$)

En substituant l'expression de Q dans l'équation du flux de chaleur (15), nous obtenons :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = T_0 \cdot \{\beta\}^T \cdot \frac{\delta \{\varepsilon\}}{\delta t} + \varrho c_v \cdot \frac{\delta \{\Delta T\}}{\delta t} - \lambda \nabla^2 T \quad (22)$$

3.5 Modélisation du couplage électro-thermomécanique

La modélisation du couplage électro-thermomécanique permet d'étudier les interactions complexes entre les phénomènes électriques, thermiques et mécaniques dans un composant électronique. Elle s'appuie sur les modèles électrothermiques et thermomécaniques présentés précédemment pour décrire les phénomènes de chauffage, de dilatation et de contrainte au sein du composant. Le modèle électrothermique décrit la distribution de la température dans le composant en fonction de la puissance dissipée par les charges électriques. Le modèle thermomécanique quant à lui permet de calculer les déformations et les contraintes induites par les variations de température. Le couplage des deux modèles peut être réalisé à travers des équations de couplage électro-thermomécanique qui relient les variations de température, de déformation et de contrainte aux paramètres électriques du composant. Cette modélisation peut être utilisée pour prédire les dégradations mécaniques causées par le phénomène d'auto-échauffement dans le composant électronique, et pour optimiser sa conception et sa durée de vie. L'objectif de la modélisation électro-thermomécanique est de déterminer le champ de tension électrique, le champ de température et enfin le déplacement, les contraintes et les déformations. En prenant en considération les équations précédentes, nous obtenons l'équation matricielle suivante du couplage électro-thermomécanique :

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\{\ddot{T}\}\} \\ \{\{\ddot{V}\}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] & [0] \\ [C^{tu}] & [C^t] & [0] \\ [0] & [0] & [C^\theta] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \\ \{\dot{V}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{tu}] & [0] \\ [0] & [K^t] & [0] \\ [0] & [K^{\theta t}] & [K^\theta] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Les phénomènes physiques de l'électro-thermomécanique sont décrits mathématiquement par des équations aux dérivées partielles (EDP). L'absence de solution analytique à ces EDP a favorisé l'émergence de méthodes d'approximation telles que la méthode des éléments finis (FEM). La FEM consiste à découper le domaine continu en un certain nombre d'éléments géométriques simples appelés mailles. La procédure de discrétisation permet de remplacer le milieu continu par un milieu discret. La FEM propose d'abord la solution de l'EDP en s'appuyant sur la discrétisation de la formulation variationnelle. Cette discrétisation permet de remplacer la formulation variationnelle de l'EDP par une formulation matricielle. La solution de l'EDP est abordée par la détermination des solutions nodales du domaine discrétisé. Ainsi, le champ recherché est approximé et reconstitué par une interpolation aux nœuds en fonction de toutes les mailles de la zone en question. Un avantage supplémentaire de l'emploi de l'approche

des éléments finis (FEM) réside dans sa capacité à permettre le couplage entre différents phénomènes physiques et les comportements des matériaux. Cela signifie que, il est faisable de générer le comportement électrique, thermique et mécanique de la structure étudiée. Comme décrit dans les sections précédentes, il existe deux types de couplage des phénomènes physiques : le couplage fort et le couplage faible. Le premier utilise un FE avec tous les degrés de liberté nécessaires à une étude électro-thermomécanique. Le second consiste à découpler les trois phénomènes physiques où pour chaque phénomène physique un FE spécifique est utilisé. Le couplage entre les différents phénomènes se fait de manière itérative.

Dans ce chapitre, un couplage électro-thermomécanique fort est fourni par ANSYS Workbench qui réunit les modules électriques, thermiques stationnaires et enfin le module de structure statique. Cette simulation est basée sur les matrices mentionnées précédemment.

3.6 Approximation par la méthode des éléments finis

3.6.1 Méthode des éléments finis (EF)

Pour résoudre les équations complexes associées à la modélisation du couplage électro-thermomécanique, la méthode des éléments finis est une technique numérique avancée. Elle implique de diviser le domaine pour simplifier les calculs en plusieurs éléments finis, tels que des triangles ou des rectangles. Chaque élément fini est caractérisé par des variables électriques, thermiques et mécaniques qui sont approximées à partir des valeurs aux nœuds du maillage. En discrétisant les équations de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, on obtient un système d'équations qui peut être résolu pour chaque élément fini. La méthode des éléments finis permet ainsi de modéliser des structures complexes avec des propriétés matérielles variées et des conditions aux limites spécifiques. Elle offre une grande précision et une flexibilité dans le choix du maillage et des types d'éléments. De plus, elle permet d'acquérir des renseignements locaux précis sur les champs électriques, thermiques et mécaniques, ce qui est essentiel pour analyser les contraintes et les déformations dans le composant BGA. Cependant, il convient de noter que la méthode des éléments finis peut nécessiter des ressources de calcul importantes, notamment pour les modèles tridimensionnels avec des maillages très fins, ce qui peut entraîner des temps de calcul plus longs.

3.6.2 Le logiciel ANSYS

Le logiciel ANSYS est un programme de simulation numérique servant à modéliser des systèmes complexes en combinant plusieurs phénomènes physiques. Il intègre différents modules pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques, thermiques, mécaniques et fluidiques. Les modules multiphysics d'ANSYS permet de coupler ces différents phénomènes pour modéliser des systèmes interactifs, tels que les composants électroniques. En utilisant ANSYS, on peut modéliser le comportement électro-thermomécanique des composants électroniques tels que les BGA. Ce logiciel permet de modéliser le comportement électrique, thermique et mécanique du composant et d'étudier leur influence mutuelle. Pour cela, il est possible de réaliser une simulation numérique en appliquant les conditions de charge thermique et électrique réelles sur le composant. ANSYS propose un module de maillage automatique qui facilite la création d'un maillage adapté à la géométrie du composant à modéliser, tout en garantissant sa qualité. De plus, il offre la possibilité de définir des matériaux personnalisés pour chaque composant, afin de prendre en compte leurs propriétés électriques, thermiques et mécaniques spécifiques. Les résultats de la simulation sont présentés de manière visuelle à travers des cartes de températures, de contraintes et de déformations, permettant ainsi d'analyser en détail le comportement du composant étudié. L'utilisation de logiciels de simulation numérique tels qu'ANSYS offre de multiples bénéfices au niveau de la réduction du temps et des charges requises pour étudier le comportement électro-thermomécanique des composants électroniques. Grâce à ces outils, il est envisageable d'atteindre des résultats de façon accélérée et d'éviter les coûts liés aux essais expérimentaux. De plus, la simulation numérique permet d'explorer différentes configurations et de tester virtuellement des scénarios, ce qui contribue à une compréhension plus avancée du comportement du composant et à l'optimisation de sa conception. Cette approche permet également de tester différentes configurations et conditions de fonctionnement sans avoir à réaliser des expérimentations coûteuses et chronophages. Pour mener une simulation numérique sur ANSYS, on doit passer par les étapes présentées et détaillées dans la figure 3.1 ci-dessous. Il convient de souligner qu'ANSYS est une suite de logiciels, qui se décompose en plusieurs outils. Parmi les plus utilisés, on peut citer ANSYS Workbench et ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language).

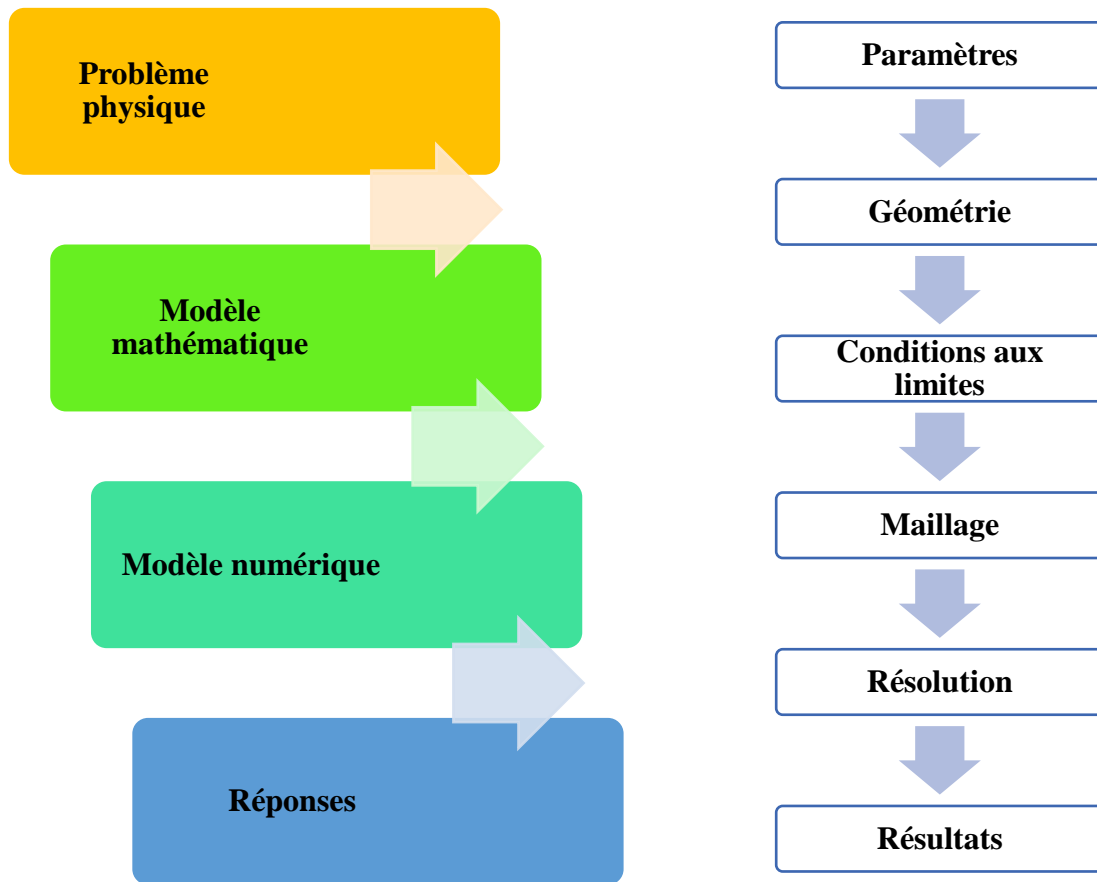


Figure 3.1 démarche d'une simulation numérique

3.6.2.1 ANSYS Workbench

Le logiciel ANSYS Workbench est une plateforme de simulation multiphysique autorisant l'analyse, la modélisation et la simulation et de problèmes complexes en utilisant des techniques de calcul numérique. Workbench propose une interface graphique utilisateur (GUI) conviviale qui permet de créer rapidement des modèles, d'appliquer des conditions aux limites et des matériaux, de définir les paramètres de simulation, de lancer des simulations et d'analyser les résultats. La plateforme est dotée d'une capacité polyvalente qui permet de réaliser divers types d'analyses. Parmi ces analyses figurent l'analyse acoustique, l'analyse structurelle, l'analyse thermique, l'analyse de fluides, l'analyse électromagnétique, et bien d'autres encore. Cette gamme étendue de fonctionnalités offre la possibilité d'explorer et d'étudier de nombreux aspects physiques et comportementaux des systèmes. Grâce à cette diversité d'analyses, il est envisageable d'acquérir une vision approfondie et intégrale du comportement des composants et des systèmes, ce qui simplifie le choix final et l'optimisation de leur performance. Workbench offre également une grande flexibilité grâce à sa capacité à importer et exporter des fichiers

CAO de différents formats et à interagir avec d'autres logiciels de simulation ANSYS. De plus, il est possible de réaliser des analyses couplées permettant de prendre en compte les interactions entre différents phénomènes physiques, tels que les transferts de chaleur et les déformations mécaniques, ce qui peut être très utile pour l'analyse de composants électroniques tels que les BGA.

3.6.2.2 ANSYS APDL

ANSYS APDL (Ansys Parametric Design Language) est un puissant logiciel de simulation numérique conçu pour réaliser des analyses avancées en utilisant des langages de programmation. Contrairement à ANSYS Workbench, APDL est spécialement conçu pour les utilisateurs expérimentés et chevronnés. Ce logiciel offre une flexibilité maximale en termes de modélisation, d'analyse et d'optimisation des systèmes complexes, en permettant la création de modèles personnalisés et l'utilisation de méthodes d'analyse spécifiques. Grâce à APDL, les utilisateurs ont accès à l'ensemble des fonctionnalités d'ANSYS, ainsi qu'à la possibilité de créer des commandes personnalisées et d'automatiser des tâches. APDL est couramment employé dans des secteurs comme la mécanique, l'automobile, l'aérospatiale et l'énergie pour réaliser des analyses de fatigue, de vibrations, de thermique, de structures et d'optimisation de conception. C'est un outil essentiel pour les ingénieurs et les chercheurs qui nécessitent un contrôle avancé et une personnalisation approfondie de leurs analyses.

3.7 Chargements appliqués

Il est essentiel de souligner l'importance de l'effet du cyclage thermique sur l'amélioration des alliages de soudure. Les performances des alliages de soudure sans plomb utilisés dans les appareils électroniques continuent de s'améliorer au fur et à mesure que ces appareils sont soumis à des environnements de cycles thermiques accélérés (ATC). L'application de six cycles de température est suffisante pour obtenir des résultats stables, ce qui permet de tirer des conclusions plus fiables sur la réponse des joints de soudure aux charges induites [9].

L'application d'une intensité électrique et d'une charge thermique cyclique dans les boîtiers électroniques est connue pour être un défi fondamental pour la fiabilité de l'électronique. La fiabilité est associée à l'apparition et à la propagation de fissures qui, si elles ne sont pas contrôlées, entraînent la défaillance des systèmes. C'est pourquoi une étude numérique électro-thermomécanique est menée pour contribuer à la maîtrise de ce type de défaillance. Les contraintes thermiques globales générées peuvent donc être divisées en deux catégories

principales : Le stress thermique passif (application de l'intensité électrique) et le cyclage thermique actif (ATC). L'ATC est provoqué par les variations thermiques de l'environnement dans lequel le module électronique est utilisé. Parallèlement, le stress thermique passif est généré par la dissipation de chaleur à l'intérieur des puces lors du passage du courant électrique. En 1992, l'IPC (Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits), une association américaine, a publié un guide qui a ensuite été mis à jour en 2006. Ce guide propose une classification des équipements électroniques en fonction de leurs profils de mission, en se basant exclusivement sur les contraintes thermiques. Dans le Tableau 3.2, un extrait de ces profils de mission est présenté. Les paramètres pertinents utilisés dans cette classification incluent les températures extrêmes, l'amplitude moyenne de température, la durée d'un cycle et le nombre de cycles par an. Cette classification permet d'évaluer et de caractériser les différents scénarios thermiques auxquels les équipements électroniques peuvent être soumis.

Tableau 3.2 Profils de températures selon les domaines

	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	ΔT (°C)	t_D (h)	Cycles / an	Temps de service typique (an)	Risque de défaillance acceptable (%)
Consommables	0	60	35	12	365	1 – 3	1
Ordinateurs	0	60	20	2	1460	5	0,1
Telecommunications	-40	85	35	12	365	7 – 20	0,01
Avionique civile	-55	95	20	12	365	20	0,001
Industrie et automobile (dans l'habitacle)	-55	95	20	12	185	10 – 15	0,1
			40	12	100		
			50	12	60		
Militaire (terrestre et naval)	-55	95	80	12	20	10 – 20	0,1
			40	12	100		
Espace	-55	95	50	12	265	5 – 30	0,001
			de 3 à 100	1	8760		
Avionique militaire	-55	125	12	365	100	0,01	
			profil a	40			2
			ou profil b	60			2
			ou profil c	80			2
et maintenance	20	1	120	1000	0,1		
Automobile (compartiment moteur)	-55	125	60			1	
			100			1	300
			140	2	40		

La puce de silicium génère de la chaleur pendant son fonctionnement. Ce composant devient la source de chaleur. Lorsqu'une intensité électrique est appliquée, la dissipation de chaleur due à l'effet Joule dans les puces actives peut engendrer des fluctuations thermiques supplémentaires. Les cycles de température produisent des contraintes thermiques dans les

joints de soudure, qui aboutissent à une rupture par fatigue. La fatigue est dominante pendant les cycles entre les extrêmes, tandis que le fluage est le mécanisme dominant pendant la période de repos et à des températures élevées. L'essai de cyclage thermique simule la rupture par fatigue thermomécanique des joints de soudure. Pendant le service sur le terrain, les joints de soudure sont soumis à des contraintes thermiques et mécaniques résultant d'une inadéquation entre les coefficients de dilatation thermique (CTE) de l'emballage, de la soudure et de la carte. Une hausse de la plage de température stimule la dilatation et la contraction des joints de soudure et ces changements de température induisent des contraintes sur les joints [24]. Les modules de puissance subissent à la fois des charges thermiques actives et passives pendant leur fonctionnement réel, puisque ces deux types de charges coexistent simultanément. Il est donc préférable de prendre en compte ces deux types de charges dans une même simulation afin de reproduire fidèlement le fonctionnement réel du module et d'obtenir une vision globale des effets thermiques. L'intervalle de température va de -40°C à 125°C , comme le montre la figure 3.2 et comme le précise la norme JEDEC (JESD22-A104D condition G) [25], [26]. Cette norme est utilisée dans les domaines du militaire, de l'automobile, de l'aéronautique et de la défense et. Cette charge thermique cyclique partant d'une température initiale, qui est influencé par la nature de l'alliage utilisé, est décrite dans le tableau 4.6 plus loin dans le texte.

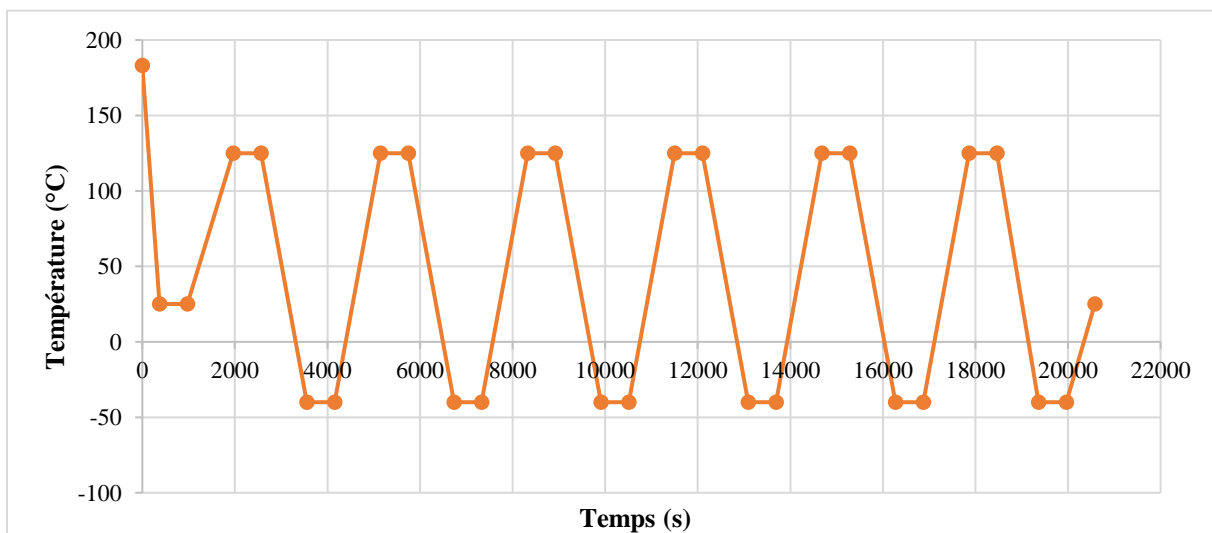


Figure 3.2 Température cyclique appliquée

Dans une structure multi-matériaux soumise à des cycles thermiques sévères, les joints de soudure influencent la résistance mécanique de l'assemblage. En raison des différences entre les coefficients de dilatation thermique (CTE) entre les matériaux, des contraintes thermiques significatives se produisent, impactant les composants et, en particulier, les joints de soudure. Ces contraintes répétées peuvent entraîner divers modes de défaillance à long terme. Dans le

cadre de cette recherche, notre objectif est d'analyser la dégradation des joints de soudure d'interconnexion, car elle influe directement sur la fiabilité globale du module de puissance. Les joints de soudure sont de petites dimensions dans les assemblages électroniques, souvent de l'ordre du millimètre en épaisseur. Leur comportement et leurs mécanismes de défaillance sont donc fortement influencés par cette échelle réduite du matériau et les caractéristiques de sa microstructure. À cette fin, la section suivante est tenue.

3.8 Résultats de la simulation numérique électro-thermomécanique du composant BGA

Après avoir défini les différents modèles de couplage électro-thermomécanique et choisi le logiciel de simulation numérique approprié ainsi que les chargements appliqués, il est temps d'analyser les sorties de la simulation multiphysique. Les résultats obtenus de la simulation numérique électro-thermomécanique du composant BGA sont très importants pour comprendre son comportement thermomécanique et prévoir les éventuelles défaillances qui peuvent survenir lors de son fonctionnement. Les résultats de la simulation permettent de visualiser la distribution de la température, des contraintes et des déformations à l'intérieur du composant BGA sous différentes conditions de fonctionnement. Ces résultats peuvent aider les ingénieurs à optimiser la conception du composant BGA et à améliorer sa fiabilité en réduisant les contraintes et les déformations qui pourraient provoquer des défaillances.

3.8.1 Calcul des déplacements

Après l'application d'une charge électrothermique, les résultats obtenus sont présentés de manière détaillée dans les figures ci-dessous. Les simulations numériques ont démontré de manière significative que le déplacement du composant BGA le long de l'axe Z était nettement plus important et variable que ceux observés le long des axes X et Y, où il était relativement constant. Plus précisément, les résultats indiquent que le déplacement le long de l'axe X est estimé à environ $0,9 \times 10^{-6}$ m, tandis que le déplacement le long de l'axe Y est d'environ $1,1 \times 10^{-6}$ mètres. En revanche, le déplacement selon l'axe Z varie considérablement, passant de $1,3 \times 10^{-6}$ m à $2,9 \times 10^{-6}$ m. Il convient de souligner que ces observations, basées sur la simulation numérique, mettent en évidence la sensibilité et l'importance du déplacement du composant BGA dans différentes directions.

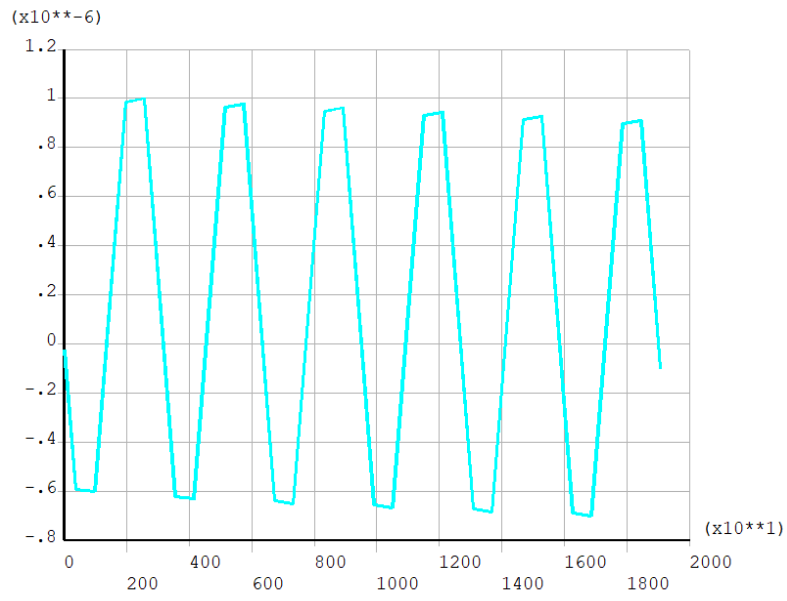


Figure 3.3 Courbe du déplacement selon axe X

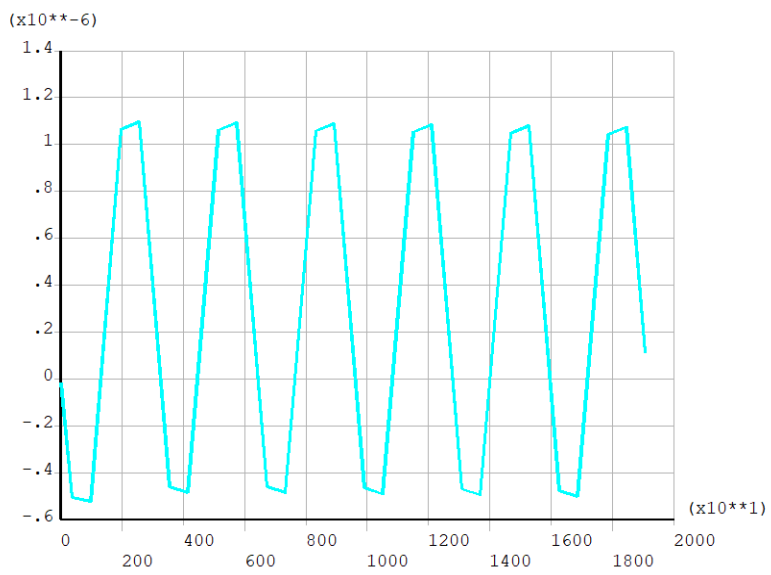


Figure 3.4 Courbe du déplacement selon axe Y

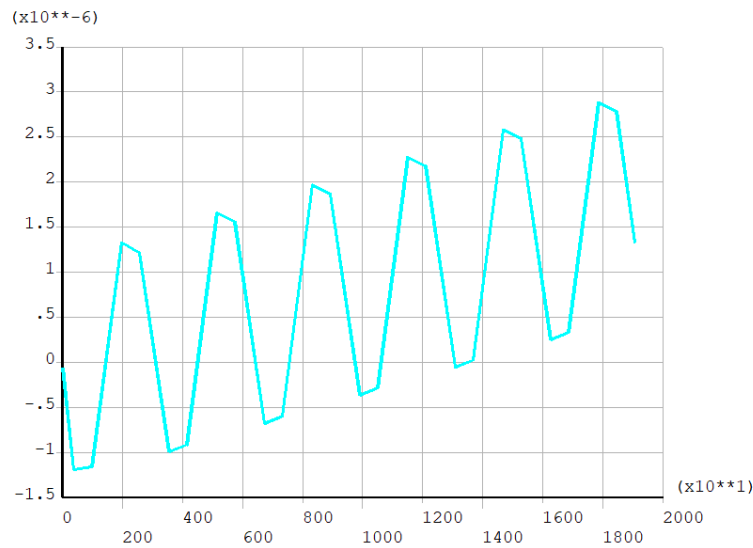


Figure 3.5 Courbes des déplacements selon axe Z

Cette différence de comportement suggère que le composant a tendance à se détacher du PCB sous l'effet des charges électro-thermomécaniques accumulées au fil du temps. En effet, cette évolution du déplacement peut conduire à l'initiation d'une fissure qui se propage progressivement, provoquant finalement la défaillance du composant.

Cette constatation est particulièrement significative puisqu'elle met en avant la nécessité de considérer les effets électro-thermomécaniques lors de la conception et de la fabrication des composants BGA. Des améliorations pourraient inclure des stratégies pour réduire l'accumulation des charges électro-thermomécaniques, des matériaux de meilleure qualité ou une géométrie plus adaptée pour améliorer la résistance mécanique du composant. Lors de la conception et de l'utilisation de composants BGA, il est important de comprendre comment les variations électriques et thermiques peuvent affecter leur comportement mécanique.

La densité de courant et le flux thermique sont deux paramètres critiques susceptibles de provoquer un effet considérable au niveau de la réponse mécanique des composants BGA. La densité de courant peut causer des effets thermiques qui peuvent altérer la structure et les propriétés mécaniques des matériaux constituant les composants BGA. Ces effets thermiques peuvent également entraîner une répartition non uniforme des contraintes à travers le composant, ce qui peut causer des déformations et des dommages permanents. De même, le flux thermique est un paramètre important qui peut causer des déformations, des tensions et des fissures dans les matériaux constituant les composants BGA. Les variations de température dues au flux thermique peuvent également causer des différences de dilatation thermique entre les

différents matériaux constituant les composants, ce qui peut engendrer des contraintes importantes.

3.8.2 Effet de charge électrothermique sur le déplacement

Il est essentiel d'étudier et de comprendre l'impact de la densité de courant et du flux thermique sur la réponse mécanique des composants BGA. Cela peut aider à optimiser leur conception pour une utilisation efficace et fiable dans des environnements variés et exigeants. Cette section présente une analyse plus détaillée de ces effets sur leur comportement mécanique. Après avoir effectué une simulation électro-thermomécanique du composant BGA, Nous avons entrepris une étude visant à examiner l'impact de la charge électrothermique sur son comportement mécanique. Nous avons donc examiné l'impact de la densité de courant sur le déplacement selon l'axe Z, qui avait été identifié comme étant le plus important dans la section précédente, ainsi que l'influence du flux thermique sur ce même déplacement.

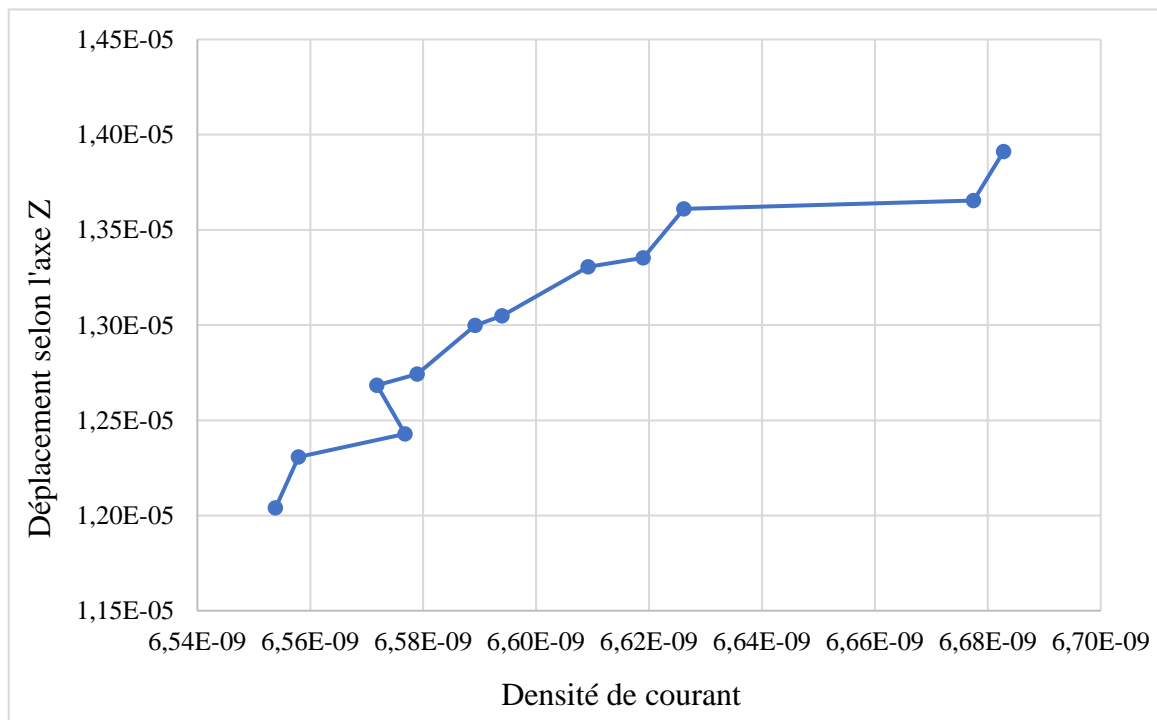


Figure 3.6 Influence de la densité de courant

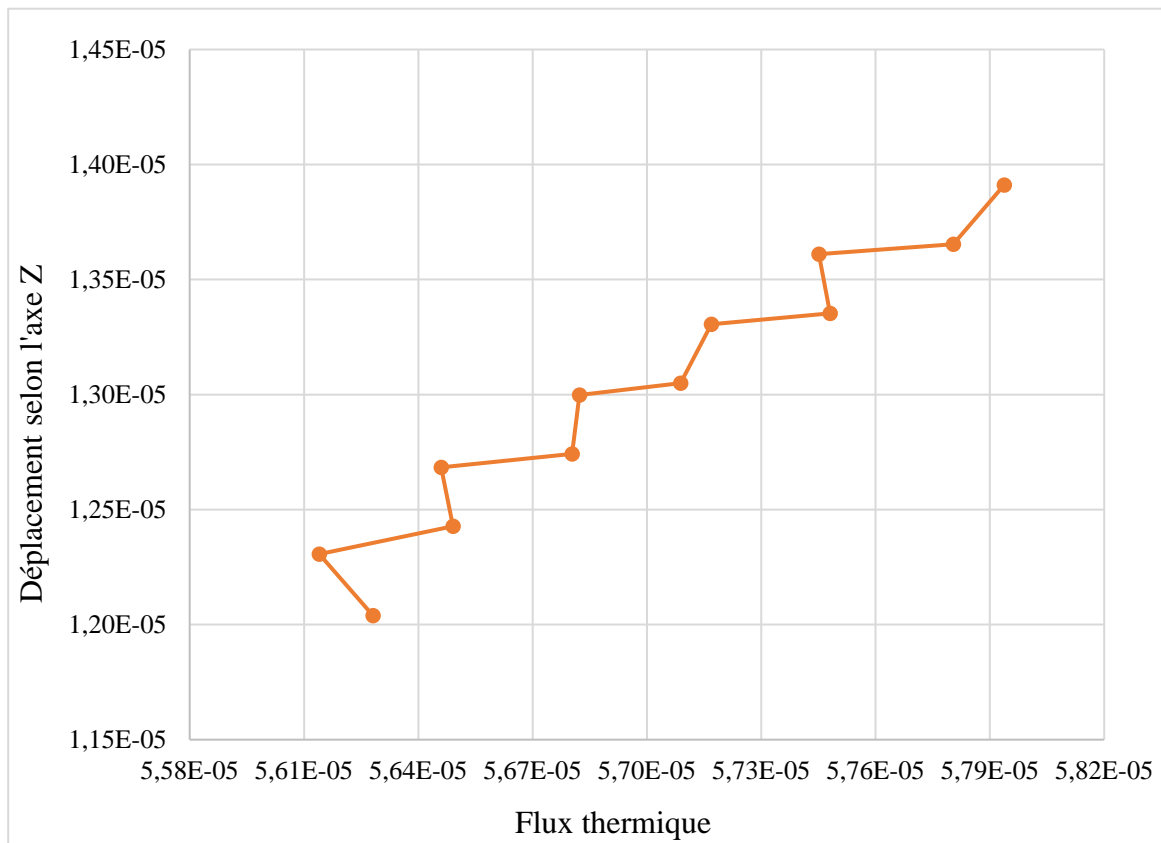


Figure 3.7 Influence de flux thermique

Les résultats de l'étude ont révélé que plus la densité de courant et le flux thermique augmentaient, plus le déplacement selon l'axe Z augmentait également. Cela démontre que la charge électro-thermomécanique a un effet significatif sur l'initiation du détachement des joints de brasure, que ce soit au niveau de la puce (bords supérieurs) ou du PCB (bords inférieurs). Cependant, lors de l'analyse de l'influence de la charge électro-thermomécanique sur le comportement mécanique du composant BGA, les résultats ont montré que cette charge n'a pas d'effet très considérable digne d'être présenté de la contrainte et la déformation élastique du composant BGA, qui restent presque constantes dans ces conditions. C'est dans ce contexte qu'on centralisé notre focus sur la déformation plastique comme sera présenté dans la sous-section suivante.

3.8.3 Effet de charge électrothermique sur la déformation plastique

La déformation plastique est un phénomène mécanique qui se produit lorsque la contrainte exercée sur un matériau dépasse sa limite d'élasticité. Elle se caractérise par une déformation permanente et irréversible du matériau. Ce phénomène est particulièrement important dans les

composants électroniques, tels que les composants BGA, car il peut causer des dommages structurels qui peuvent entraîner la défaillance du composant. En conséquence, il convient de mieux cerner les facteurs qui ont une influence sur la déformation plastique des composants électroniques, afin de pouvoir concevoir des composants plus fiables et plus robustes. Dans ce contexte, les études électro-thermomécaniques sont devenues essentielles pour évaluer l'impact des charges électriques et thermiques sur le comportement mécanique des composants. Ainsi, dans le cadre de notre recherche, nous nous sommes intéressés à évaluer l'effet de la charge électrothermique sur le comportement mécanique du composant BGA en étudiant l'influence de la densité de courant et du flux thermique sur la déformation plastique du composant.

Les résultats de l'étude ont clairement démontré que l'augmentation de la densité de courant et du flux thermique entraînait une augmentation de la déformation plastique du composant BGA. Plus précisément, lorsqu'il y a une augmentation de la densité de courant, la déformation plastique augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur de $7,2 \times 10^{-2}$. De manière similaire, l'influence du flux thermique conduit également à une augmentation de la déformation plastique, atteignant une valeur de $7,3 \times 10^{-2}$. Ces résultats mettent en évidence la corrélation directe entre la densité de courant, le flux thermique et la déformation plastique du composant BGA.

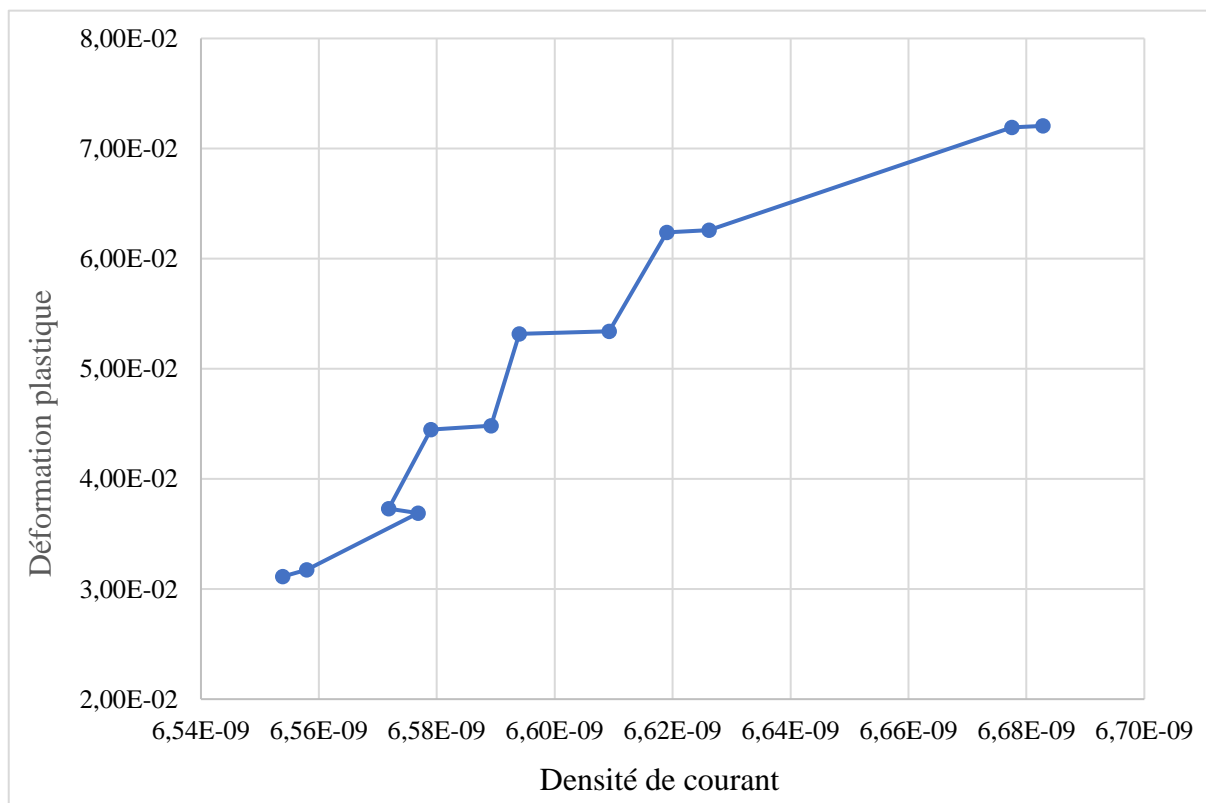


Figure 3.8 Influence de la densité de courant

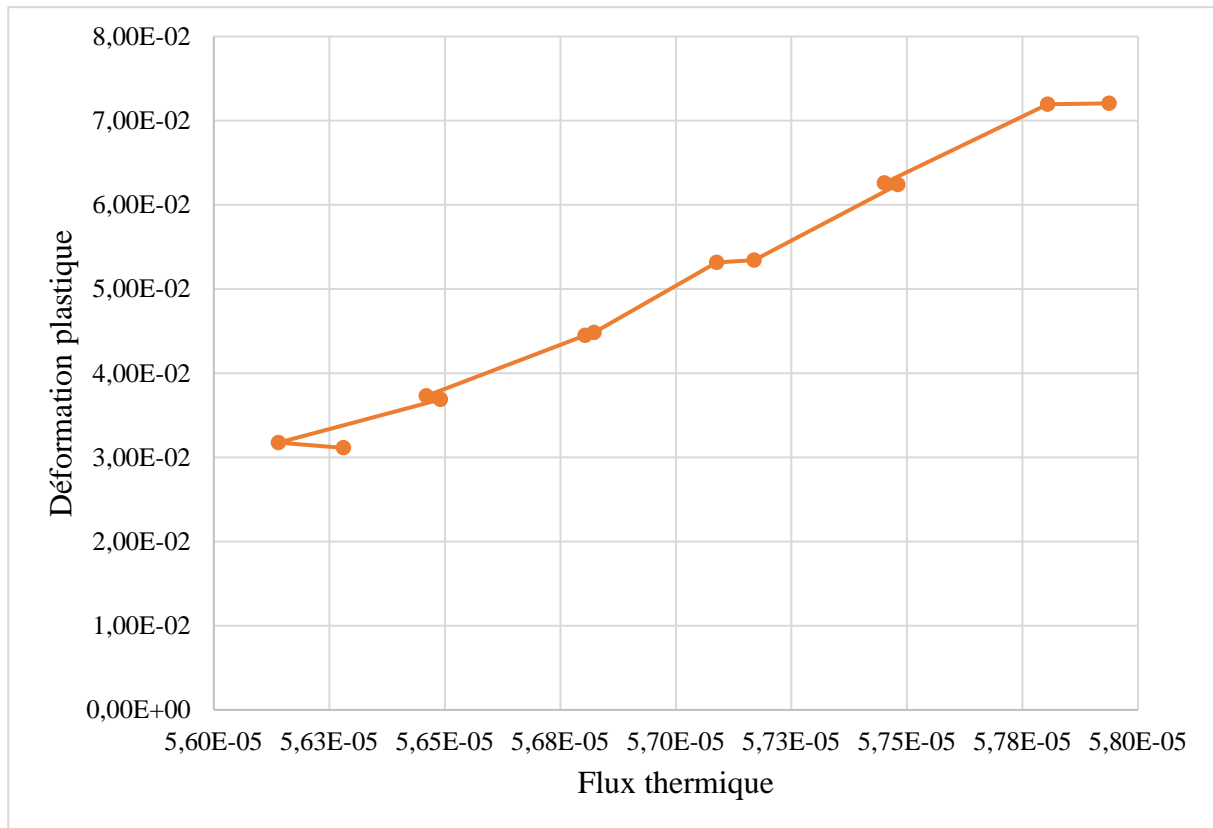


Figure 3.9 Influence de la densité du flux thermique

Cette constatation suggère que la charge électro-thermomécanique a un effet significatif sur l'initiation de la fissuration et la défaillance du composant.

Ces résultats soulignent donc la nécessité de considérer l'effet de la charge électro-thermomécanique dans la conception et l'utilisation des composants BGA. Une compréhension approfondie de ces effets peut aider à concevoir des composants plus fiables et plus robustes dans des environnements variés et exigeants. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel d'identifier précisément les zones de concentration de contraintes générées par ces charges, ce qui constituera l'objet d'étude du paragraphe suivant.

3.9 Détermination des zones de concentration de contraintes

L'étape cruciale de détermination des zones de concentration de contraintes requiert le recours à des méthodes numériques avancées, comme la modélisation par éléments finis, afin d'analyser les contraintes et les déformations au niveau local. Notre méthodologie de détermination des zones de concentration de contraintes consiste à créer des modèles numériques tridimensionnels réalistes du composant BGA, en tenant compte des alliages de brasure utilisés. À l'aide de

simulations numériques sous différentes conditions de charges thermomécaniques, nous évaluons les contraintes et les déformations dans les zones de brasure. En utilisant des outils de visualisation de données et d'analyse, nous identifions les zones présentant les plus fortes concentrations de contraintes et évaluons leur impact sur les performances des alliages de brasure. Notre approche méthodologique est rigoureuse et repose sur des principes scientifiques solides afin d'obtenir des résultats fiables et pertinents.

Dans ce qui suit, une illustration de la localisation des valeurs minimales et maximales de distribution de la déformation plastique observées dans les billes de soudure est présentée dans la figure 3.11. Dans cette section, nous étudierons le comportement de ces billes de soudure ainsi que le comportement de la bille la plus macroscopiquement déformée située au centre.

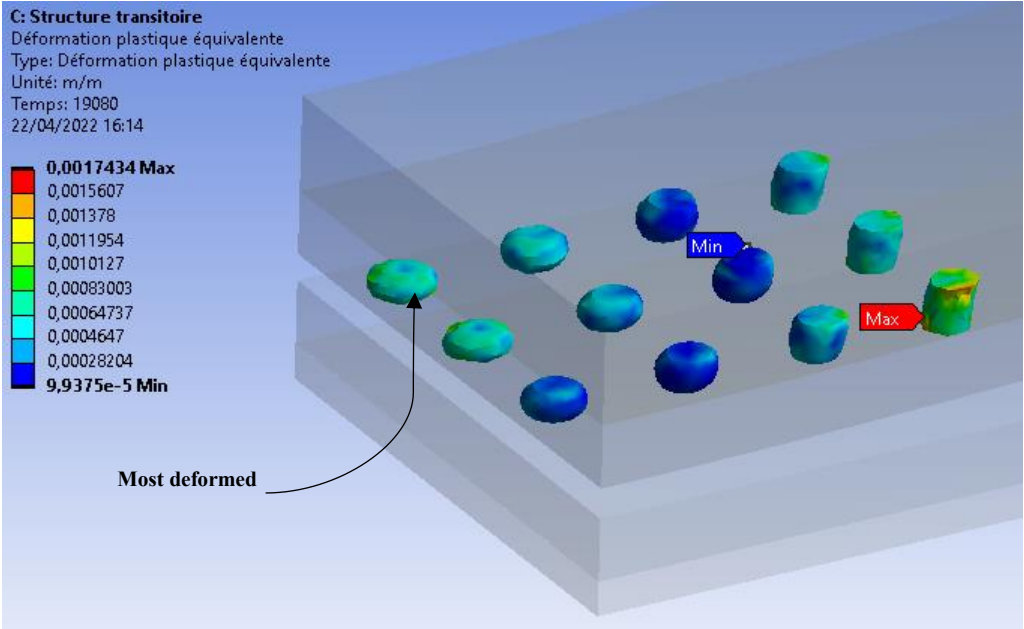


Figure 3.10 Billes de soudure critiques

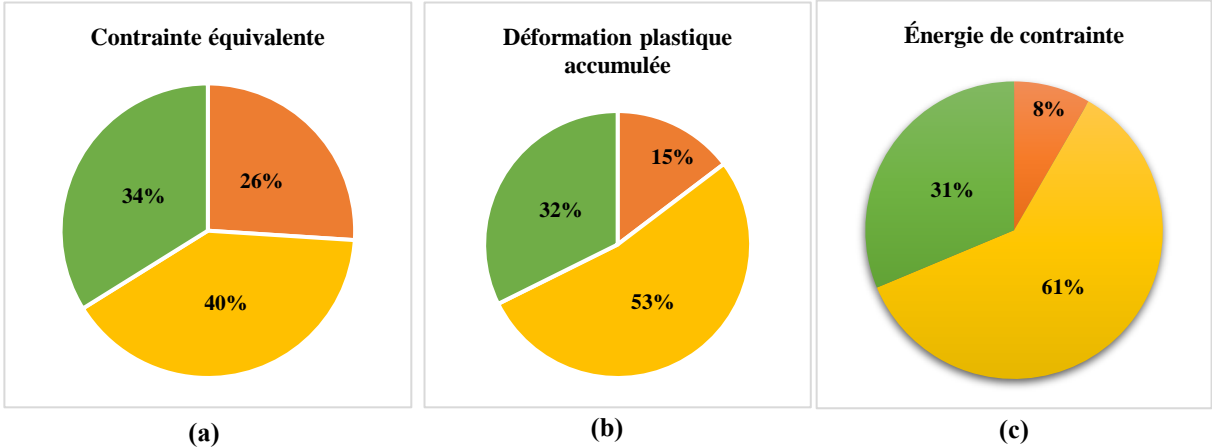


Figure 3.11 Comportement mécanique des billes de soudure choisies

En orange : la bille la moins critique ; *En jaune* : la bille la plus critique ; *En vert* : la bille la plus déformée.

Au vu des résultats observés dans la figure 3.12, il est clair que la boule située à l'extrême périphérie est la boule de soudage la plus critique et qu'elle est à l'origine de la contrainte (40%), de la déformation plastique accumulée (53%) et de l'énergie de déformation (61%) les plus élevées, suivie par la boule située au centre qui présente la déformation la plus élevée, pour aboutir, ce qui est prouvé numériquement, à la boule la moins critique ou, en d'autres termes, à la boule la plus sûre. Cette enquête a été entreprise dans le but de cerner la bille responsable du premier déclenchement de la rupture afin que dans les études de prédiction comme l'étude de la fatigue, on considère cette bille afin de simplifier le calcul et de minimiser le temps de résolution du problème étant donné sa forte non-linéarité.

Suite à une étude de la déformation plastique accumulée et du travail plastique effectué sur les trois régions principales de la bille du composant BGA, il a été identifié que la partie la plus critique se situe dans la partie supérieure du joint comme montré dans la figure 3.13.

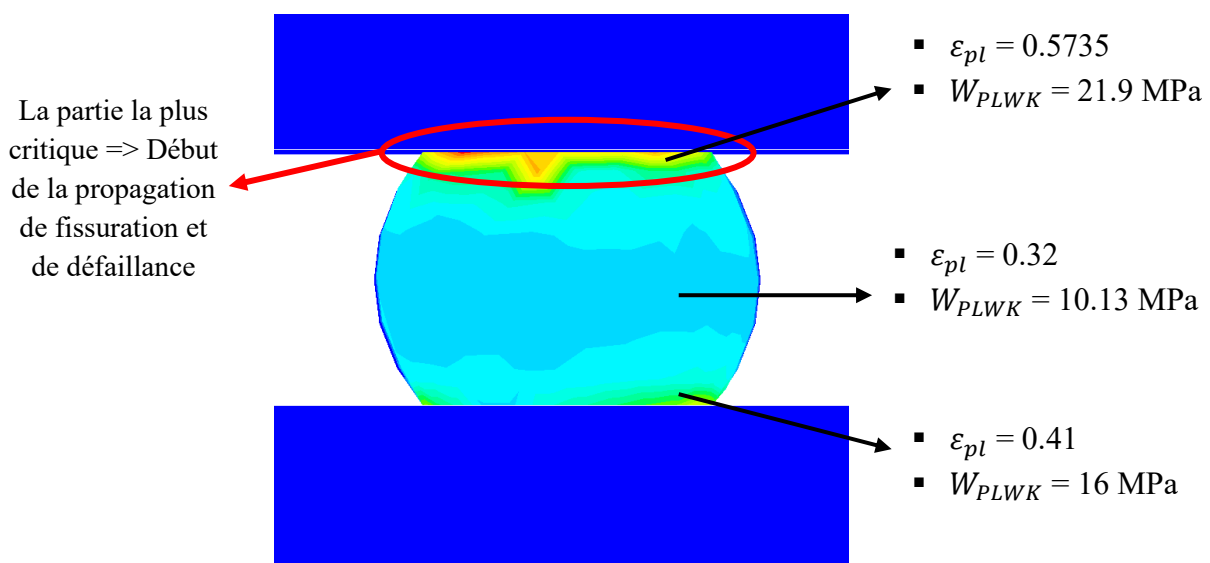


Figure 3.12 Zone critique dans le joint de brasure

Cette conclusion a été tirée après la comparaison des valeurs de ces paramètres pour chaque région. La partie supérieure a présenté la valeur la plus élevée de déformation plastique accumulée et de travail plastique, ce qui suggère que l'initiation de la fissuration et de la défaillance des joints de brasure se localise principalement dans cette zone. Cette information est cruciale pour comprendre les facteurs qui contribuent à la défaillance des composants BGA et pour élaborer des stratégies d'accroissement de la fiabilité de ces composants.

La figure 3.14 montre une distribution complète des dommages dans les bosses de soudure de l'assemblage BGA soudé sur le circuit imprimé. Notamment, les dommages se concentrent principalement sur la bride supérieure des joints de soudure d'angle. Ces zones de soudure spécifiques doivent être renforcées afin d'améliorer la fiabilité globale des joints de soudure. L'analyse de l'image du joint de soudure du BGA présentée dans la figure 3.15 montre clairement qu'une fissure est observée dans la partie supérieure droite du volume du joint de soudure, précisément à l'interface de la pastille de soudure près du côté de l'emballage. Joshua et al. [9] confirment ces observations en mettant en évidence l'apparition de fissures et de ruptures autour des brides des billes de soudure, en haut et en bas des bosses de soudure. Ces zones exigent une évaluation méticuleuse de la fiabilité. La figure montre des concentrations de contraintes critiques sur les bords de la bosse de soudure, ce qui en fait une zone sensible à l'apparition de fissures.

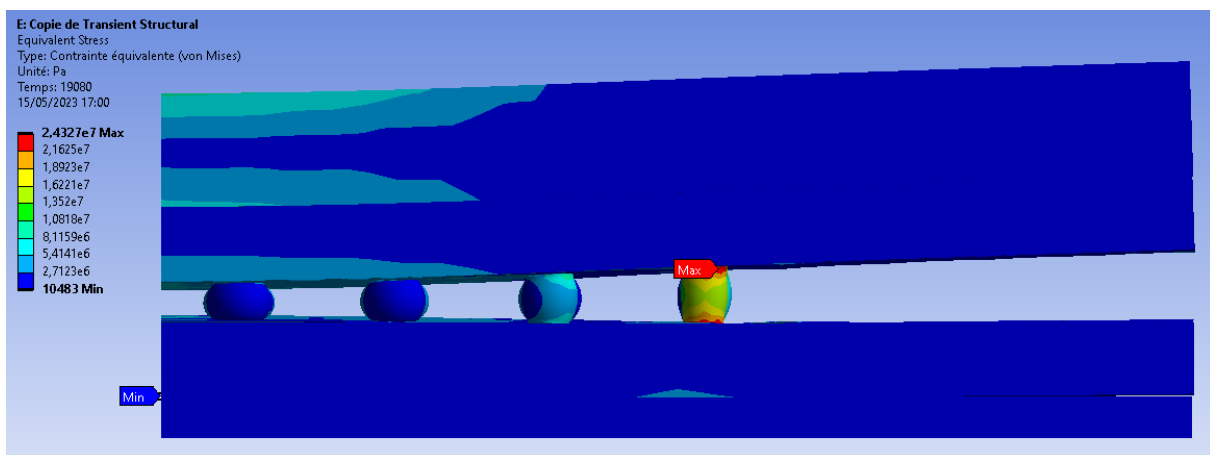


Figure 3.13 Distribution des défaillances des coins de l'alliage InnoLot

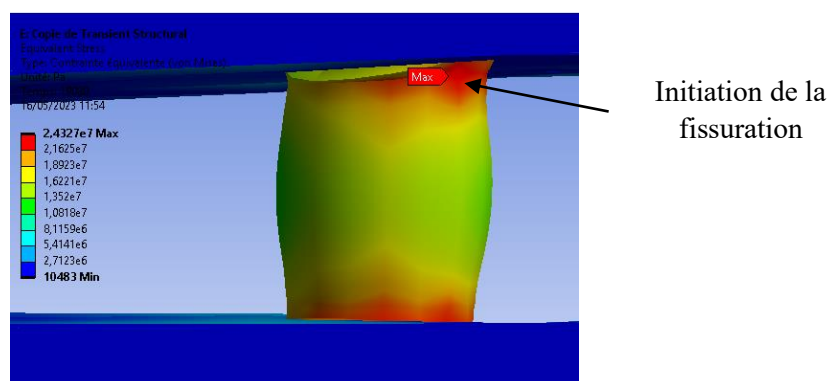


Figure 3.14 Localisation de l'initiation de la fissuration

Dans les simulations numériques, la propagation des fissures ne peut pas être suivie avec précision. En revanche, les simulations donnent un aperçu de l'initiation des fissures en termes

de temps et de distribution spatiale, comme le montre la figure 3.15. Pour suivre avec précision la propagation réelle, il est essentiel de valider les simulations en les comparant aux observations expérimentales. L'observation est en corrélation avec les résultats obtenus par Libot et al. [27], qui ont étudié la densité d'énergie de déformation expérimentale dissipée dans les joints de soudure SAC305 au cours de différentes conditions de cyclage thermique en utilisant des mesures par jauges de contrainte. Cela montre que la contrainte/déformation se produit en haut et en bas des résultats, comme le montre la simulation de Libot et al. [27]. De même, les résultats obtenus par Pierce et al. [28] montrent des résultats similaires avec des régions de déformation élevées dans la boule de soudure critique déterminée par FEA et l'observation de la fissure de fatigue thermomécanique localisée dans la masse de soudure du côté du composant.

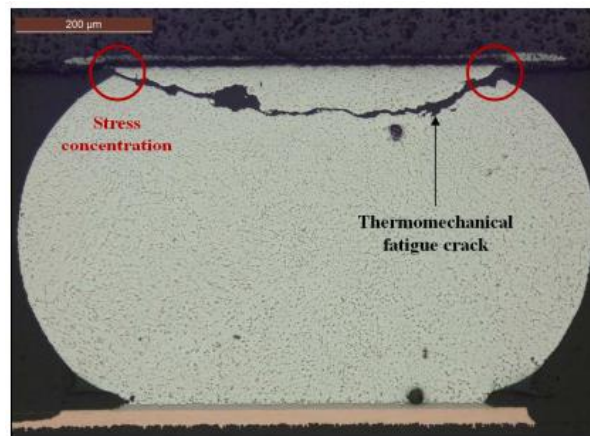


Figure 3.15 Propagation expérimentale des fissures [8]

Ces coins représentent les régions précises où l'initiation et la propagation des fissures se produisent, comme l'illustre la figure 3.16, ce qui indique la défaillance du composant. Ces résultats concordent avec de nombreuses études expérimentales antérieures, notamment les travaux de Dompierre Benoit [2], Marc Grieu [30], F. X. Che et al [29] et Stéphane Zanella [31] et L'accumulation de la concentration maximale de contraintes dans des régions spécifiques peut être attribuée à la croissance de la couche IMC.

3.10 Formation de la couche IMC

Lorsqu'un processus de soudage commence, une réaction se produit entre l'étain de l'alliage de brasage et le cuivre du substrat, formant ainsi un composé intermétallique (IMC) à l'interface entre les deux matériaux. La première couche IMC qui se forme est la couche Cu_6Sn_5 , également connue sous le nom de phase η . Cette couche résulte de la réaction entre l'étain de

l'alliage de soudure et le cuivre du substrat. Ensuite, la couche Cu_3Sn , également appelée phase ϵ , se forme entre la couche Cu_6Sn_5 et le substrat de cuivre, comme le montre la figure 3.17. Cette couche se développe par diffusion et croissance de type réactionnel, et sa formation dépend également de la réaction entre le cuivre et le Cu_6Sn_5 . Par conséquent, la couche de Cu_3Sn se trouve entre la couche de Cu_6Sn_5 et le substrat de cuivre, et sa croissance entraîne une diminution de la couche de Cu_6Sn_5 au fil du temps. La formation de couches IMC minces, continues et uniformes entre la soudure et le substrat est une condition importante pour la fiabilité des assemblages électroniques en premier temps. Cependant, la composition et la structure des couches IMC peuvent varier en fonction des conditions de réaction, des matériaux utilisés et des processus de fabrication. De ce fait, il est impératif de caractériser et de contrôler la formation des couches IMC pour garantir la qualité et les performances des composants électroniques. La formation de la couche de composé intermétallique (IMC) entre les joints de soudure et le substrat présente plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle peut réduire la résistance et la ductilité du joint de soudure, augmentant ainsi le risque de défaillance ou de fissuration. En outre, la croissance de la couche IMC au-delà d'un certain seuil au fil du temps peut entraîner une détérioration progressive des propriétés mécaniques du joint soudé, ce qui affecte la durabilité et la fiabilité du joint. Les couches IMC peuvent également être sensibles aux variations de température, ce qui peut entraîner des changements dans leurs propriétés mécaniques et affecter les performances du joint de soudure dans des conditions de température fluctuantes. Cette étude approfondie de la couche IMC a été étudiée par plusieurs chercheurs tels que Grieu et d'autres [30][9] [47].

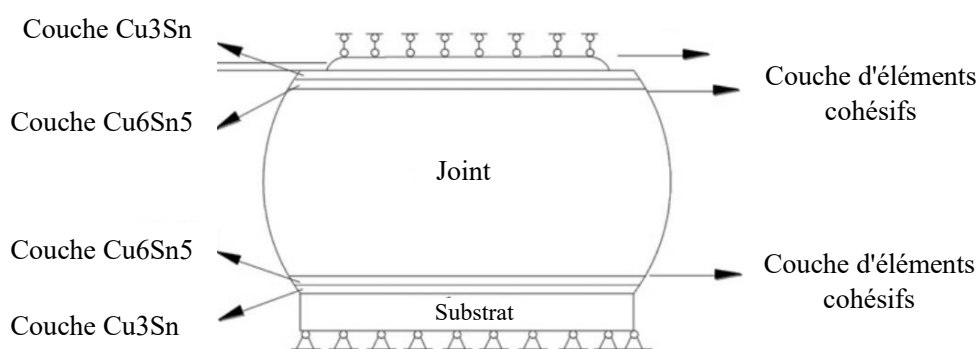


Figure 3.16 La répartition des couches de l'IMC [48]

Des recherches antérieures [48][49] ont rapporté les propriétés matérielles de la couche de Cu_6Sn_5 (IMC), qui sera incorporée dans la géométrie initiale afin de comparer son impact

mécanique sur la fiabilité des alliages de soudure. Ces propriétés matérielles sont présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Propriétés matérielles de la couche IMC (Cu₆Sn₅)

Variables	Valeurs
ρ (Kg / m ³)	8280
α (ppm/K)	16.3
E (GPa)	96.9
ν	0.309
λ (W/m. K)	34.1
ρ (Ω /m)	17.5 e-8
C_p (J/Kg. K)	286

Si la présence de la couche IMC garantit un joint bien soudé après le transfert des composants, elle peut également devenir un site potentiel de propagation des fissures sous l'effet des contraintes mécaniques si elle devient trop épaisse. Les cycles thermiques accentuent l'épaisseur de la couche IMC, entraînant la formation de couches intermétalliques fragiles qui ont un impact négatif sur la fiabilité du joint soudé. Il est donc essentiel de surveiller de près la formation et l'évolution de la couche IMC dans le temps. Il est conseillé d'empêcher la croissance des couches intermétalliques, qui sont plus rigides que le matériau de base de la bille, car elles peuvent initier et propager des fissures sous l'effet d'une contrainte mécanique. Ces conclusions ont été validées expérimentalement dans la thèse de Mathieu Berthou [32]. L'étude de simulation de E.P. Ooi et al. [33] a déterminé une géométrie de modèle d'éléments finis (FE), qui a été validée à l'aide d'un modèle analytique approprié pour différentes longueurs de fissure afin d'analyser le comportement à la rupture de la couche de composé intermétallique (IMC) du joint de soudure. Les résultats indiquent que la ténacité du matériau face à la contrainte diminue à mesure que la taille de la fissure ou du défaut interne augmente. En outre, alors que l'épaisseur de l'IMC a un impact mineur sur le facteur d'intensité de la contrainte, la croissance de la couche IMC augmente de manière significative le module d'Young du joint, ce qui rend le matériau plus fragile et plus susceptible de se fissurer.

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique dans les joints de brasure des composants BGA. Notre objectif principal était de développer des modèles avancés et des outils de simulation pour analyser et prédire le comportement mécanique, thermique et électrique de ces joints dans des conditions réelles. Nous avons commencé par décrire les principes de base de la modélisation analytique et numérique, en mettant en évidence les équations et les méthodes appliquées pour décrire le comportement des joints de brasure. Nous avons également souligné les défis liés au couplage multiphysique et l'importance de le prendre en compte pour obtenir des résultats précis et pertinents. Ensuite, nous avons détaillé notre approche de modélisation, en utilisant des logiciels de simulation tels qu'ANSYS. Nous avons décrit les différentes étapes, depuis la création de la géométrie du joint de brasure jusqu'à la définition des matériaux, des conditions aux limites et des charges appliquées. Les analyses mécaniques, thermiques et électriques que nous avons menées nous ont permis de capturer les interactions multiphysiques complexes à l'intérieur des joints de brasure. Une évaluation approfondie de la zone de concentration de contraintes au niveau de la bille de soudure a également été réalisée. Cette évaluation a fourni des informations précieuses sur les contraintes locales et les risques potentiels de défaillance, ce qui est essentiel pour orienter nos prochaines analyses et améliorer la fiabilité des joints de brasure.

En conclusion, ce chapitre a établi une base solide pour notre étude en modélisant le couplage multiphysique des joints de soudure dans les composants BGA. Les modèles développés et les analyses réalisées nous ont fourni une meilleure compréhension du comportement de ces joints dans des conditions réelles. Ces résultats constitueront la base pour la suite de notre recherche, notamment le chapitre prochain dans lequel nous nous concentrerons spécifiquement sur l'évaluation des performances des alliages de brasure les plus couramment utilisés, à savoir les trois principales générations : SnPb, le SAC et l'InnoLot. En utilisant des simulations avancées sur ANSYS Workbench, nous analyserons leur comportement électro-thermomécanique en vue de comparer leur fiabilité.

Chapitre 4

Etude comparative et choix de l'alliage des joints de brasure

4.1 INTRODUCTION	94
4.2 ETUDE DES ALLIAGES DES JOINTS DE BRASURE	95
4.2.1 Etat de l'art des alliages des joints de brasure	95
4.2.2 Présentation des lois de comportement des joints de brasure	99
4.2.3 Modèles unifiés viscoplastiques	100
4.3 PRESENTATION DU SYSTEME BGA	101
4.4 METHODOLOGIE DE L'ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES ALLIAGES.....	105
4.5 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	106
4.5.1 Étude de l'état de contrainte initial des alliages de brasage	107
4.5.2 Comparaison de l'effet de la charge électrothermique sur différents alliages de soudure.....	109
4.5.2.1 Étude de la contrainte équivalente de VonMises des alliages de soudure	109
4.5.2.2 Étude de la déformation des alliages des joints de soudure	110
4.5.2.3 Impact de la densité d'énergie de déformation sur les des alliages de soudure ..	114
4.5.3 Comparaison des différentes compositions d'alliages de soudure avec IMC	115
4.5.3.1 Étude du cyclage thermique sur la contrainte équivalente des alliages de joints de soudure	116
4.5.3.2 Étude du cyclage thermique sur la déformation des alliages de joints de soudure	117
4.5.4 Résumé.....	119
4.6 Conclusion	121

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons exploré la modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique dans les joints de brasure des composants BGA. Notre étude s'est concentrée sur les aspects liés aux contraintes mécaniques, thermiques et électriques, focalisant sur les modèles de comportement et les simulations avancées. Grâce à ce chapitre, nous avons acquis une compréhension approfondie des mécanismes clés qui influent sur la fiabilité des joints de brasure. Ainsi, les joints de soudure sont considérés comme les parties les plus fragiles et miniatures parmi les composants constituant un équipement électronique. Par conséquent, ils sont considérés comme les plus vulnérables au sein d'un assemblage électronique et sensibles aux dommages prématurés. Cependant, du point de vue fonctionnel, les joints de soudure assurent les connexions thermiques, mécaniques et électriques entre les éléments du boîtier, préservant ainsi leur intégrité tout au long des conditions de service et des processus de fabrication. La fiabilité de ces joints fait donc partie intégrante de tout emballage électronique. Une approche complémentaire à celles mentionnées précédemment, et qui occupe une place centrale dans la fiabilité, est présentée dans ce chapitre. Elle consiste à comparer différents composants ou compositions de matériaux afin de déterminer celui qui met en disposition la meilleure fiabilité sous une charge prédéfinie. Dans cette perspective, le choix du matériau de soudure approprié revêt une importance capitale pour la fiabilité des équipements embarqués. Une grande variété d'alliages de brasage sont disponibles, chacun se distinguant par sa composition chimique. Au fil des vingt dernières années, le choix des matériaux de brasage s'est considérablement élargi, en raison de la prise de conscience des problèmes environnementaux et des mesures prises pour réduire l'impact de l'industrie électronique. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur l'exploration des joints de soudure, notamment sur les avantages et les limites des alliages de soudure eutectiques SnPb et SAC. Cependant, aucun n'a réalisé d'étude comparative incluant le nouvel alliage de soudure d'InnoLot, qui contient de nombreux additifs améliorant ses performances. Cette nouvelle comparaison peut grandement aider l'industrie de l'ingénierie électronique, les ingénieurs et la société universitaire ainsi que les chercheurs à déterminer les meilleurs alliages de soudure en fonction de la miniaturisation des joints de soudure dans les boîtiers électroniques et des paramètres de contrainte, de déformation, de densité d'énergie de déformation, etc. Outre le fait que le choix de l'alliage de soudure est d'une grande importance, la fiabilité des dispositifs électroniques soumis à des conditions de service réelles est une considération primordiale. Les appareils électroniques génèrent une chaleur spécifique très élevée par rapport à leurs dimensions. Les contraintes thermomécaniques et la surchauffe sont

les principales causes de défaillance des équipements électroniques. Pour ces raisons, une étude électro thermo-mécanique constitue une étape inévitable de la phase de préproduction pour certifier les performances et la fiabilité des dispositifs électroniques [35], [36]. Ce chapitre présente une étude complète de la réponse de divers alliages de soudure (Sn63Pb37, SAC105, SAC305, SAC405 et InnoLot) aux charges électrothermiques. La présente enquête se fonde sur l'évaluation de leurs performances dans différentes conditions de température, en tenant compte de facteurs dont on cite les variations de la température de fusion, les contraintes résiduelles et l'influence de la couche IMC. L'étude souligne l'importance de considérer ces facteurs lors de la conception et de la fabrication des composants électroniques afin d'améliorer la longévité des joints de soudure. Les résultats contribuent à l'amélioration de la fiabilité des alliages de soudure et offrent des indications précieuses pour l'optimisation des performances des systèmes électroniques.

Ce chapitre est structuré en trois parties principales. Dans la première partie, une description du système étudié et des lois constitutives des joints de soudure ont été passées en revue. Dans la deuxième partie, une simulation numérique multiphysique réalisée sur ANSYS Workbench afin de définir l'alliage de soudure le plus pratique et le plus fiable après soumission à une charge électrothermique est illustrée, les résultats mécaniques sont analysés et des discussions ont lieu afin d'identifier lequel des cinq alliages de soudure est le plus fiable et devrait être choisi par rapport aux autres. La dernière section conclut l'étude et résume les résultats.

4.2 Etude des alliages des joints de brasure

4.2.1 Etat de l'art des alliages des joints de brasure

Depuis l'introduction de l'électronique dans les années 1960, les alliages d'étain et de plomb, ainsi que leurs dérivés, ont été largement prédominants dans l'assemblage des composants électroniques. L'alliage eutectique 63Sn-37Pb, en particulier, a été amplement adopté en raison de ses excellentes propriétés de soudure, de sa facilité de fabrication, de sa fiabilité éprouvée et de son coût abordable. Cette domination a longtemps limité la recherche et le développement de nouvelles formulations d'alliages. Cependant, l'évolution des normes environnementales et la directive européenne RoHS (Restriction on Hazardous Substances) mise en place en 2006 ont interdit l'emploi du plomb dans les produits électroniques. Cette réglementation a donné lieu à l'émergence de nouveaux alliages "sans plomb" qui visent à remplacer l'alliage traditionnel à base de plomb. Ces nouveaux alliages ont été développés pour répondre aux exigences environnementales tout en offrant des performances de soudure comparables, voire

supérieures, à celles de l'alliage à base de plomb précédemment utilisé [37], [38]. La directive RoHS 2006, a imposé l'interdiction de l'emploi du plomb dans les équipements électroniques, hormis certains secteurs spécifiques tels que le secteur militaire et aéronautique, qui ne sont pas soumis aux restrictions de cette directive [2]. En conséquence, les réglementations sur l'élimination des déchets électroniques et la directive de l'Union européenne (UE) concernant la limitation des substances dangereuses ont conduit à l'élimination des soudures au SnPb des produits électroniques grand public commercialisés sur les marchés de l'UE, ainsi que dans d'autres pays tels que la Corée du Sud, la Chine, les États-Unis, la Turquie et le Japon. Un matériau peut être considéré comme exempt de plomb s'il contient en quantité moindre que 0,1 % de plomb en poids. Les nouvelles soudures utilisées sont communément composées d'étain et d'un ou divers éléments d'alliage qui leur confèrent de propriétés physiques et mécaniques excellentes. Le cuivre et l'argent sont les principaux éléments employés pour constituer des alliages binaires ou ternaires avec l'étain. D'autres éléments tels que l'indium ou le bismuth envisageables d'optimiser certaines propriétés mécaniques ou thermiques [39]. Alors que la date limite de mise en œuvre approche de la législation RoHS en 2006, les deux principales solutions de remplacement de la soudure SnPb courante étaient l'eutectique SnAgCu et l'eutectique SnCu, toutes deux considérées comme acceptables par les universités et les consortiums industriels aux États-Unis, au Japon et en Europe. Cependant, les inquiétudes concernant le coût du brevet de l'université d'État de l'Iowa couvrant l'eutectique SnAgCu et le coût plus élevé de l'Ag ont incité l'Association japonaise pour le développement de l'industrie électronique (JEIDA, aujourd'hui JEITA) à approuver l'alliage hypoeutectique SAC305, qui était alors couvert par un brevet japonais détenu par Senju Metal Industries [40]. En dehors des domaines d'application couverts par cette directive, l'utilisation de ces alliages suscite encore des débats en raison des incertitudes concernant leur fiabilité et de la méconnaissance de leur comportement en conditions réelles. Parmi la multitude d'alliages sans plomb disponibles, L'alliage SAC bénéficie d'une reconnaissance étendue comme le choix le plus prometteur grâce à ses propriétés mécaniques et de traitement qui se rapprochent de celles de l'alliage eutectique SnPb [41]. L'adoption généralisée de l'alliage SAC dans l'industrie du brasage témoigne de son bon compromis entre performances et coût. Actuellement, plus de 60 % du marché du brasage à la vague est dominé par cet alliage, tandis que dans le domaine du brasage par refusion, il représente plus de 75 % de part de marché. Cette préférence s'explique par les propriétés mécaniques et de traitement comparables à celles de l'alliage eutectique SnPb. Toutefois, il convient de noter que la formation de composés intermétalliques à partir des principaux éléments de l'alliage, à savoir le Sn, l'Ag et le Cu, exerce une influence significative sur ses

propriétés mécaniques. Ces composés intermétalliques sont d'une importance capitale dans la performance et la fiabilité de cet alliage. Bien que leur présence puisse améliorer les propriétés mécaniques, leur comportement dans des conditions d'utilisation réelles reste complexe et nécessite une étude approfondie. La microstructure cristalline de l'alliage SAC ajoute une complexité supplémentaire. L'étain présente une anisotropie à l'échelle microstructurale, ce qui rend la modélisation du comportement et des mécanismes d'endommagement de l'alliage plus délicat. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte avec soin la microstructure lors de la modélisation et de l'évaluation de la fiabilité de l'alliage. Au fur et à mesure, des progrès ont été réalisés en incorporant de petites quantités d'éléments d'alliage tels que Zn, B, Ce, Fe, Bi, Ni, Co, Mn, Ti, In, Al, etc. Ces ajouts ont pour objectif d'améliorer et de maintenir la stabilité de la microstructure ainsi que les propriétés de fatigue. Un nouvel alliage de brasage appelé InnoLot, avec la composition $\text{SnAg}_{3.7}\text{Cu}_{0.65}\text{Bi}_{3.0}\text{Sb}_{1.43}\text{Ni}_{0.15}$, a également fait son apparition dans le secteur automobile. Il présente des avantages comparatifs par rapport aux alliages sans plomb standard et a été largement étudié pour sa performance et sa fiabilité supérieures. La microstructure et la composition de la soudure sont des éléments cruciaux dans l'évaluation de la fiabilité. En raison de la présence de la matrice de grains β -Sn et des phases de composés intermétalliques, les brasures SAC présentent une plus grande hétérogénéité microstructurale par rapport aux brasures SnPb traditionnelles. Cette hétérogénéité peut influencer les modes de défaillance sous l'effet de la fatigue thermomécanique des joints brasés [10]. L'enquête dirigée par Benoit et al. [2] révèle l'influence directe de certains paramètres, tels que la composition, la vitesse de refroidissement et le vieillissement thermique, sur le comportement mécanique et la microstructure des alliages SnAgCu. La microstructure de ces alliages est étroitement liée à leur composition. Lorsque la teneur en argent est augmentée dans les alliages de type SAC (avec une teneur en argent inférieure à 3,8%), on observe une croissance du nombre de petits intermétalliques. Cette augmentation de la quantité d'argent a un effet positif sur la limite d'élasticité de l'alliage. En d'autres termes, plus la teneur en argent est élevée, plus la limite d'élasticité est élevée. Cette tendance est également observée pour le module de Young, qui augmente avec la teneur en argent. Ces résultats mettent en évidence de manière plus précise l'importance de la composition de l'alliage dans la formation de la microstructure et dans la détermination de ses propriétés mécaniques. Comprendre ces relations permette une meilleure appréhension du comportement des alliages SnAgCu et d'optimiser leur utilisation dans diverses applications. La pertinence des analyses de fiabilité ultérieures dans la modélisation du boîtier microélectronique repose en grande partie sur la loi constitutive utilisée pour décrire le comportement de l'alliage de brasure. Afin de comprendre pleinement les

bénéfices et les limitations de la soudure, de nombreux chercheurs ont réalisé un état de l'art approfondi, notamment dans la thèse de Joshua et al. [9]. Un résumé des avantages et des inconvénients des alliages est détaillé dans le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1 Avantages et inconvénients des alliages

Sn63Pb37	
(+)	(-)
<ul style="list-style-type: none"> - Point de fusion extrêmement bas, autour de 183°C. - Bonne capacité d'écoulement qui constitue une menace thermique moindre pour le composant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un processus de déformation dépendant du temps, de la température et de la vitesse est engendré en service en raison de la température homologue élevée. - La présence de plomb dans la composition a des répercussions sur la santé et l'environnement.
Alliages SAC	
<ul style="list-style-type: none"> - Ils présentent une température de travail de préférence inférieure à 200°C et un point de fusion plus élevé. - Ils ont une liaison plus forte et sont moins sensibles à la fatigue mécanique, d'où une résistance mécanique élevée par rapport à la soudure à l'étain eutectique. - Ils ont une faible résistance électrique par rapport à la soudure à l'étain eutectique. - Ils ont une meilleure résistance à la fatigue due aux cycles thermiques. - Il n'y a pas de dommage à l'environnement pour le présent et l'avenir. - Possibilité de travailler comme avant, coûts les plus bas et compatibilité avec les processus existants. 	<ul style="list-style-type: none"> - En raison de la teneur élevée en argent (Ag), des intermétalliques (IMC) se forment, ce qui entraîne une rugosité et la formation de picots sur la surface de la soudure, ainsi qu'une ductilité plus faible et un module d'Young plus élevé. - Les températures de fabrication sont plus élevées en raison de la hausse du point de fusion. - En raison de la teneur élevée en argent (Ag), la soudure est plus chère. - Les températures élevées peuvent rendre les retouches plus difficiles. - Son point de fusion est assez élevé, de sorte que les opérateurs peuvent endommager les composants électroniques s'ils ne sont pas suffisamment prudents lors de l'opération de soudage. - Sa mouillabilité et sa fluidité ne sont pas idéales par rapport à la soudure à l'étain eutectique.

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur l'exploration des joints de soudure, notamment sur les avantages et les limites des alliages de soudure eutectiques. La plupart d'entre eux l'ont examiné séparément, c'est-à-dire l'étude de chaque élément constitutif de cet alliage : Sn, Ag, Cu, Sb, Ni et Bi comme le montre le tableau 4.2 ci-dessous.

Tableau 4.2 Caractéristiques des éléments[10]

Element	Température de fusion (°C)	Caractéristiques
Sn = Étain	232	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Métal d'alliage de base ▷ Température de fusion basse ▷ Facilement disponible
Ag = Argent	962	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Absorbe le Cu, croissance intermétallique avec le Cu ▷ Coûteux
Cu = Cuivre	1084	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Le moins cher et le moins affecté par les impuretés du plomb. ▷ La couche d'oxyde est plus difficile à enlever
Sb = Antimoine	630.5	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Améliore les propriétés mécaniques ▷ Réduction mineure de la conductivité thermique et électrique ▷ Toxique (sur la liste EACEM "ne pas utiliser")
Ni = Nickel	1453	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Empêche la dissolution du cuivre
Bi = Bismuth	271.5	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Réduit la température de fusion ▷ Résistance accrue à la traction ▷ Accroît la tendance à la fatigue thermique et la fragilité ▷ Se dilate lors de la solidification ▷ S'il est contaminé par du plomb, il devient plus fragile.

4.2.2 Présentation des lois de comportement des joints de brasure

Les lois de comportement des joints de brasure sont un élément clé pour comprendre leur réponse mécanique et thermique dans les conditions d'utilisation des composants BGA. Ces joints de brasure sont soumis à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et électriques lors de leur fonctionnement, tels que les variations de température lors du cycle de soudage, les contraintes thermomécaniques lors de l'assemblage et les contraintes de service pendant la durée de vie du composant. Les lois de comportement permettent de décrire la relation complexe entre les contraintes appliquées sur les joints de brasure et leur déformation, de la même façon que leur comportement vis-à-vis du fluage, de la relaxation de contraintes, de la plasticité et de la viscosité en fonction des sollicitations. Le fluage est un processus physique

au cours duquel un matériau subit une déformation permanente progressive, même sous l'effet d'une contrainte constante inférieure à sa limite élastique, et cela sur une période prolongée. On distingue généralement deux types de comportement associés au fluage : le comportement viscoélastique, principalement observé dans les polymères, et le comportement viscoplastique, qui concerne plutôt les métaux et les céramiques. Le fluage viscoélastique se caractérise par une réponse du matériau qui combine des propriétés visqueuses et élastiques. Il est souvent observé dans les polymères, où la déformation est causée par des mouvements moléculaires lents et des changements de configuration des chaînes polymériques. Le fluage viscoplastique, quant à lui, est associé à la déformation permanente des métaux et des céramiques sous l'effet d'une contrainte constante. Ce type de fluage résulte de mécanismes tels que la diffusion des dislocations et le glissement plastique des plans cristallins.

4.2.3 Modèles unifiés viscoplastiques

La modélisation des boîtiers microélectroniques nécessite une loi constitutive précise pour décrire le comportement de l'alliage de soudure, qui est un matériau fortement viscoplastique, dont les propriétés dépendent grandement de la température et du taux de charge. Lorsqu'il est soumis à des cycles thermiques, la brasure présente principalement un comportement de fluage. La littérature scientifique propose différents modèles afin d'apporter une description plus précise sur le comportement de fluage prédominant de l'alliage de soudure. De plus, des modèles unifiés ont été proposés pour combiner la déformation plastique et le fluage, en se basant sur l'hypothèse que ces deux types de déformations inélastiques résultent du même mécanisme, à savoir le mouvement des dislocations. Ces modèles intègrent les déformations dépendantes et indépendantes du temps dans une seule relation exprimée par une variable d'état, afin de fournir une approche complète et cohérente de la déformation inélastique. Le modèle d'écrouissage isotrope développé par L. Anand est largement utilisé comme modèle constitutif unifié pour les matériaux de brasage. Ce modèle est spécialement conçu pour s'adapter aux comportements des alliages de brasage, qui sont des matériaux ductiles hautement viscoplastiques. Son principal avantage réside dans sa capacité à considérer l'écrouissage du matériau en incorporant une variable interne dans les équations constitutives. Cette variable interne permet de capturer les changements de propriétés mécaniques du matériau lorsqu'il est soumis à des charges cycliques [10]. Le modèle d'Anand a été spécifiquement développé pour décrire la déformation des métaux à haute température, en tenant compte de la dépendance de la vitesse de déformation et d'autres phénomènes visqueux. Les alliages de type SAC, utilisés dans les brasages, fonctionnent généralement à des températures ambiantes qui peuvent être

considérées comme élevées par rapport à d'autres matériaux. C'est pourquoi de nombreuses études ont choisi d'utiliser le modèle d'Anand pour caractériser les alliages SAC. L'un des facteurs qui contribuent au succès du modèle d'Anand est sa grande accessibilité directe sous le logiciel de modélisation par éléments finis ANSYS. Cette accessibilité facilite l'utilisation et l'intégration du modèle dans les analyses de fiabilité et de comportement mécanique des assemblages brasés. Les chercheurs et les ingénieurs peuvent ainsi intégrer facilement le modèle dans leurs simulations, ce qui contribue à sa popularité [2]. La loi d'évolution de la déformation inélastique est décrite par l'équation :

$$\dot{\epsilon}_p = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{S}\right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

m : sensibilité à la vitesse de déformation ; ξ : constante scalaire non dimensionnelle ; R : constante des gaz ; Q : énergie d'activation ; A : facteur pré-exponentiel. Le modèle d'Anand incorpore une variable interne s , qui représente la "résistance à la déformation plastique", pour moduler la contrainte dans le matériau. Cette variable d'état est sensible à la température et prend en compte la vitesse de déformation inélastique.

$$\dot{s} = \left\{ h_0 \left[1 - \frac{s}{\hat{s}} \right]^a \times \text{sign} \left(1 - \frac{s}{\hat{s}} \right) \right\} \times \dot{\epsilon}_p \quad (2)$$

h_0 : constante scalaire non dimensionnelle

$$\dot{s} = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right] \quad (3)$$

Les lois de comportement des joints de brasure sont généralement déterminées à partir d'expérimentations sur des échantillons de brasures soumis à des essais de fatigue, de traction, de compression, de fluage, etc. Les données expérimentales obtenues sont ensuite utilisées pour formuler des modèles mathématiques, tels que les modèles viscoplastiques, les modèles d'endommagement, les modèles de fluage, etc. De plus, les simulations numériques basées sur des méthodes de calculs par éléments finis peuvent également prédire la réponse ou le comportement des joints de brasure dans des conditions spécifiques.

4.3 Présentation du système BGA

Parmi les composants électroniques existants décrit dans le chapitre bibliographique, nous avons opté de travailler sur le composant BGA dans ce travail de recherche. Le Ball Grid Array (BGA) est un type de boîtier électronique largement utilisé dans les dispositifs électroniques modernes, tels que les circuits intégrés, les cartes de circuit imprimé, et les modules électroniques. Le BGA offre de multiples bénéfices par rapport aux autres types de boîtiers

électroniques, particulièrement une densité de connexion élevée, une meilleure dissipation de chaleur, et une résistance accrue aux vibrations et aux chocs. Il est composé d'un substrat en céramique ou en plastique avec des billes de soudure disposées sous le boîtier, formant ainsi un réseau de connexions. Les billes de soudure servent de points de connexion pour relier le composant BGA à la carte de circuit imprimé, permettant ainsi le transfert de signaux électriques et la dissipation de chaleur.

Notre assemblage se caractérise par une structure particulière, composée de plusieurs couches de matériaux différents. La couche de silicium correspond à la puce, les couches de cuivre au-dessous et au-dessus des joints de soudure représentent la jonction métallique et la couche FR4 du circuit imprimé (PCB) fait référence au support mécanique de l'assemblage. ANSYS APDL Release 2022 R1 est utilisé pour créer le modèle FE de l'assemblage. Dans ce modèle, le type d'élément SOLID227 a été sélectionné pour générer le maillage. Dans le but de minimiser le temps de résolution de la simulation tout en obtenant des résultats significatifs et précis, il est recommandé d'utiliser un quart du modal complet. Le quart de la géométrie complète avec 12 joints de soudure a été modélisé (voir Figure 4.1) a été maillée avec des éléments finis tétraédriques (568319 nœuds et 399243 éléments). Un raffinement sélectif du maillage est utilisé pour concentrer l'élément hautement raffiné dans les joints de soudure où la défaillance est la plus probable. La taille de la puce était de $3 \times 5 \times 0,55$ mm et les couches de cuivre de $3 \times 5 \times 0,36$ mm, et la hauteur d'écartement des joints de soudure était de 0,2 mm La couche FR4 du circuit imprimé était de $3 \times 5 \times 0,2$ mm Ces spécifications techniques et ces dimensions ont été extraites d'une fiche technique publiée par Infineon, [42] un groupe leader dans le domaine des semi-conducteurs.

Les conditions limites de déplacement du quart de l'assemblage sont deux symétries appliquées sur les surfaces opposées du silicium, du cuivre et du circuit imprimé. Le point central du circuit imprimé est supposé n'avoir aucun déplacement dans la direction verticale afin d'éviter le mouvement des corps rigides. En matière des conditions limites thermiques, le phénomène de radiation a été négligé. En ce qui concerne le phénomène de convection, le coefficient de convection thermique "h" a été supposé compris entre 10 et 25 W m⁻² K⁻¹ [43] car nous ne considérons que la convection naturelle.

La description globale est présentée à la figure 4.1 ci-dessous :

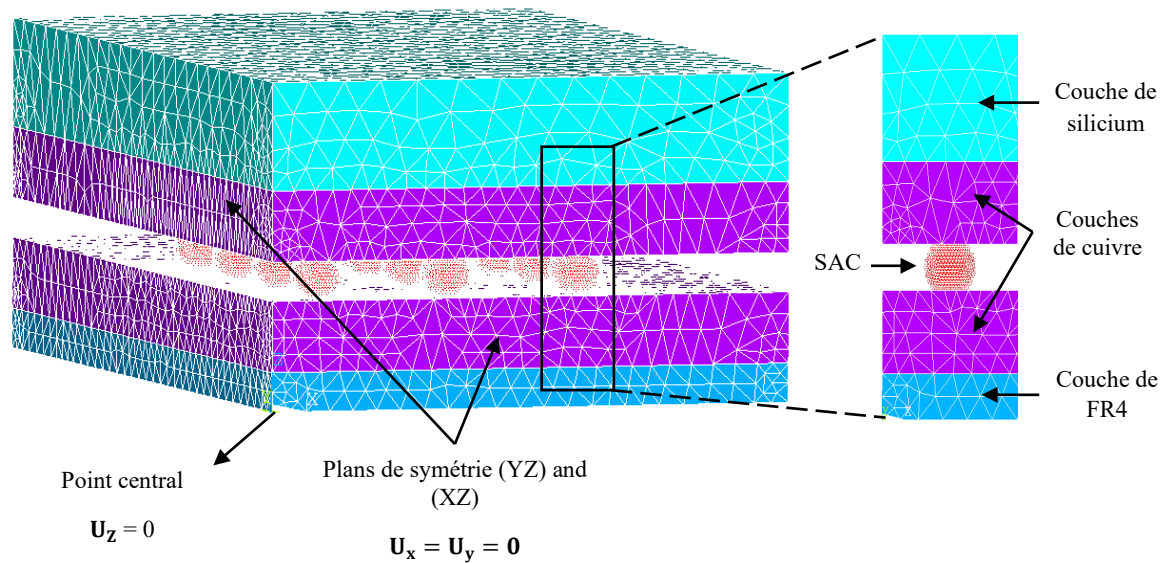


Figure 4.1 Modèle global d'éléments finis pour un quart d'assemblage BGA avec conditions aux limites

Les hypothèses de base utilisées dans la modélisation et l'analyse par éléments finis pour la méthodologie de recherche sont les suivantes :

- Le cuivre et le silicium sont supposés être homogènes pendant les étapes de chargement, alors que les alliages FR4-Epoxy et de soudure considérée dans cette étude ne le sont pas.
 - Les assemblages sont censés être soumis à des contraintes pendant le chargement du cycle thermique, à compter de la température de fusion. La contrainte initiale dans les joints résultant du processus de soudage par refusion est prise en compte.
 - Toutes les surfaces de contact doivent être parfaitement collées.
 - Les propriétés matérielles des alliages de soudure sont non linéaires. Le coefficient de dilatation thermique et le module d'Young et du cuivre et du silicium dépendent de la température. En d'autres termes, les autres sont linéaires et indépendants de la température.
- Étant donné l'importance de l'impact de la différence de matériau dans la simulation électro-thermomécanique du système, il est essentiel d'examiner les propriétés des matériaux de chaque partie de l'assemblage qui sont eu à partir de plusieurs travaux publiés dans la littérature comme la thèse de Halouani et al [20], Nhat et al. [10] et les travaux de Sinda et al. [44][45]. Le tableau 4.3 et le tableau 4.4 ci-dessous présente les propriétés des matériaux des couches des différents types d'alliages adoptés dans notre assemblage.

Tableau 4.3 Propriétés matérielles des couches

	FR4-Epoxy	Cuivre	Silicium
λ (W/m. K)	0.3	370	150
α (ppm/K)	18	16.28 + 0.0114 T	2.48 + 0.0066 T
C_p (J/Kg. K)	1150	380	710
E (MPa)	22 E3	114 E3	162280 - 7.55 T
ρ (Kg / m ³)	1900	8690	2330
ν	0.28	0.34	0.28
ρ (Ω /m)	8 E11	1.7 E – 8	4 E3
Point de fusion (°C)	135	1085	1410

Tableau 4.4 Propriétés matérielles des billes de soudure

Temps	1ère Génération					2ème Génération			3ème Génération	
	Alliages	SnPb	SAC105	SAC305	SAC405	SAC405	SAC405	SAC405	InnoLot	InnoLot
ρ		8800	7320	7390	7440	7440	7440	7440	7400	7400
α		20 × 10 ⁻⁶	21 × 10 ⁻⁶	23.5 × 10 ⁻⁶	20 × 10 ⁻⁶	20 × 10 ⁻⁶	20 × 10 ⁻⁶	20 × 10 ⁻⁶	27,9	27,9
E		56 × 10 ⁹	55 × 10 ⁹	51,2 × 10 ⁹	44,6 × 10 ⁹	44,6 × 10 ⁹	44,6 × 10 ⁹	44,6 × 10 ⁹	35 × 10 ⁹	35 × 10 ⁹
ν		0.3	0.35	0.4	0.42	0.42	0.42	0.42	0.36	0.36
λ		51	60	58,7	62	62	62	62	55,2	55,2
ρ		1.5 × 10 ⁻⁶	1.33 × 10 ⁻⁷	1.30 × 10 ⁻⁶	1.32 × 10 ⁻⁷	1.32 × 10 ⁻⁷	1.32 × 10 ⁻⁷	1.32 × 10 ⁻⁷	-----	-----
C_p		190	210	232	309,3	309,3	309,3	309,3	232	232

Les caractéristiques du modèle d'Anand pour l'alliage SnAgCu sont déduites en utilisant une combinaison de données expérimentales et d'investigations précédentes. Ces recherches offrent des indications cruciales concernant les propriétés mécaniques et le comportement viscoplastique de ce matériau [10][46].

Les valeurs correspondantes sont répertoriées dans le tableau 4.5 ci-après :

Tableau 4.5 Paramètres Anand des joints de soudure

Paramètres des matériaux	Sn63Pb37	SAC105	SAC305	InnoLot	SAC405
A (s ⁻¹)	6220	3.733	3501	347.28	325
Q/R (°k)	6526	8076	9320	9796	10561
ξ	3.33	0.9951	4	20	10
m	0.27	0.4454	0.25	0.7574	0.32
σ̂ (MPa)	36.86	3.5833	30.2	45.39	42.1
n	0.022	0.012	0.01	0.02	0.02
h ₀ (MPa)	60.599	4507.5	180000	21047	800000
a	1.7811	2.1669	1.78	1.4647	2.57
s ₀ (MPa)	3.1522	2.3479	21	45.39	20

4.4 Méthodologie de l'étude comparative des performances des alliages

La méthodologie de l'étude comparative des performances des alliages de soudure repose sur trois principales parties. Une phase préliminaire de cette étude vise à effectuer une analyse approfondie de l'état initial des contraintes dans les alliages de brasage. Cela permet d'évaluer les contraintes résiduelles présentes dans les joints de soudure avant l'application de toute charge électrothermique. Cette analyse fournit une base solide pour comprendre l'impact des contraintes initiales sur la fiabilité des joints de soudure. La deuxième partie de l'étude se focalise sur la comparaison de l'impact de la charge électrothermique sur différents alliages de soudure en l'absence de couche d'IMC (Intermetallic Compound). Ces charges font référence aux accumulations de température auxquelles les joints de soudure sont soumis pendant leur durée de vie opérationnelle. Cette partie de l'étude vise à évaluer la performance et la fiabilité des alliages de soudure dans des conditions de température variables.

La troisième partie de l'étude se concentre sur la comparaison de l'effet des différentes compositions d'alliages de soudure avec la présence de la couche d'IMC. L'IMC est une couche formée à l'interface de jonction entre le matériau de soudure et le matériau de base lors du processus de brasage. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de la composition des

alliages de soudure sur la fiabilité des joints de soudure en présence d'IMC, en considérant les variations de température. En utilisant des simulations numériques avancées et des analyses comparatives, cette étude permet de générer des conclusions quantitatives sur les performances des alliages de soudure dans différentes conditions de contraintes thermomécaniques. Les conclusions de cette étude fournissent des indications précieuses pour l'optimisation des performances et la fiabilité des systèmes électroniques.

Les composants tels que les BGA peuvent être endommagés de manière fatale par une chaleur excessive en raison de l'inadéquation de la CTE. Outre le facteur thermique, le comportement viscoplastique définit la plasticité dépendante de la vitesse dans les solides. Des taux de charge plus élevés entraînent généralement des déformations et des vitesses de déformation plus importantes dans le matériau de l'alliage de soudure, ce qui affecte la performance contrainte-déformation [41]. La plasticité est appliquée pour déterminer la réponse inélastique d'un matériau de brasage qui supporte une déformation permanente lors d'un déchargement complet. Par rapport à la déformation élastique, la déformation plastique se produit en raison des variations microstructurales dans le matériau de brasage déformée [11]. L'analyse de l'effet du cycle thermique sur la réponse mécanique de la soudure est étudiée et présentée dans tous les contextes dans la section suivante.

4.5 Résultats et discussions

Lorsque l'on compare les performances d'alliages ou de techniques de soudage, il est essentiel de choisir une référence pour garantir une comparaison équitable. La température de fusion est souvent utilisée comme référence car elle détermine la température minimale à laquelle le matériau d'apport doit être chauffé pour fondre et adhérer aux surfaces à assembler. Dans les applications où le joint est exposé à des températures élevées, il est essentiel de choisir un matériau d'apport à point de fusion élevé pour éviter que le joint ne fonde ou ne s'affaiblisse.

Dans la sous-section suivante, une étude numérique sera réalisée sur les trois générations de joints afin de comparer leur comportement quand ils sont exposés à leur température de refusion, ainsi que leur comportement au moment où ils sont subis à des charges électrothermiques. Les contraintes résultant de cette simulation seront comparées aux contraintes résiduelles initiales pour simuler les conditions de service réelles. Il peut être plus approprié d'utiliser un profil de température reflétant les conditions de service attendues pour mieux simuler ces conditions. Cependant, il est crucial de considérer les contraintes résiduelles qui peuvent être générées pendant le refroidissement du joint de brasure, car ces contraintes

peuvent affecter la résistance du joint de brasure et sa durée de vie. En comparant le comportement des alliages dans les différentes conditions d'essai, il sera possible de d'identifier celui qui présente la meilleure adéquation.

4.5.1 Étude de l'état de contrainte initial des alliages de brasage

La température de fusion est un point de départ précieux pour l'étude de l'influence de la température sur les joints de brasage, car elle tient compte des contraintes résiduelles qui peuvent se développer au cours du processus de refroidissement des soudures. Ces contraintes peuvent influencer la résistance mécanique et la durée de vie du joint de soudure. En utilisant la température de fusion comme point de référence initial, il est envisageable de considérer ces contraintes résiduelles et de mieux comprendre comment la température affecte les performances des joints de soudure. Les valeurs de cette température dépendent de la composition de l'alliage, comme le montre le tableau 4.6 ci-dessous.

Tableau 4.6 Résultats de l'état de contrainte initial

Alliages	SnPb	SAC			InnoLot
		SAC105	SAC305	SAC405	
Température de fusion	183°C	225°C			218°C
Contraintes résiduelles	439.8 MPa	565.79 MPa	565.81 MPa	565.86 MPa	544.78 MPa
Deformation plastique accumulée	8,62E-02	9,71E-02	9,63E-02	9,47E-02	9,24E-02

Les contraintes résiduelles sont des contraintes internes qui se développent dans un matériau en raison de processus tels que le brasage. L'évaluation des contraintes équivalentes permet de mieux les comprendre et de les quantifier, ce qui est essentiel pour la conception et l'optimisation des structures brasées [51]. Si le matériau est soumis à des contraintes externes telles que le cycle thermique accéléré (ATC), ces contraintes internes se superposent aux contraintes appliquées au matériau (contraintes de service). Le champ de contraintes résiduelles généré dans la structure par l'opération de brasage affectera son comportement en service. L'intensité et la localisation de ces contraintes auront une influence sur la durée de vie en fatigue et la propagation des fissures.

Après avoir effectué des simulations en utilisant les charges électrothermiques de ces cinq alliages de soudure, nous avons obtenu la réponse mécanique, qui est présentée dans le tableau 4.6 correspondant. Nous nous concentrons principalement sur la contrainte résiduelle générée pendant le processus de refusion et son impact sur le comportement mécanique de ces alliages. Étant donné leur nature viscoplastique, nous considérons la déformation plastique accumulée comme le facteur le plus approprié pour notre analyse et notre raisonnement. Nous avons donc choisi de mettre l'accent sur la priorité accordée à l'évaluation de la contrainte et de la déformation plastique accumulée.

Après observation, il est évident que les alliages SAC présentent les valeurs de contrainte résiduelle les plus élevées, avec seulement de légères variations lorsque le pourcentage d'Ag change. L'alliage InnoLot suit de près. Il convient de noter que le SnPb présente la contrainte résiduelle la plus faible, principalement en raison de sa température de fusion plus basse, ce qui le rend plus facile à manipuler. Par conséquent, une hausse de la température de brasage exerce directement une croissance de la contrainte résiduelle dans l'alliage.

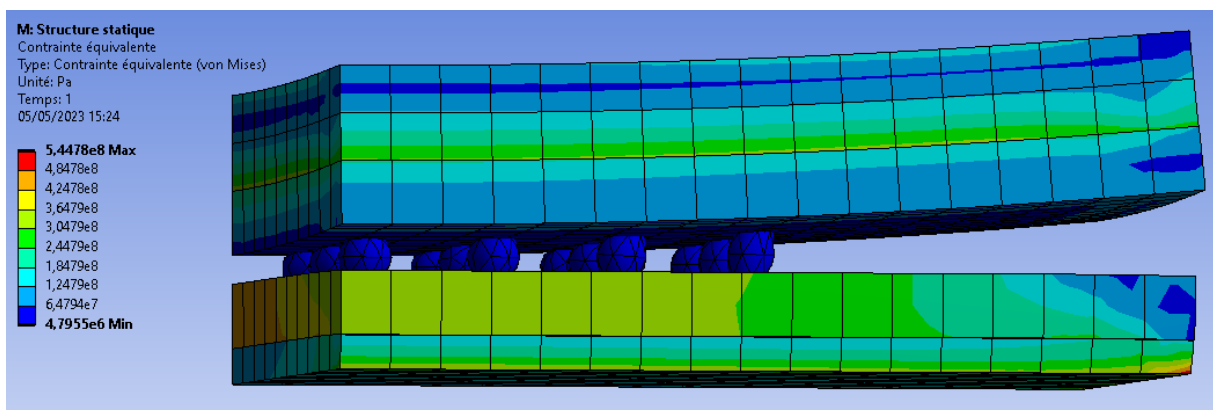


Figure 4.2 Distribution des contraintes équivalentes pour l'alliage InnoLot

La figure 4.2 montre les zones de concentration de contraintes sur la bosse de soudure et la tendance au gauchissement de la puce de silicium par rapport aux joints de soudure. Lorsque les boîtiers BGA sont soumis à des températures élevées pendant le soudage par refusion, un gauchissement peut se produire. Lors du soudage par refusion, un gauchissement ou une déformation de la forme se produit. De nombreux modes de défaillance des joints de soudure peuvent être causés par le gauchissement, tels que le pontage, le non-mouillage et l'étirement du joint, etc. [52]. Dans notre étude, comme le montre la figure, on observe un joint de soudure très étiré. La tendance générale de la contrainte résiduelle parmi les différentes générations

d'alliages est directement proportionnelle à la tendance de la déformation plastique accumulée. La valeur la plus élevée de contrainte résiduelle est observée dans les alliages SAC, suivis par InnoLot, tandis que la valeur la plus faible est trouvée dans SnPb. Pour les différentes compositions des alliages SAC, on observe une diminution de la déformation plastique accumulée. Ceci peut être attribué au phénomène d'écrouissage.

Ces résultats obtenus serviront de référence pour la comparaison dans le reste du chapitre.

4.5.2 Comparaison de l'effet de la charge électrothermique sur différents alliages de soudure

L'analyse de l'effet des cycles thermiques, tel que montré dans la figure 4.3, sur la réponse mécanique de la soudure est étudiée et présentée dans tous les contextes. Les résultats obtenus sont discutés dans les sous-sections suivantes.

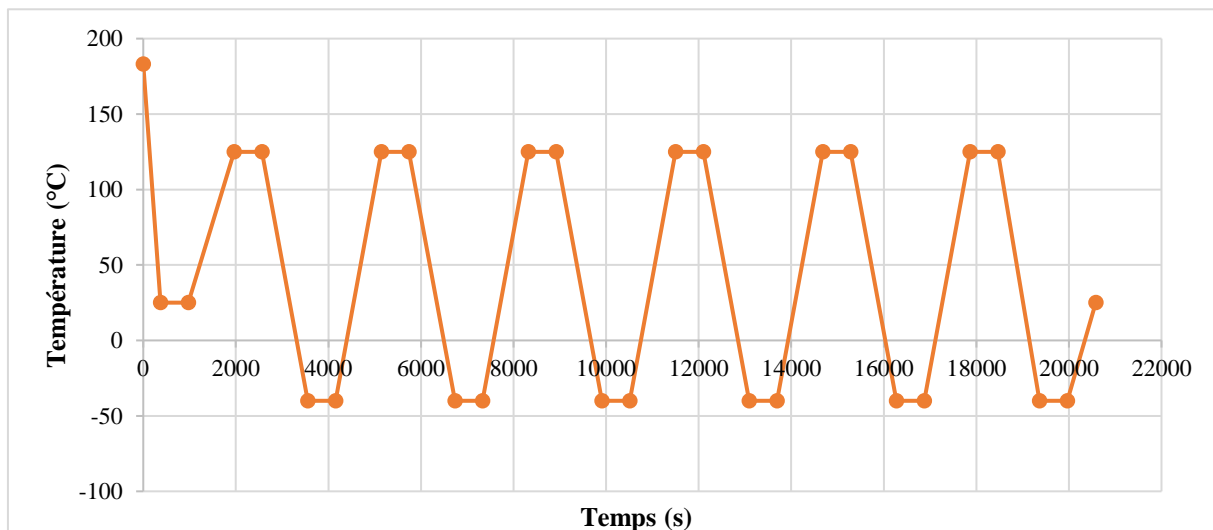


Figure 4.3 Cycles de températures appliqués

4.5.2.1 Étude de la contrainte équivalente de VonMises des alliages de soudure

Les contraintes thermiques cycliques dans les boîtiers électroniques constituent un défi fondamental pour la fiabilité de l'électronique. La fiabilité est liée à la formation et à la propagation de fissures qui, si elles ne sont pas contrôlées, aboutissent à la défaillance des systèmes. Les résultats de la simulation sont utilisés pour tracer la figure 4.4. Le tracé montre une distribution cyclique dans les six cycles pour tous les alliages de soudure où la pente augmente ou diminue, auquel cas le gradient/cycles est déterminé. Afin d'atteindre la finalité de cette étude, il est donc nécessaire de faire la comparaison les résultats des contraintes pour les cinq alliages de joints considérés. On constate que les contraintes observées pour le SnPb, le

SAC105 et le SAC305 sont très proches, suivies d'une augmentation significative pour le SAC405 et ensuite le nouvel alliage InnoLot qui accumule la contrainte la plus élevée. Ceci est principalement lié aux additifs par rapport aux alliages de soudure SnPb et SAC. L'impact de ces substances supplémentaires ont été précédemment détaillé dans le tableau 4.2.

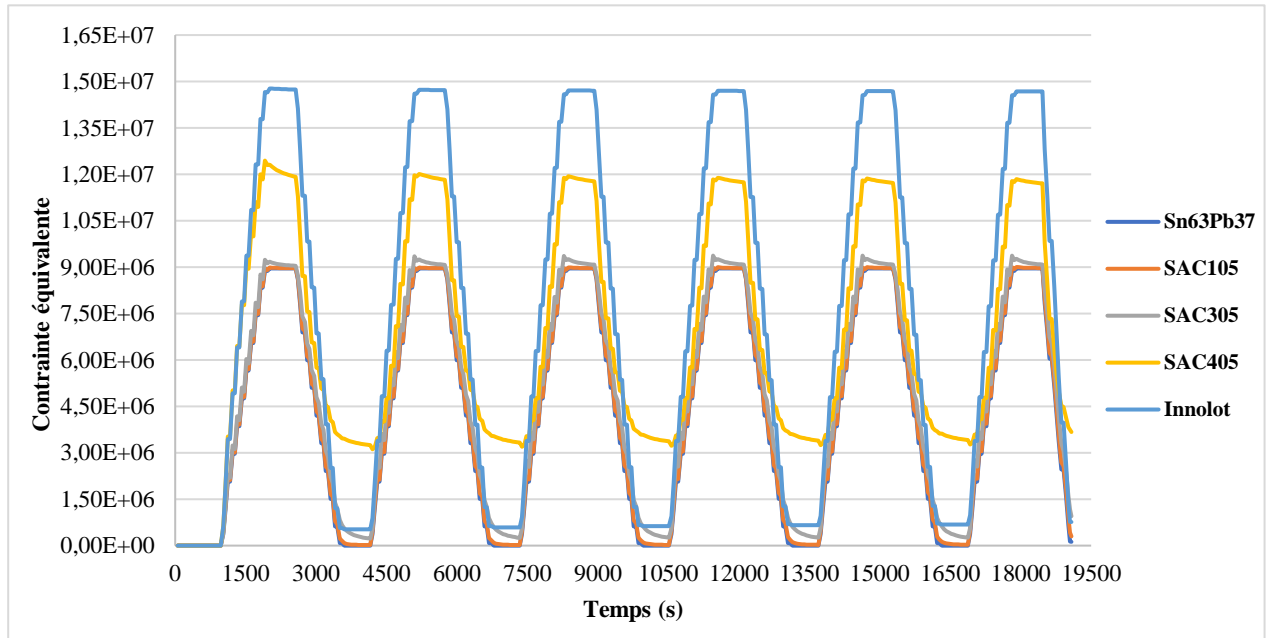


Figure 4.4 Courbes de contraintes équivalentes

4.5.2.2 Étude de la déformation des alliages des joints de soudure

Selon l'article de Halouani et al. [20] et d'autres études telles que celle de Shin et al. [1], il est essentiel de comprendre la répartition de la déformation afin de saisir les différentes contributions mécaniques impliquées dans les contraintes du joint de soudure. La déformation totale $\dot{\varepsilon}$ peut être divisée en trois composantes distinctes : la composante élastique instantanée $\dot{\varepsilon}_e$, la composante plastique indépendante du temps $\dot{\varepsilon}_p$ et la contribution viscoplastique directement liée au temps $\dot{\varepsilon}_{vp}$:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_{vp} \quad (4)$$

Nous pouvons également réécrire cette équation comme l'équation (5) ci-dessous [3]:

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{inél} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{pl} \quad (5)$$

Le résultat de la simulation FEA sur la déformation élastique des alliages de soudure soumis à un cycle thermique est présenté dans la figure 4.5. En ce qui concerne la déformation inélastique, les déformations thermiques et plastiques, les résultats sont décrits dans les figures 4.6 et 4.7. Dans ce travail, nous ne considérons pas de la déformation plastique. Nous

considérerons plutôt la déformation plastique accumulée, plus significative et présentant un critère crucial pour la fiabilité du joint de soudure. Commençons par la déformation élastique qui rassemble la réponse des cinq alliages de soudure. Sur cette base, nous concluons qu'à l'instar des courbes de contrainte, l'InnoLot et le SAC405 présentent la déformation la plus élevée, soit $2,9 \cdot 10^{-4}$ et $2 \cdot 10^{-4}$ (m/m) respectivement. Quant aux SnPb, SAC105 et SAC305, ils atteignent une valeur de déformation comparable de $1,2 \cdot 10^{-4}$ (m/m). Cela est en accord avec le constat que la contrainte et la déformation élastique sont liées de manière linéaire, conformément à la relation établie par la loi de Hooke.

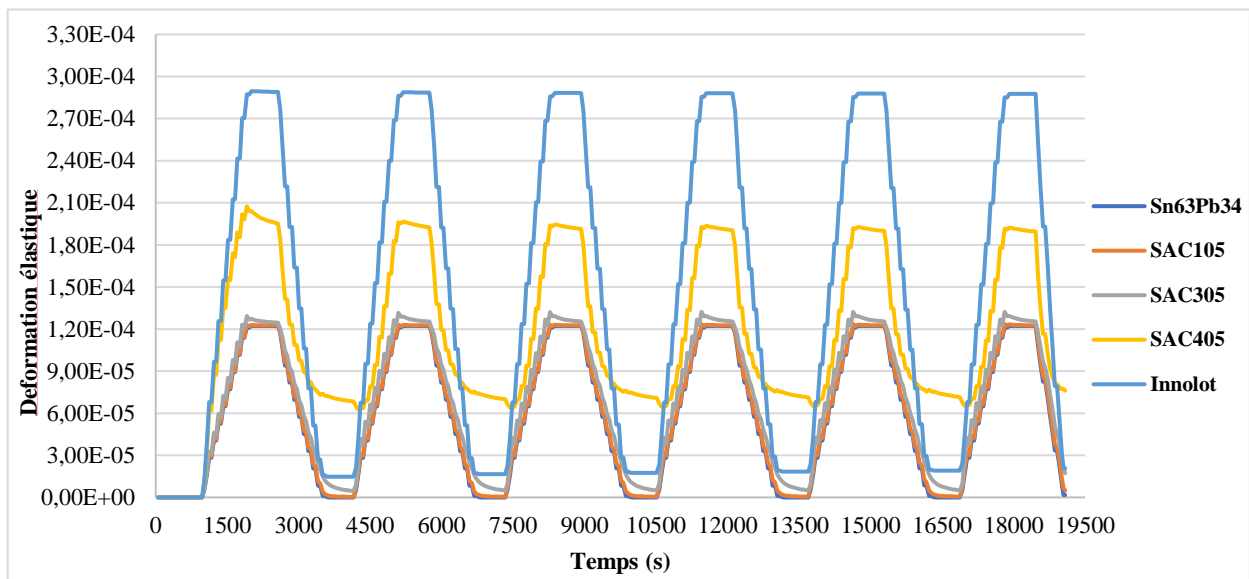


Figure 4.5 Courbes de déformation élastique

Nous passons ensuite aux déformations inélastiques et commençons par la déformation thermique (ε_{th}). La difficulté de concevoir des boîtiers électroniques thermiquement efficaces réside dans l'existence d'une différence de conductivité thermique entre les matériaux qui affecte l'efficacité thermique du boîtier. C'est pourquoi on parle de déformation thermique. Une élévation de la température ΔT entraînera des déformations thermiques qui seront proportionnelles au coefficient de dilatation thermique de chaque matériau, tel que spécifié dans l'équation (6) et (7). La dilatation thermique est quantifiée à l'aide de la formule ci-dessous :

$$\Delta L = L - L_0 = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad (7)$$

Par rapport à la déformation élastique, on constate que l'alliage InnoLot accumule la déformation la plus faible avec une valeur de $1,1 \cdot 10^{-4}$ (m/m) par rapport au SAC405 ($2,1 \cdot 10^{-4}$), puis au SAC105 ($2,2 \cdot 10^{-4}$), au SAC305 ($2,31 \cdot 10^{-4}$) et enfin au SnPb ($2,38 \cdot 10^{-4}$).

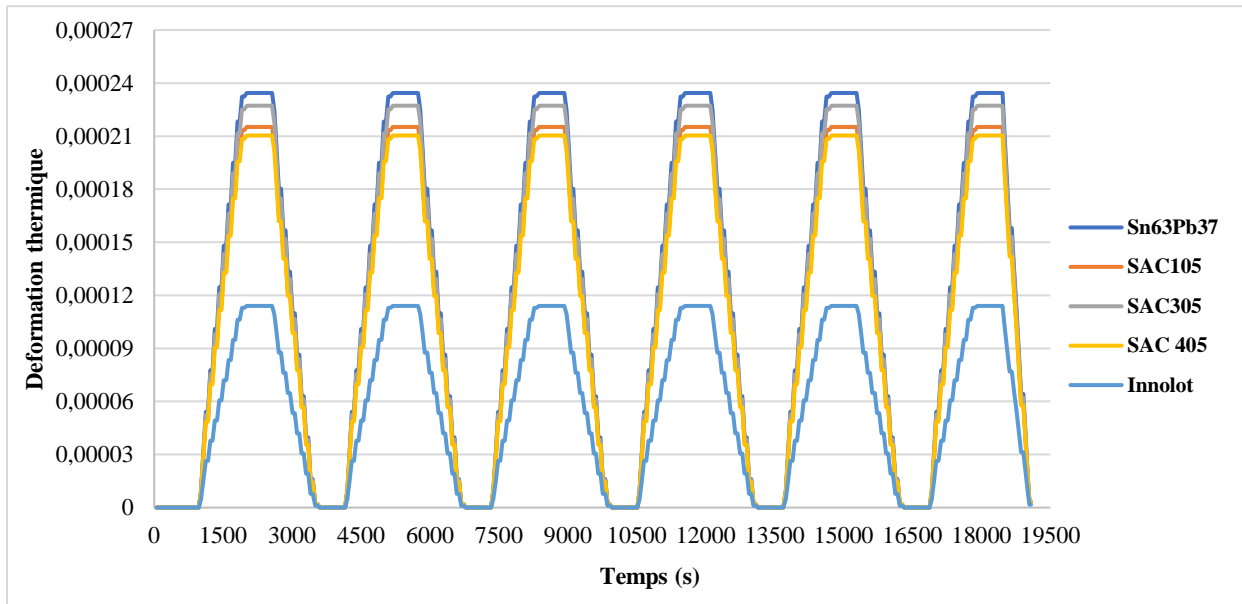


Figure 4.6 Courbes de déformation thermique

Enfin, le paramètre le plus crucial et décisif est l'accumulation de la déformation plastique, comme précédemment expliqué en détail dans le document. Il est important de souligner que la valeur maximale est observée dans le Sn63Pb37, suivi par le SAC105, le SAC305 et enfin le SAC405. Inversement, la valeur la plus faible est observée dans InnoLot. La déformation plastique accumulée peut entraîner des changements structuraux et des contraintes résiduelles dans le matériau, ce qui pourrait affecter la résistance et la durabilité des joints de soudure. À mesure que la déformation plastique s'accumule, les contraintes internes augmentent, ce qui peut potentiellement réduire la résistance du joint et augmenter le risque de défaillance sous l'effet de charges cycliques. En outre, la déformation plastique peut également provoquer des inhomogénéités dans le matériau, ce qui peut entraîner une répartition inégale des contraintes et accélérer la défaillance du joint de soudure. L'accumulation de déformations plastiques peut avoir une incidence significative et négative sur le nombre de cycles jusqu'à la rupture des joints de soudure en modifiant la structure interne du matériau et en augmentant les contraintes internes. En conclusion, InnoLot se distingue comme l'alliage le plus fiable par rapport aux autres dans ce cas.

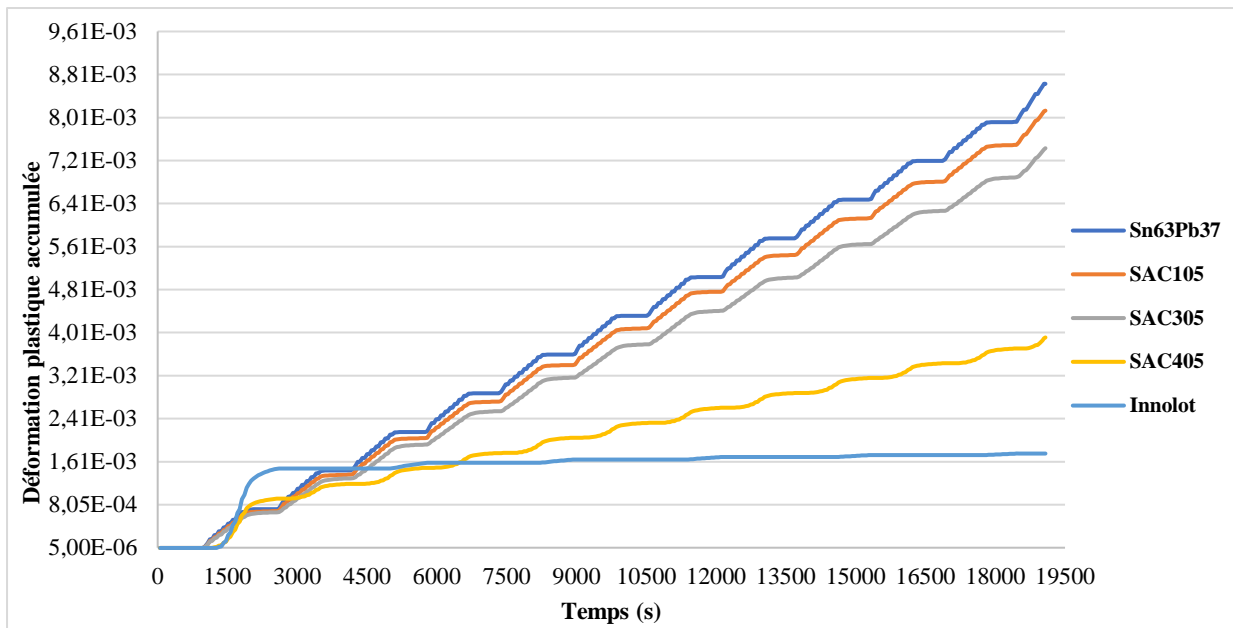


Figure 4.7 Courbes de déformation plastique accumulée

Nos résultats confirment également l'impact de la composition sur la fiabilité des alliages SAC, qui s'alignent sur les conclusions expérimentales de Matthieu Berthou [32], comme l'illustre la figure 4.8 ci-dessous. Les résultats présentés dans cette figure démontrent que l'alliage SAC405 présente une réduction significative de la déformation plastique lors des cycles thermiques. Cette caractéristique réduit considérablement le risque de rupture et prolonge la durée de vie de l'alliage. Ces résultats sont particulièrement significatifs si l'on considère le rôle critique de la résistance à la fatigue thermique dans les applications à haute température, telles que celles que l'on trouve dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'électronique. Les performances exceptionnelles de l'alliage SAC405 peuvent probablement être attribuées à sa composition chimique distincte et à ses propriétés microstructurales, qui lui permettent de résister aux contraintes thermiques et de minimiser l'accumulation de déformation plastique.

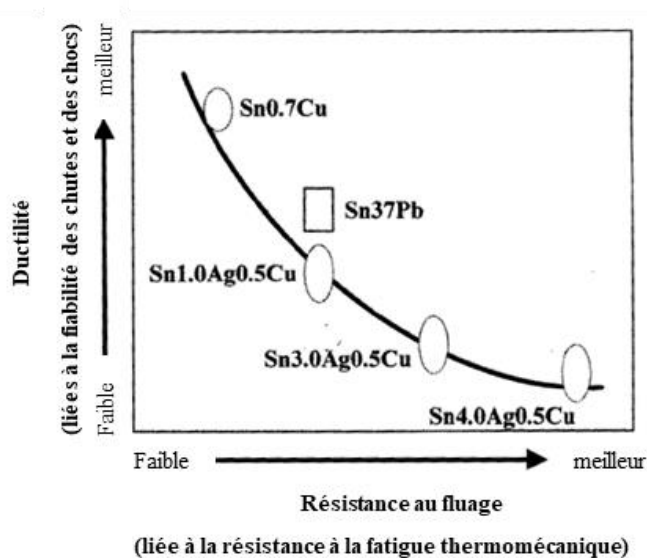


Figure 4.8 Impact de la concentration d'Ag sur les caractéristiques mécaniques et thermomécaniques

Cette déformation thermique et plastique génère des contraintes internes. Plus il y a de contraintes internes, plus il y a de dislocations et donc de dommages prématurés. Afin d'estimer la longévité et la sûreté des brasures, en tenant compte de la variation de composition, il est essentiel de se baser sur les déformations inélastiques, étant donné leur imprévisibilité par rapport aux déformations élastiques. C'est pourquoi notre choix se porte principalement sur les alliages de soudure SAC405. La fiabilité supérieure de ces deux alliages, SAC405 et InnoLot, de soudure est attribuable à leur S_0 qui est la résistance à la déformation initiale et \hat{s} qui est le coefficient de saturation de la résistance à la déformation qui sont les plus élevés parmi les autres alliages. Cela indique que ces alliages présentent une meilleure résistance à la déformation, ce qui contribue à leur fiabilité accrue par rapport aux autres alliages étudiés.

4.5.2.3 Impact de la densité d'énergie de déformation sur les des alliages de soudure

Les résultats de la simulation par éléments finis (FEA) concernant la densité d'énergie de déformation des alliages de soudure sont illustrés dans la figure 4.9. L'énergie de déformation est l'énergie stockée par un système lorsqu'il est chargé dans sa limite élastique. Lorsque la charge est supprimée, le matériau libère son énergie interne. Dans le cas des matériaux présentant une élasticité linéaire, l'énergie de déformation U peut être calculée selon l'expression suivante :

$$U = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \sigma \cdot \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E} \cdot V \quad (8)$$

Comme le montre la figure 4.9, l'énergie de déformation de l'alliage SnPb a la valeur la plus basse sans augmenter jusqu'à sa valeur maximale, contrairement aux alliages SAC105, SAC305 et SAC 405 dont les courbes cycliques augmentent avec le temps. Ceci est dû au comportement viscoplastique important de ces matériaux. Quant à l'alliage InnoLot, il présente une réponse stable comme le SnPb mais plus élevée. La mesure de l'énergie de déformation s'avère pertinente pour établir des comparaisons entre les différentes brasures. Toutefois, elle ne constitue pas un critère déterminant lorsqu'il s'agit de choisir la soudure la plus fiable, car elle ne tient compte que de l'état linéaire des brasures. Notre principal intérêt réside en effet dans l'évaluation de la déformation inélastique.

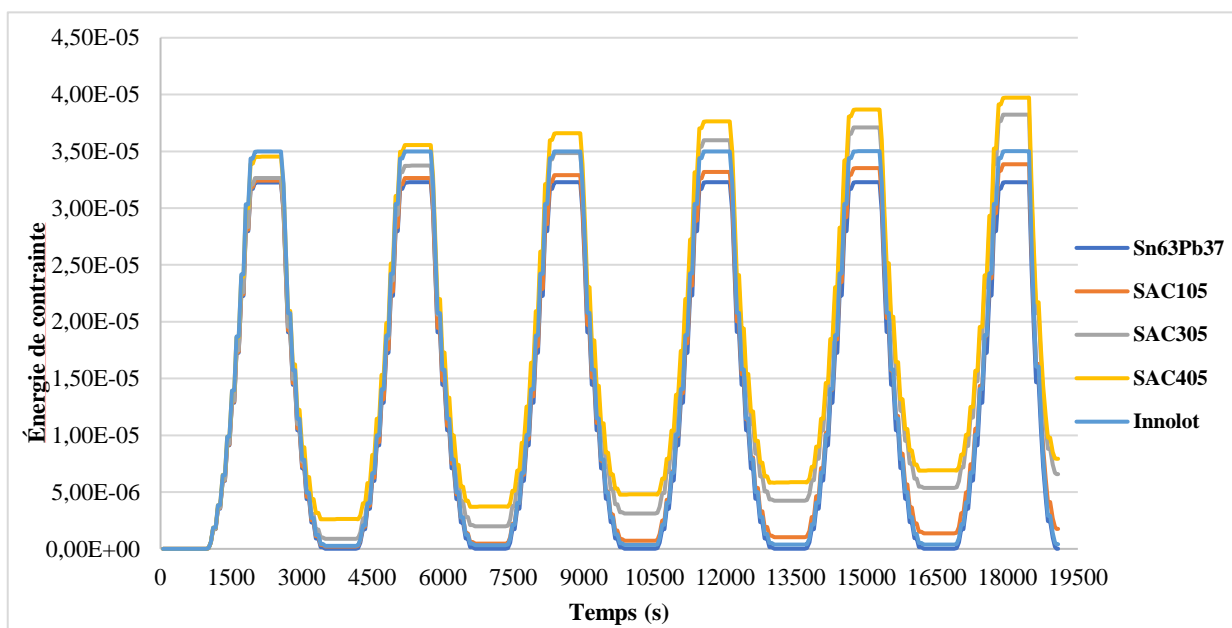


Figure 4.9 Courbes d'énergie de déformation

À l'origine, cette étude a été entreprise en négligeant la présence de la couche d'IMC. Néanmoins, dans la réalité, comme exposé dans le chapitre précédent, une telle couche est effectivement présente et exerce une influence significative sur la fiabilité du joint de soudure. Par conséquent, il est essentiel d'intégrer la couche IMC dans notre étude pour évaluer et analyser avec précision la fiabilité du joint de soudure.

4.5.3 Comparaison des différentes compositions d'alliages de soudure avec IMC

Il est crucial de tenir en compte la couche de composé intermétallique (IMC) dans la simulation numérique de la fiabilité des joints de soudure, car elle peut avoir une influence significative sur la résistance mécanique des joints de soudures. Les IMC se forment lors du soudage et

peuvent renforcer le joint de soudure en formant une liaison solide entre les matériaux de soudage et l'alliage de soudure. Cependant, la formation d'IMC peut également entraîner des défauts de soudage tels que des vides ou des fissures, qui peuvent réduire la résistance mécanique du joint de soudure. Il est donc essentiel d'intégrer la genèse d'IMC lors de la modélisation numérique de la fiabilité des joints de soudure afin d'évaluer la résistance mécanique du joint dans des conditions réelles d'utilisation. Selon les travaux de recherche cités dans la référence [32], l'épaisseur typique de la couche d'IMC est d'environ 2 μm .

4.5.3.1 Étude du cyclage thermique sur la contrainte équivalente des alliages de joints de soudure

Dans cette partie, nous avons pris en considération la présence de la couche IMC pour évaluer l'équivalent de contrainte des cinq alliages de soudure. La Figure 4.10 montre une différence significative de contrainte équivalente entre InnoLot d'un côté et les alliages SAC et SnPb de l'autre, avec une contrainte environ 7 fois plus élevée pour InnoLot. Contrairement aux résultats précédents, l'ordre des contraintes équivalentes change avec l'introduction de l'IMC : InnoLot est suivi par SAC305, puis SAC105, SAC405 et enfin SnPb.

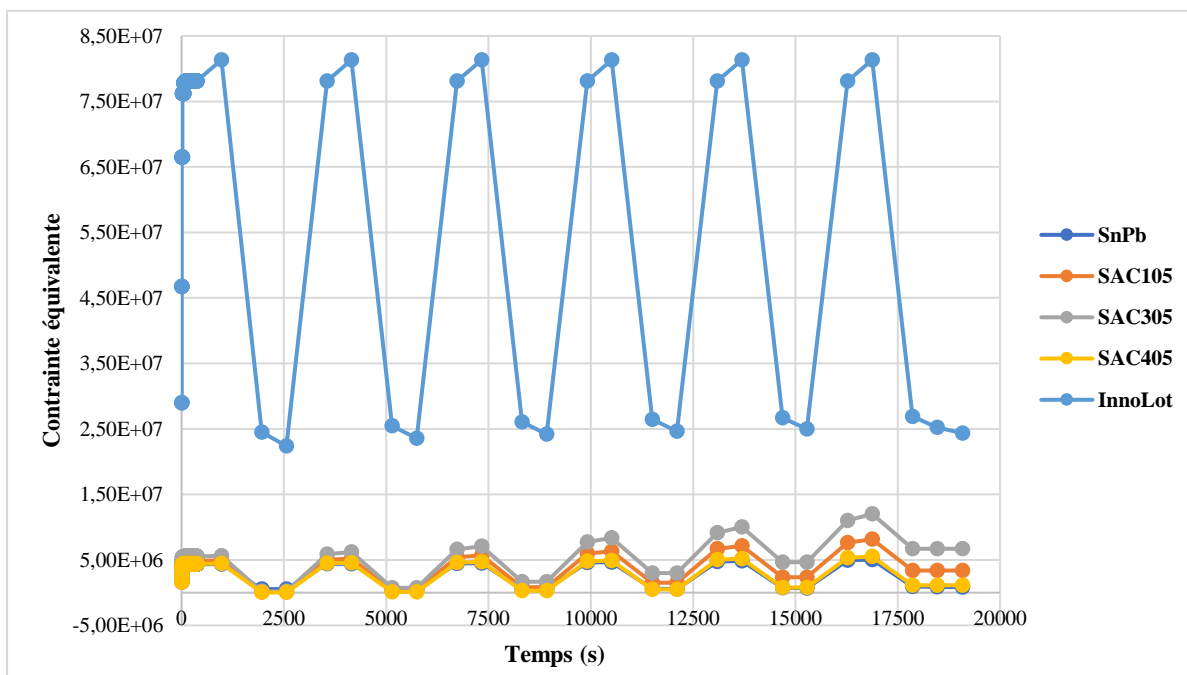


Figure 4.10 Contrainte équivalente

4.5.3.2 Étude du cyclage thermique sur la déformation des alliages de joints de soudure

En ce qui concerne l'évaluation de la déformation inélastique, y compris la déformation thermique et la déformation plastique accumulée, nous observons une tendance cohérente dans les résultats, similaire à celle de la contrainte équivalente. L'alliage InnoLot présente une déformation thermique significativement élevée, comme le montre la figure 4.11, et une déformation plastique accumulée substantielle par rapport aux autres alliages, comme le montre la figure 4.12.

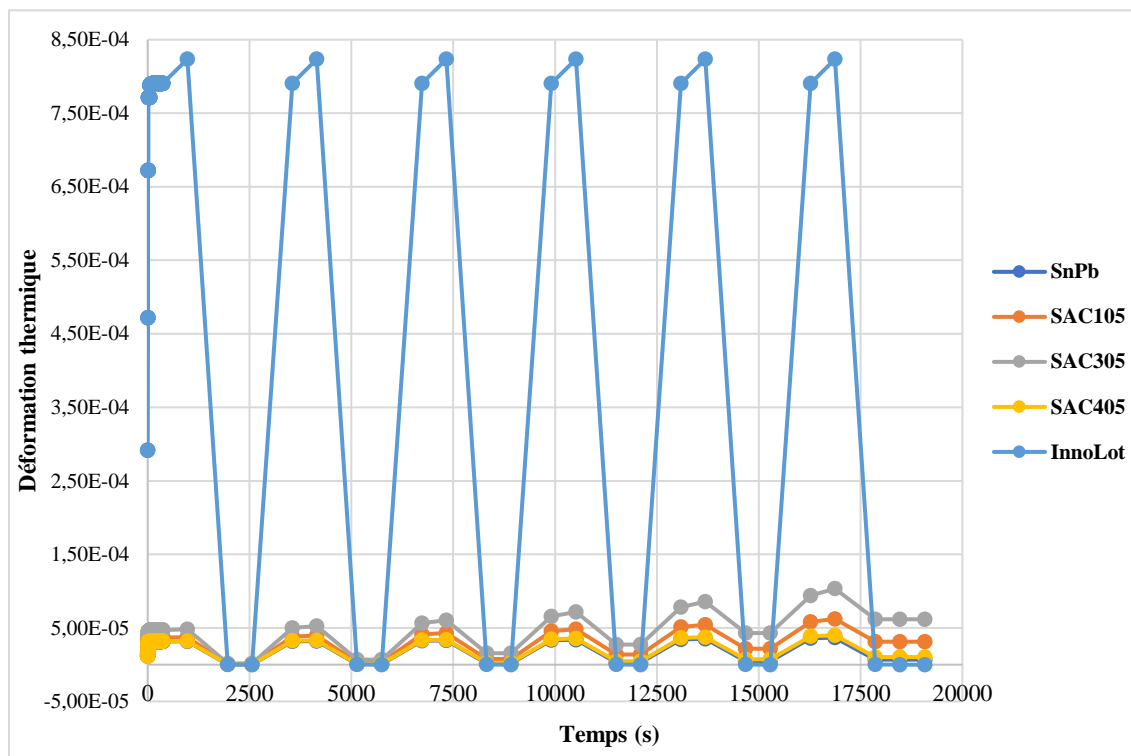


Figure 4.11 Déformation thermique

En termes de déformation plastique, InnoLot est suivi par SnPb, qui présente également une déformation plastique accumulée considérable par rapport aux alliages SAC.

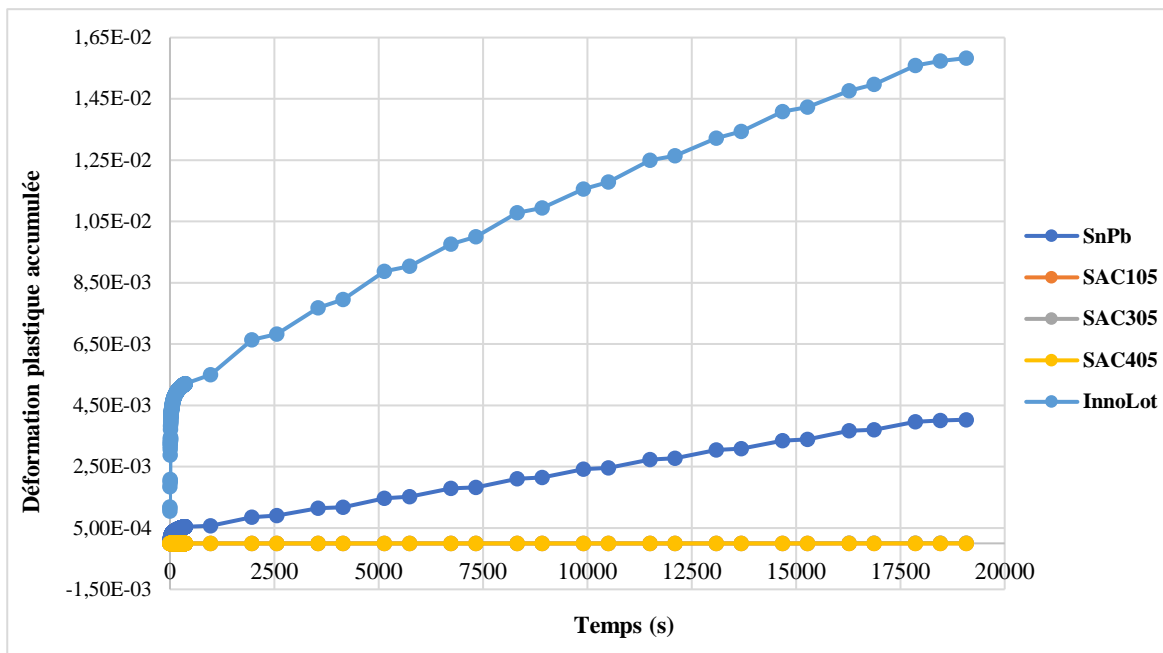


Figure 4.12 Déformation plastique accumulée pour les cinq alliages

Pour mieux comprendre leur comportement et permettre une comparaison plus précise, nous avons effectué une analyse séparée de la déformation plastique accumulée pour les alliages SAC, comme le montre la figure 4.13. Il est évident que l'alliage SAC305 présente la valeur la plus élevée, tandis que l'alliage SAC405 présente la valeur la plus faible.

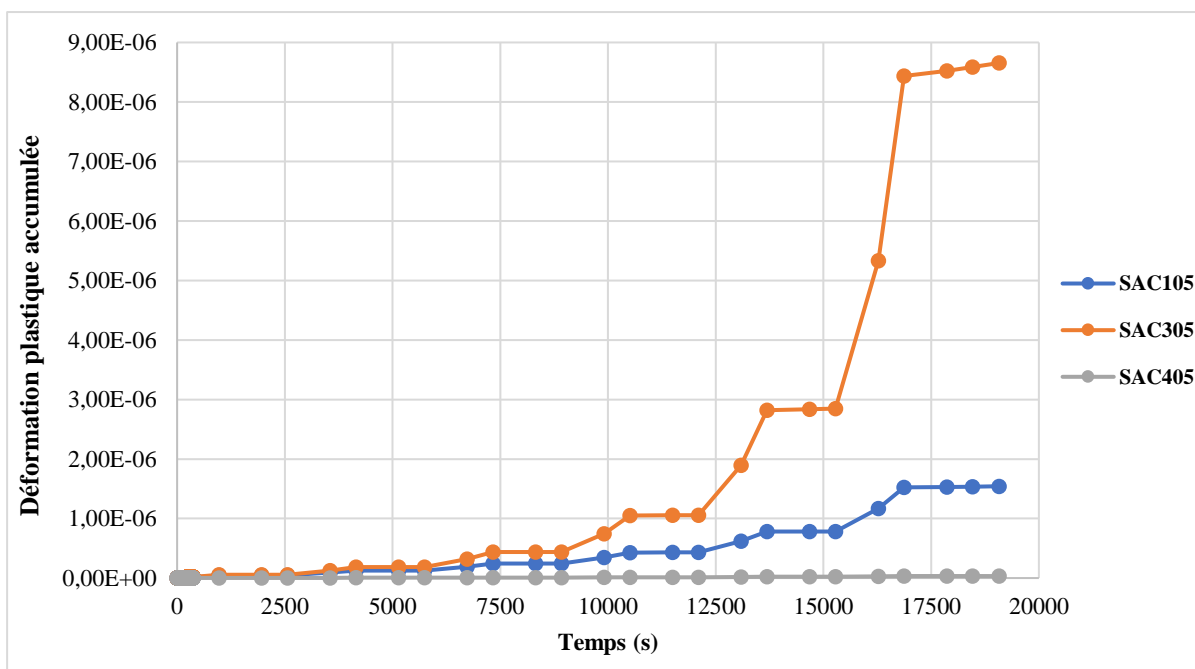


Figure 4.13 Déformation plastique accumulée pour les alliages SAC

En se basant sur les résultats exposés, on peut déduire que le SAC405 démontre la meilleure performance mécanique dans cette analyse de cas, établissant ainsi sa position de l'alliage le plus fiable parmi les cinq étudiés. Un résumé de tous les résultats obtenus dans cette partie sera présenté dans la section suivante sous forme d'un tableau synthétique.

4.5.4 Résumé

Le dessein ultime de cette synthèse est de confronter les résultats obtenus dans cette sous-section, où notre système électronique a été soumis à des charges électrothermiques externes (charges de service), avec les résultats obtenus dans la sous-section initiale, où les simulations de ces cinq alliages ont été effectuées jusqu'à la température de fusion. La synthèse de mes résultats est résumée dans le tableau 4.7 suivant.

Tableau 4.7 Comparaison globale entre les résultats initiaux et les résultats des services

Alliages	Contraintes initiales ($T_0 = T_{\text{fusion}}$)		Chargements de service (Sans IMC)					Chargements de service réels (Avec IMC)		
	Contraintes résiduelles	ϵ_{placc}	Contraintes équivalente	Déformation élastique	Énergie de déformation	Déformation thermique	ϵ_{placc}	Contraintes équivalente	Déformation thermique	ϵ_{placc}
Sn63Pb37	Le plus bas	Le plus bas	Le plus bas	Le plus bas	Le plus bas	Supérieure	Supérieure	Le plus bas	Le plus bas	Élevé
SAC 105	Modéré	Supérieure	Faible	Faible	Faible	Modéré	Élevé	Modéré	Modéré	Faible
SAC 305	Élevé	Élevé	Modéré	Modéré	Élevé	Élevé	Modéré	Élevé	Élevé	Modéré
SAC 405	Supérieure	Modéré	Élevé	Élevé	Supérieure	Faible	Faible	Faible	Faible	Le plus bas
InnoLot	Faible	Faible	Supérieure	Supérieure	Modéré	Le plus bas	Le plus bas	Supérieure	Supérieure	Supérieure

Supérieure : Supérieur

Élevé : Excellent

Modéré : Bon

Faible : Moyen

Le plus bas : Inférieur

Cette confrontation permet de déduire que l'alliage SnPb jouit de privilèges en ce qui concerne la contrainte résiduelle et l'accumulation initiale de déformation plastique. Par conséquent, le SnPb possède initialement une résistance mécanique et une durée de vie supérieures. Cependant, lorsque le composant BGA est soumis à des charges de service, on constate que le SnPb présente la contrainte équivalente, la déformation élastique et l'énergie de déformation les plus faibles. À l'inverse, il présente une déformation thermique et une déformation plastique accumulée plus importantes que l'alliage InnoLot. En ce qui concerne la fiabilité électrothermomécanique, l'alliage InnoLot s'avère être le choix le plus adapté, en excluant la couche IMC. Cependant, si l'on prend en compte la présence de la couche IMC, le joint le plus fiable est le SAC405, comme précédemment expliqué dans le document.

L'alliage Sn63Pb37 de plomb et d'étain eutectique a longtemps été largement utilisé dans les procédés de soudage. Néanmoins, l'un de ses principaux défauts est son incapacité à exploiter de manière efficace à des températures de fonctionnement dépassant 125°C, en raison de son point de fusion d'environ 183°C. En effet, l'intégrité des joints est en relation directe à la concentration des contraintes aux endroits de la soudure. Les systèmes d'alliage de soudure sans plomb offrent des points de fusion plus élevés et permettent d'explorer des températures de fonctionnement supérieures à 125°C.

4.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre visait à contribuer à la recherche existante en étudiant la réponse de différents alliages de soudure, à savoir Sn63Pb37, SAC105, SAC305, SAC405 et le nouvel InnoLot, à des charges électrothermiques. Grâce à une analyse complète, nous avons obtenu des informations précieuses sur les performances de ces alliages de soudure dans des conditions de température active et passive. Notre étude a exploré plusieurs facettes, notamment l'évaluation des alliages de soudure à leur température de fusion d'origine, leur comportement dans des conditions de service en l'absence de considération de l'impact de la couche IMC, ainsi que leur performance dans des conditions de service réalistes en considérant la présence de la couche IMC. Les résultats obtenus mettent en évidence la fiabilité supérieure du SAC405, en particulier lorsqu'on considère la déformation inélastique, qui s'avère être un facteur critique entraînant un endommagement prématuré et une éventuelle défaillance du système complet. Il convient de souligner le rôle joué par différents facteurs dans la fiabilité des joints de soudure, tels que la formation de la couche IMC entre les joints et le substrat, les contraintes résiduelles et les variations de la température de fusion. En comprenant ces facteurs et en prenant des

mesures préventives au cours des phases de design et de production de l'électronique, il devient alors facile de réduire leurs impacts négatifs et d'augmenter de manière significative la durée de vie des joints de soudure. En abordant ces défis dès le départ, il est possible d'éviter des problèmes complexes et coûteux pendant tout le processus de vie de l'appareil. Il est impératif de continuer à investir dans la recherche et le développement de ce secteur afin de renforcer continuellement la fiabilité et les performances des alliages de soudure, contribuant ainsi à l'amélioration globale des systèmes électroniques dans une multitude d'applications.

Chapitre 5

Optimisation fiabiliste des joints de brasure du composant BGA

5.1	INTRODUCTION	124
5.2	OPTIMISATION DES JOINTS DE BRASURES	125
5.2.1	Definition	125
5.2.2	Etat de l’art des méthodes d’optimisation pour le composant BGA.....	126
5.3	DEMARCHE DU TRAVAIL.....	127
5.4	CARACTERISATION DU VOLUME DU JOINT DE SOUDURE	129
5.5	ANALYSE DE FATIGUE DES JOINTS DE BRASURE	131
5.6	PRESENTATION DES METHODES D’OPTIMISATION DE CONCEPTION.....	134
5.6.1	Optimisation de conception déterministe (DDO)	135
5.6.2	Optimisation de conception fiabiliste (RBDO).....	136
5.6.2.1	Approche classique.....	137
5.6.2.2	Méthode hybride (HM).....	138
5.6.2.3	Méthode de Facteur de Sécurité Optimal (OSF)	139
5.6.2.4	Méthode hybride robuste (RHM)	141
5.7	RESULTATS ET DISCUSSIONS	143
5.7.1	Description du problème d’optimisation.....	144
5.7.2	Résultats du DDO et RBDO	145
5.7.2.1	Résultats de l’optimisation déterministe (DDO)	145
5.7.2.2	Résultats de l’optimisation fiabiliste (RBDO).....	151
5.8	CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	154

5.1 Introduction

La fiabilité des appareils électroniques repose en grande partie sur les joints de soudure qui relient les composants électroniques aux cartes de circuits imprimés. Ceci est particulièrement important pour les BGA (Ball Grid Array), qui intègrent plusieurs contacts dans une zone limitée. Une conception fiable des joints de soudure est fondamentale pour garantir des performances et une longévité optimales. Le fait de négliger les conditions de fonctionnement électro-thermomécanique lors de la conception peut entraîner des pannes importantes de différents types [1] – [9]. Ainsi, les fabricants doivent prendre en considération la sélection des matériaux, de la géométrie de conception du composant et de la méthode de fixation pour garantir une fiabilité optimale. De plus, les recherches sur la fiabilité des BGA, telles que [10] - [13], ont porté sur l'optimisation de la modélisation, l'analyse des défauts et les études d'évaluation de la durée de vie, dans le but d'améliorer la résistance, d'augmenter la longévité et de détecter les erreurs de conception. Notre principal objectif est d'optimiser ce composant. Afin d'obtenir des performances optimales d'un composant BGA (Array de billes de soudure), il est essentiel de prendre en compte plusieurs paramètres critiques, tels que la hauteur de l'ensemble, le volume de soudure et le diamètre des billes de soudure. La conception des joints de soudure BGA représente un véritable défi pour les ingénieurs, car leur fiabilité est étroitement liée à de nombreux facteurs, tels que la géométrie et les propriétés des matériaux utilisés. Dans cette optique, nous avons entrepris une analyse approfondie des différentes méthodes d'optimisation décrites dans la littérature scientifique. La taille du composant BGA, la quantité de soudure nécessaire et ses propriétés thermiques et mécaniques sont fortement influencées par le diamètre des billes de soudure. Le choix d'un volume de soudure approprié est fondamental pour garantir des performances optimales, car une quantité insuffisante de soudure peut entraîner des connexions faibles, tandis qu'une quantité excessive peut provoquer des courts-circuits et d'autres problèmes. Des recherches antérieures menées par Sinda et al. [63] a indiqué que la modification du rayon et de la hauteur des composants BGA peut avoir un impact significatif sur leur fiabilité et leur durée de vie. En ce qui concerne notre chapitre, nous proposons une approche innovante pour améliorer la fiabilité et la conception optimale de ces composants. La méthodologie repose sur une modélisation multiphysique complète qui simule avec précision le comportement électro-thermomécanique de la structure BGA dans différentes conditions de fonctionnement. Mieux comprendre son comportement et identifier les paramètres critiques qui influencent ses performances et sa fiabilité sont les objectifs de cette approche. En outre, nous adoptons la méthode d'optimisation de la conception déterministe

(DDO) ainsi que la méthode d'optimisation fiabiliste connu sous le nom de RBDO pour évaluer les variables de conception géométrique du composant. En établissant un couplage entre le modèle d'éléments finis développé par le logiciel Ansys APDL et le modèle d'optimisation de la conception basée sur la fiabilité codée avec le logiciel MATLAB, nous sommes en mesure de spécifier les variables optimales qui peuvent améliorer le niveau d'efficacité de la structure. Notre approche prend également en compte la faisabilité économique de la structure BGA en plus de ses aspects techniques c'est-à-dire les exigences de fiabilité et de coût pour assurer la conception optimale du joint soudé. Notre méthodologie intègre ces critères pour offrir aux concepteurs un moyen de garantir une conception optimale du composant, contrôler les coûts, améliorer la fiabilité et l'efficacité. Ainsi, dans le présent chapitre de thèse, nous adopterons l'approche RBDO pour optimiser la conception des joints de soudure BGA, en tenant compte des paramètres critiques tels que la géométrie et les propriétés des matériaux, afin d'augmenter la fiabilité des appareils électroniques. Nous nous appuyerons sur les travaux antérieurs dans ce domaine pour développer une méthodologie appropriée et obtenir des résultats précis et fiables dans un laps de temps raisonnable.

5.2 Optimisation des joints de brasures

5.2.1 Définition

L'optimisation des joints de soudure vise à rehausser la performance et la fiabilité des assemblages de composants électroniques. Cela implique de prendre en compte plusieurs aspects tels que le choix des matériaux d'apport, les paramètres de soudage et la conception du joint, ainsi que les conditions environnementales auxquelles le dispositif électronique sera exposé en service. Une brasure de qualité est essentielle pour garantir une connexion fiable et durable entre les composants, ainsi qu'une performance électronique optimale du dispositif assemblé pour éviter les défaillances prématurées du dispositif électronique, les problèmes de performance électrique, les dysfonctionnements et les pannes complètes du dispositif. En effet, des joints de brasure défectueux peuvent entraîner des conséquences graves sur la fiabilité et la durabilité des composants électroniques. Afin d'assurer leur fiabilité, il est crucial de mettre en place une approche rigoureuse d'optimisation des joints de brasure. Cette démarche vise à garantir la qualité et la performance des produits électroniques finaux, tout en minimisant les risques de défaillance ou de dysfonctionnement.

5.2.2 Etat de l'art des méthodes d'optimisation pour le composant BGA

À cet égard, Lau et al. [80] ont adopté la méthode Taguchi afin d'optimiser le processus de soudage par refusion et ont démontré que l'optimisation de la conception peut réduire les contraintes thermomécaniques sur les joints de soudure, améliorant ainsi leur fiabilité. Dans cette perspective, il est important de souligner que l'application de la méthode Taguchi ne nécessite que 9 expériences pour trouver les conditions optimales, alors que la méthode RSM nécessite 20 expériences. Selon Uday Kiran et al. [82], l'utilisation de la méthode Taguchi permet de réaliser des économies de temps et d'efforts d'environ 55 %. Dans le même ordre d'idées, les travaux de Jian Zhang et al. [83] ainsi que ceux de Canumalla et al. [84] ont exploité la méthodologie de la surface de réponse (RSM) en vue de résoudre des difficultés de fiabilité et de conception robuste dans le domaine de l'emballage avancé. De plus, Hadim et al. [85] ont utilisé un algorithme génétique afin d'optimiser plusieurs paramètres de conception. Ces travaux mettent en évidence l'importance de l'optimisation de la fiabilité électro-thermomécanique des composants BGA, et montrent l'utilisation de diverses méthodes pour réduire les contraintes thermomécaniques et améliorer la fiabilité. Cependant, il est important de noter que chaque technique présente ses propres limites qui nécessitent une évaluation minutieuse pour déterminer leur applicabilité aux spécifications de notre problème. La méthode Taguchi suppose que les facteurs de conception sont indépendants les uns des autres, ce qui peut ne pas être le cas dans des systèmes complexes tels que les joints de soudure des composants BGA. En ce qui concerne les limitations de la méthode de la surface de réponse, il convient de souligner qu'elle ne fournit qu'un aperçu limité du système, car elle se concentre uniquement sur les paramètres optimaux des facteurs de conception, sans offrir une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents qui déterminent la réponse. En ce qui concerne les algorithmes génétiques, ils peuvent être coûteux en termes de calcul, en particulier lorsqu'ils traitent de grandes populations ou des paysages de fitness complexes. Cela peut limiter leur utilité dans notre application. De plus, le coût de fabrication est un facteur crucial qui affecte à la fois les industriels et les chercheurs. Pour parvenir à une conception optimale bien équilibrée, de multiples critères tels que la fiabilité, la durabilité, la faisabilité et la rentabilité doivent être pris en compte. Ainsi, l'objectif principal de la sélection d'une technique d'optimisation appropriée est d'atteindre l'optimalité en termes d'efficacité économique et d'amélioration des résultats. Dans cette optique, nous avons mené une étude visant à examiner l'utilisation de la méthode RBDO (Reliability-Based Design Optimisation) à des fins d'optimisation. Notamment, la RBDO s'est avérée satisfaire l'équilibre cible et prendre en

compte les conditions de fonctionnement, ce qui renforce l'adéquation de cette approche. En outre, l'assurance de la fiabilité constitue un élément essentiel qui doit être pris en considération dans les algorithmes de conception basée sur la fiabilité (RBDO). Comme référence, nous citons l'étude d'Amar et al. [7] qui ont mené des recherches sur un sujet intrigant lié à l'optimisation des performances et à la garantie de la fiabilité de la technologie HEMT en utilisant la méthode RBDO afin d'obtenir des valeurs optimales des variables de conception. Cela permet d'optimiser le comportement multiphysique de la structure et le seuil de fiabilité. En outre, Dammak et al. [86] ont exploré l'optimisation d'un système acoustique-structurel couplé avec RBDO pour constater ultimement que l'approche RHM était la plus efficace pour leur système. En outre, Debich et al [87] ont introduit une nouvelle méthodologie pour parvenir à une conception optimale d'un système de refroidissement à base de PCM pour les puits de chaleur, qui aborde de manière innovante les matériaux non linéaires, allant au-delà des limitations précédentes aux matériaux linéaires. De manière similaire, Abid et al [88], [89] se sont concentrés sur le développement de méthodes de conception basées sur la fiabilité pour les matériaux non linéaires, tels que les alliages à mémoire de forme qui offrent des avantages significatifs en termes de performance et de coût, permettant ainsi d'améliorer les performances des composants tout en réduisant les dépenses. Par ailleurs, Kamel et al. [90], [91] ont relevé le défi de la conception d'une éolienne offshore, en investissant dans l'approche RBDO pour réduire les dépenses tout en atteignant les niveaux de performance souhaités. Ils ont également créé la méthode hybride modifiée (MHM) comme extension de cette approche. Enfin, une étude réalisée par Bendaou et al. [60] a mis au point un modèle de krigeage associé à une optimisation de la conception basée sur la fiabilité afin de concevoir une structure BGA améliorée. Cette approche a permis d'obtenir des résultats précis dans un délai plus court, tout en renforçant la confiance dans la conception finale. L'approche RBDO a été mise en œuvre dans divers domaines et applications, fournissant des solutions optimales et fiables. C'est pourquoi nous opterons pour cette approche dans le présent travail de recherche.

5.3 Démarche du travail

Notre travail de recherche se concentre sur l'optimisation de la géométrie des joints de manière à améliorer leur fiabilité, en prenant en compte les conditions de service réelles auxquelles ils seront soumis. L'objectif principal est de garantir un niveau élevé de fiabilité tout au long de la durée de vie du dispositif, en respectant les critères fixés par le concepteur. C'est dans ce cadre que cette étude a été élaborée en utilisant les algorithmes d'optimisation de la conception basés

sur la fiabilité afin d'obtenir des variables de conception optimales ainsi qu'un indice de fiabilité ciblé. Ces boucles sont programmées pour minimiser une fonction objective, qui correspond, dans notre cas, au volume du joint de soudure, et donc à la quantité de matériau utilisée. La méthode proposée est présentée dans un organigramme illustré à la figure 5.1. La première étape consiste à déterminer la géométrie initiale du composant BGA, notamment le rayon initial et la hauteur initiale. Pour ce faire, nous nous appuyons sur une fiche technique provenant de l'industrie de la technologie Infineon [42]. Cette fiche technique fournit des informations précieuses sur les dimensions recommandées pour la conception initiale du composant BGA. Dans un deuxième temps, des simulations sur le logiciel Ansys APDL ont été réalisées pour obtenir la déformation plastique cumulative ε_p des joints de soudure. Sa distribution, décrite précédemment dans la thèse, nous permet de découvrir les zones de concentration des contraintes et des déformations et, par la suite, d'identifier l'amorce de la défaillance. Cette vue d'ensemble est fondamentale pour l'étude actuelle.

Les variables de conception, le rayon et la hauteur, sont considérées comme les principales données d'entrée de l'algorithme d'optimisation, avec la déformation plastique cumulée. Cette étape a été réalisée par une boucle d'interopérabilité entre le logiciel Ansys et MATLAB.

Certaines conditions doivent être remplies, à savoir :

- a. Les variables de conception (rayon et hauteur) se situent entre les limites supérieures et inférieures définies par la littérature [42] [20], [28] – [31] comme indiqué dans le tableau 5.5.
- b. L'accumulation de la déformation plastique déterminée par la modélisation numérique reste en dessous de la limite maximale autorisée pour la déformation plastique.
- c. Il convient de minimiser le volume autant que raisonnablement réalisable.
- d. L'indice de fiabilité cible est fixé à $\beta_t = 3$, correspondant à une probabilité de dysfonctionnement presque égale à 10^{-3} . L'indice de fiabilité β doit être supérieur à 3, comme indiqué dans des travaux antérieurs [42], [44] – [49].

Si les lectures sont optimales et fiables, nous parvenons à obtenir les résultats souhaités. Dans le cas contraire, nous modifions les paramètres géométriques jusqu'à ce que nous satisfassions à toutes les conditions spécifiées ci-dessus.

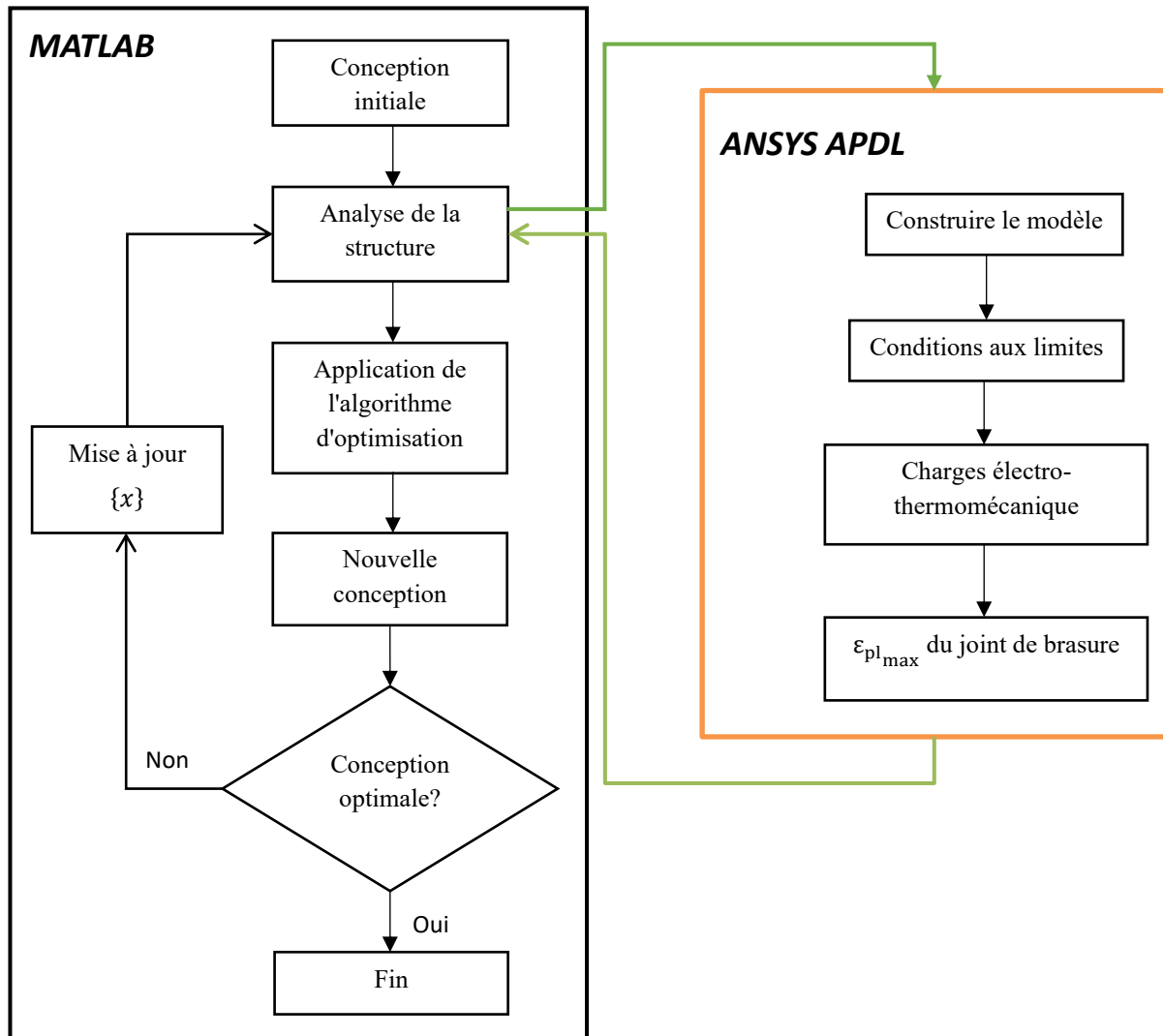


Figure 5.1 Organigramme d'étude d'optimisation

5.4 Caractérisation du volume du joint de soudure

Dans la littérature, les chercheurs ont utilisé la forme d'une sphère aplatie pour le joint de soudure dans leurs modèles sans toutefois mettre l'accent sur cette forme particulière. Cette forme est un sphéroïde, ellipsoïde aplati de révolution comme le montre la figure 5.2 (a). Son volume a l'expression suivante :

$$V = \frac{2}{3} \pi * a^2 * b \quad (1)$$

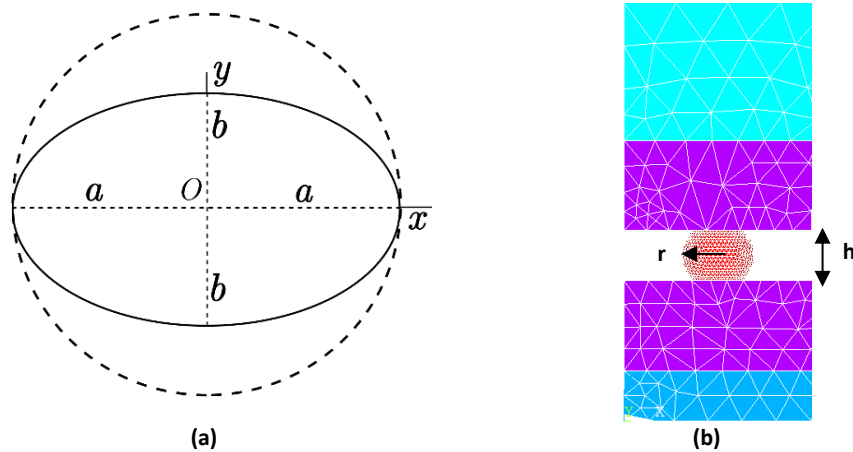


Figure 5.2 (a) Ellipsoïde de révolution aplati (b) Présentation des variables géométriques

Pour notre cas d'étude, nous admettons que $a = r$ (rayon) et $2b = h$ (hauteur). L'expression du volume devient alors la suivante :

$$V = \frac{1}{3} \pi * r^2 * h \quad (2)$$

Nous remarquons que cette expression dépend du rayon du joint et de sa hauteur. Cela renforce encore l'importance de ces paramètres en termes de fiabilité du composant BGA. En d'autres termes, une valeur optimale de ces variables donne lieu à un volume optimal et donc à un fonctionnement optimal. Ces paramètres sont illustrés à la figure 5.2 (b).

Les composants électroniques en service subissent des processus de dégradation et de vieillissement, qui peuvent être dus à des facteurs fonctionnels liés aux conditions de fonctionnement ou à des facteurs environnementaux liés à l'environnement dans lequel le composant est utilisé, ainsi qu'à des facteurs électriques et autres. Un équipement électronique peut connaître une défaillance à tout moment de son fonctionnement. Les mécanismes de fatigue impliquent une dégradation progressive et répétée au fil du temps, ce qui finit par entraîner une défaillance du système. Les contraintes thermiques résultant de l'environnement extérieur ou de l'échauffement des composants par effet Joule provoquent des différences de dilatation entre les différents composants et assemblages, ce qui engendre des déformations et des contraintes mécaniques. Ces déformations mécaniques peuvent être irréversibles et permanentes au cours des cycles thermiques en raison du comportement viscoplastique des matériaux utilisés. L'accumulation de ces déformations peut conduire à des microfissures et à la fatigue du matériau [12]. C'est pourquoi la déformation plastique accumulée est le facteur le plus pertinent à étudier. Comme précisé, le volume de la sphère est considéré comme un sphéroïde (ellipse aplatie). L'expression de ce volume dépend largement du rayon "r" et de la

hauteur "h" du joint. Cependant, il convient de valider que la réponse mécanique du composant BGA est influencée par sa variation. C'est dans ce cadre qu'une étude de sensibilité est entreprise. Elle repose sur un critère de comparaison pertinent et essentiel pour évaluer la fiabilité des joints de brasage, qui correspond à la durée de vie en termes de cycles N_f avant la rupture, obtenu à partir d'une analyse de fatigue électro-thermomécanique. Une fois que les variables sont justifiées, il est nécessaire de déterminer leurs valeurs optimales. Des informations plus détaillées seront présentées dans les sections suivantes.

5.5 Analyse de fatigue des joints de brasure

Il est reconnu que la fiabilité des assemblages électroniques dépend principalement de la solidité des interconnexions. La fiabilité de notre joint de soudure est spécifiée par sa capacité à se conformer aux charges électro-thermomécanique sur une période de temps définie. La conception des BGA implique l'utilisation de matériaux différents, ce qui entraîne une variation significative des coefficients de dilatation thermique au sein de l'assemblage. Cette différence de dilatation thermique peut engendrer des contraintes thermiques et provoquer une fatigue thermique. Afin d'évaluer la durée de vie en fatigue thermique des joints de soudure, des essais thermiques accélérés sont effectués en suivant des profils de cyclage thermique spécifiés par les normes industrielles, telles que celles établies par le JEDEC. Les contraintes thermiques mécaniques sont générées par l'environnement dans lequel les puces semi-conductrices fonctionnent et par l'auto-échauffement. La fatigue étant un phénomène progressif, il est difficile de le détecter avant une défaillance soudaine. Une étude visant à prédire le bon fonctionnement de la durée de vie des joints de soudure est menée dans le présent chapitre. Leur défaillance se produit lorsque les dommages s'accumulent. En conséquence, le contact devient moins fiable. Par conséquent, moins de contact signifie qu'il n'y a pas de signaux ou de lacunes, et donc des fissures. Dans la revue de littérature, plusieurs références [42], [46], [50] - [66] ont abordé le développement de modèles de fatigue spécifiques pour prédire la durée de vie des alliages. Ces modèles ont été élaborés dans le but de mieux comprendre les mécanismes de fatigue et de fournir des prédictions fiables de la durabilité des alliages dans des conditions de service spécifiques. Ces modèles peuvent être regroupés en cinq approches principales, chacune se concentrant sur un mécanisme spécifique considéré comme la principale cause de défaillance des alliages : l'approche basé sur la déformation plastique, l'approche basé sur la contrainte, l'approche basé sur l'énergie, l'approche basé sur le fluage et l'approche basé sur les dommages. Dans le domaine de la fiabilité électronique, les modèles basés sur la loi de puissance sont

fréquemment utilisés en raison de leur simplicité d'identification et d'application. Ces modèles établissent une corrélation entre le niveau de charge cyclique appliqué et le nombre de cycles nécessaires jusqu'à l'apparition de la défaillance. Dans notre étude, nous nous concentrons spécifiquement sur le modèle de Coffin-Manson, qui est largement utilisé pour la prédiction de longévité en fatigue.

En fonction de l'ampleur de la déformation plastique $\Delta\varepsilon$, la méthode consiste à représenter le nombre total de cycles jusqu'à la rupture, N_f , à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta\varepsilon_p \cdot N_f^\gamma = \theta \quad (3)$$

Le coefficient de ductilité à la fatigue, θ , et l'exposant de ductilité à la fatigue γ sont déterminés expérimentalement et sont liés à l'alliage de soudure, comme indiqué dans le tableau 5.2 ci-dessous.

Tableau 5.1 Caractéristiques relatives à la fatigue de l'alliage SAC305 [12]

	γ	θ
SAC305	0.73	3.7

Il est important que nos résultats soient dérivés d'une étude réelle plutôt que d'une étude théorique et numérique. Dans cette optique, nous avons opté pour l'introduction du facteur d'accélération, dont le rôle est de faciliter cette transition souhaitée et ainsi d'assurer la composition finale de l'alliage. L'expression associée à la loi de Norriz-Landzberg nous permet de calculer le facteur d'accélération, qui joue un rôle essentiel dans la prédiction du nombre de cycles réels jusqu'à la rupture pour le composant BGA étudié. Voici la formule correspondante :

$$AF = \frac{N_f}{N_r} = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_r} \right)^m \quad (4)$$

Comme notre intervalle de température de simulation est de $-40^\circ\text{C} / +125^\circ\text{C}$ et selon les résultats publiés par THALES en collaboration avec IAM [13], la carte assemblée verra principalement $-40^\circ\text{C}/+80^\circ\text{C}$ en fonctionnement. Voici les résultats exposés dans le tableau 4 ci-après :

Tableau 5.2 Calcul du facteur d'accélération

SAC305	
m	1.9
ΔT_f	165°C
ΔT_r	120°C
AF	1.831

Les résultats dérivés de la simulation numérique du composant BGA soumis aux charges électro-thermomécaniques dans le logiciel ANSYS APDL seront combinés avec MATLAB, analysés et débattus dans la section suivante.

D'après les simulations ANSYS APDL des trois cas présentés dans le tableau 5.3, il semble que lorsque le rayon et la hauteur augmentent, la déformation plastique diminue et le nombre de cycles jusqu'à la défaillance s'accroît, ce qui entraîne une augmentation de la durée de vie effective réelle. En conclusion, plus les intervalles de température augmentent (vers le haut et vers le bas), plus les diamètres et les hauteurs doivent être élevés afin d'obtenir un fonctionnement optimal et d'éviter les dommages humains et matériels. Cette constatation est en accord avec les résultats expérimentaux de l'étude menée par W.K. Le et al. [62], qui ont confirmé que les joints de soudure de dimensions plus importantes exhibent une fiabilité supérieure par rapport aux joints de dimensions réduites.

Tableau 5.3 Résultats d'une analyse de sensibilité numérique

	$\Delta \epsilon_p$	N_c (Cycles)	N_r (Cycles)
R = 0.15	0.00873	3976	2173
H = 0.2			
R = 0.175	0.008	4480	2449
H = 0.24			

R = 0.23	0.006	6643	3630
H = 0.36			

Cette analyse nous conduit à la conclusion que les variations du rayon et de la hauteur ont un impact sur la réponse mécanique du système. Ainsi, les paramètres géométriques de conception du composant BGA jouent un rôle crucial dans son comportement. En se basant sur cette constatation, nous sommes prêts à implémenter un algorithme d'optimisation.

5.6 Présentation des méthodes d'optimisation de conception

Dans le but d'accroître les rendements et minimiser l'encombrement des dispositifs électroniques, diverses approches d'optimisation géométrique peuvent être appliquées. Ces méthodes visent à maximiser les performances tout en minimisant les dimensions des composants électroniques. Parmi les stratégies couramment employées, on retrouve l'optimisation des matériaux, l'optimisation de la forme, l'optimisation de la disposition, l'optimisation de l'emplacement et l'optimisation de la taille. L'optimisation de la forme consiste à modifier la forme du composant pour améliorer ses performances, tandis que l'optimisation de l'emplacement consiste à modifier sa position pour obtenir des lectures plus précises. L'optimisation de l'agencement des composants consiste à les disposer de manière à minimiser les interférences électromagnétiques. L'optimisation de la taille réduit la taille des composants tout en maintenant les performances et l'optimisation des matériaux implique l'utilisation de matériaux à haute performance, tels que ceux ayant une conductivité thermique plus élevée, dans le dessein d'optimiser la dissipation de la chaleur. Ces méthodes peuvent être utilisées indépendamment ou en combinaison afin d'optimiser les performances et la taille des composants électroniques. Dans la suite de notre travail, nous nous focalisons principalement sur l'amélioration de la conception, communément appelée optimisation dimensionnelle. Son but principal consiste à atteindre l'équilibre optimal entre la diminution des dépenses et l'accroissement des performances. À partir d'une conception initiale définie par des variables de conception, cette optimisation vise à générer itérativement la conception optimale qui répond aux critères de performance. Le processus d'optimisation de la conception est considéré comme la recherche, dans la phase de conception, de paramètres qui non seulement minimisent une fonction objective, mais satisfont également les contraintes de performance mécanique, physique et géométrique.

Les chercheurs utilisent diverses fonctions objectives pour optimiser les joints de soudure BGA en fonction de l'aspect spécifique de la fiabilité qu'ils cherchent à améliorer. Les objectifs peuvent consister à minimiser les contraintes thermiques, de cisaillement ou résiduelles, à maximiser la résistance à la fatigue ou à la traction, et à minimiser les variations des contraintes de soudure, leur sélection et leur combinaison dépendant des priorités du projet de recherche. Notre étude, quant à elle, vise à optimiser le volume du joint de soudure en tant que fonction objective principale.

5.6.1 Optimisation de conception déterministe (DDO)

L'équation (5) ci-dessous représente la formulation de l'optimisation de la conception, qui a comme objectif la minimisation de la fonction objectif $f(x)$ tout en respectant les contraintes d'inégalité $g_k(x)$. Les variables de décision, qui correspondent aux variables de conception, sont symbolisées par le vecteur x .

$$\begin{aligned} \min_x \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, K \end{aligned} \tag{5}$$

Pour implémenter cette méthode, nous avons employé MATLAB, une plateforme de programmation et de calcul scientifique largement utilisé pour les applications techniques et scientifiques en raison de ses puissantes capacités. L'objectif de la méthode d'optimisation déterministe de la conception (DDO) consiste à minimiser le volume du joint de brasure tout en garantissant sa fiabilité c'est-à-dire en limitant la déformation plastique accumulée responsable de la défaillance à un seuil maximal. Pour tenir compte des incertitudes, un facteur de sécurité a été incorporé à la déformation plastique du joint de soudure. La valeur de ce facteur a été déterminée et fondée sur l'expertise de l'ingénieur. Quant à la présente enquête, le facteur de sécurité a été fixé à 1,5, une valeur couramment utilisée dans les industries commerciales et recommandée par la "boîte à outils d'ingénierie", comme indiqué dans la référence suivante [93] et présenté dans le tableau 5.4 ci-dessous.

L'approche de l'optimisation de la conception basée sur la fiabilité (RBDO) est une alternative prometteuse à l'approche DDO. Contrairement à cette dernière, la RBDO tient compte des incertitudes liées aux variables d'entrée et aux modèles mathématiques, ce qui permet d'obtenir des conceptions à la fois optimales et hautement fiables. Cette approche surmonte ainsi le principal inconvénient de la DDO, qui ne peut garantir le niveau de fiabilité souhaité. Des travaux antérieurs [20] – [22], [24] ont souligné cette limitation et ont mis en évidence les avantages de l'approche RBDO.

Tableau 5.4 Facteurs de sécurité pour différents équipements

Équipements	Facteurs de sécurité
Composants de l'avion	1.5 – 2.5
Chaudières	3.5 – 6
Boulons	8.5
Roues en fonte	20
Composants du moteur	6 – 8
Arbre à usage intensif	10 – 12
Équipement de levage - crochets	8 – 9
Récipients sous pression	3.5 – 6
Composants de la turbine - statique -	6 – 8
Composants de turbines – rotatives -	2 – 3
Ressort, grand pour service intensif	4.5
Structures métalliques dans les bâtiments	4 – 6
Structures métalliques des ponts	5 – 7
Câbles métalliques	8 – 9

5.6.2 Optimisation de conception fiabiliste (RBDO)

L'approche RBDO vise principalement à trouver un compromis optimal entre les impératifs de sécurité et de rentabilité. Elle est basée sur la résolution d'un problème d'optimisation qui intègre à la fois des contraintes déterministes et aléatoires [94]. Dans la recherche scientifique, on recense plusieurs exemples de réussites dans l'application de l'approche RBDO, comme en témoignent les travaux présentés dans [95], [96]. La formulation générale du cadre RBDO est la suivante :

$$\begin{aligned}
 & \min_x f(x) \\
 & \text{s.t. } P_r[G_i(x, y) \leq 0] \leq P_i^t, i=1, \dots, n \\
 & \quad h_j(x) \leq 0, j = n+1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{6}$$

Dans l'équation, le vecteur des variables de conception déterministes est désigné par x tandis que le vecteur y représente des variables aléatoires, l'opérateur de probabilité est représenté par $P_T[\cdot]$, P_i^t correspond à la probabilité de défaillance cible, $G_i(x, y)$ exprime les fonctions d'état limite. Afin de maintenir la solution dans un domaine réalisable, les variables de décision sont soumises à des contraintes définies par les bornes inférieure (x_L) et supérieure (x_U).

5.6.2.1 Approche classique

La formulation classique de l'optimisation fiabiliste comprend deux problèmes distincts : l'analyse de la fiabilité et le problème d'optimisation. Dans cette approche, les variables de conception sont définies dans l'espace physique, tandis que les variables aléatoires sont définies dans l'espace normalisé.

▷ *Formulation d'optimisation:*

Le défi consiste à réduire au maximum une fonction objectif $f(x)$ tout en respectant des contraintes déterministes $g_k(x)$ et en répondant aux critères de fiabilité requis. La formulation de ce problème peut être exprimée de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \min_x \quad & f(x) \\ \text{S.C} \quad & g_k(x) \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \\ & \beta(x, u) \geq \beta_t \end{aligned} \quad (7)$$

Le niveau de fiabilité de la structure est désigné par $\beta(x, u)$ dans l'espace normalisé, où le module vectoriel est représenté par u . L'indice de fiabilité souhaité est défini comme β_t .

▷ *Formulation de fiabilité:*

Afin de calculer l'indice de confiance, qui mesure la distance la plus réduite entre l'origine et la fonction de seuil d'état $H(x, u)$ dans l'espace normalisé, il est nécessaire de résoudre le problème de minimisation suivant :

$$\begin{aligned} \min_u \quad & d(u) = \sqrt{\sum u_i^2} \\ \text{S.C} \quad & H(x, u) \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Cependant, en raison du grand nombre de calculs numériques requis dans les deux espaces, l'approche conventionnelle présente une limitation en termes de temps de calcul. Pour surmonter cette limitation, une approche efficace connue sous le nom de méthode hybride a été développée afin de réduire considérablement le temps de calcul nécessaire.

5.6.2.2 Méthode hybride (HM)

La recherche d'une formulation alternative de la fonction objective constitue le principe fondamental de cette approche. Cette nouvelle fonction objective, $F(x, y)$, est optimisée tout en respectant les contraintes déterministes, $g(x)$, la contrainte de fiabilité et la fonction de performance, $G(x, y)$. La variable $d_\beta(x, y)$ symbolise la distance qui sépare la solution optimale et le point de conception. Dans un espace de conception hybride (HDS), on minimise la fonction objective qui comprend à la fois les paramètres déterministes, x , et les paramètres aléatoires, y . La formulation mathématique de la méthode peut être exprimée en termes de :

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x, y) = f(x) * d_\beta(x, y) \\ \text{s.t.} \quad & G(x, y) \leq 0 \\ & g_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, K \\ & d_\beta(x, y) \geq \beta_t \end{aligned} \quad (9)$$

La formule décrit la conversion de l'espace physique (espace x) à l'espace normalisé (espace u) pour une variable aléatoire y_i avec un écart type σ_i , en supposant une distribution normale définie dans l'Eq. (10) :

$$u_i = \frac{y_i - x_i}{\sigma_i}, i = 1, \dots, n \quad (10)$$

Un espace de conception hybride (HDS) pour deux variables aléatoires avec une distribution normale est illustré à la figure 5.3. La figure montre que les niveaux de fiabilité d_β peuvent être représentés par des ellipses, tandis que la solution optimale, P_x^* et le point le plus probable, P_y^* , peuvent être identifiés à l'intersection de la courbe $G(x, y) = 0$ et de $d_\beta = \beta_t$.

Les étapes suivantes sont comprises dans l'approche hybride pour résoudre un problème d'optimisation de la conception soumis à des contraintes déterministes et probabilistes. Tout d'abord, les valeurs initiales des vecteurs variables x_0 et y_0 représentent l'entrée du modèle étudié. Ensuite, l'évaluation de la fonction objective $F(x, y)$ a lieu, suivie du calcul de la fonction d'état limite $G(x, y)$, des contraintes déterministes $g(x)$, et de l'indice de fiabilité $\beta(x, y)$. À l'étape 4, les contraintes de convergence sont testées, et si la solution converge, l'algorithme s'arrête. Dans le cas contraire, les variables x et y sont mises à jour, et le processus retourne à l'étape 2 pour répéter l'évaluation de la fonction objective.

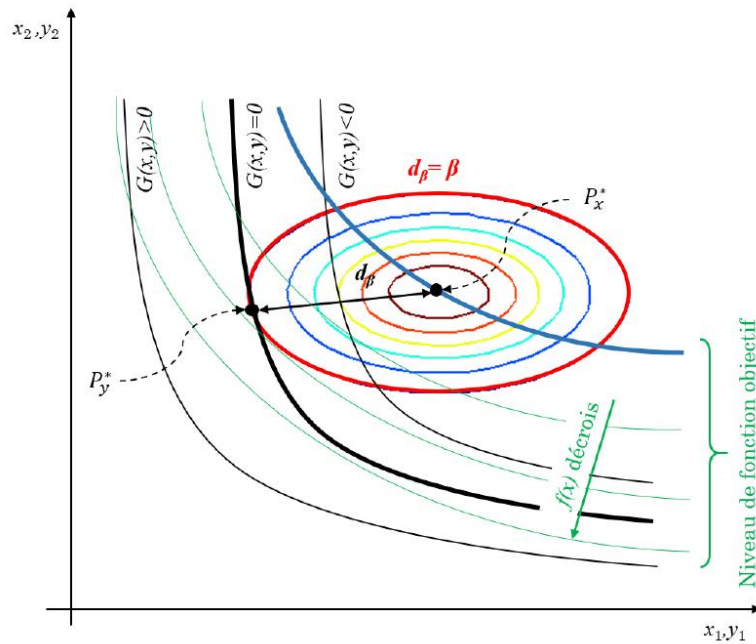


Figure 5.3 Espace de conception hybride (HDS)

L'approche hybride a été éprouvée comme une méthode efficace pour minimiser le temps de calcul par rapport à l'approche conventionnelle. Ce processus itératif se poursuit jusqu'à l'obtention d'une solution convergente.

5.6.2.3 Méthode de Facteur de Sécurité Optimal (OSF)

Pour concevoir des structures nouvelles, on est souvent obligé d'obtenir des données expérimentales afin de déterminer un niveau de sécurité adéquat. Toutefois, le recours à la méthode conventionnelle DDO (Design Deterministic Optimization) présente un inconvénient majeur : elle ne permet pas d'atteindre le niveau de fiabilité souhaité, ce qui peut conduire à une conception potentiellement dangereuse. Pour surmonter cette limitation, une approche innovante appelée OSF (Optimum Safety Factor) a été mise au point de manière à générer des facteurs de sécurité indépendamment de l'expérience des ingénieurs. Cette approche vise à optimiser le facteur de sécurité pour garantir une performance fiable de la structure, même en présence d'incertitudes.

Malgré les améliorations qu'apporte l'approche hybride HM (Hybrid Method) en termes de fiabilité, elle se heurte à un défi majeur : un problème d'optimisation complexe impliquant un grand nombre de variables. Pour surmonter ces limitations, le processus OSF propose une solution alternative en fournissant un facteur de sécurité fiable et analytique à la fois pour le point de conception et pour la solution optimale. L'approche OSF (Optimum Safety Factor) est

une méthode novatrice qui combine l'analyse de fiabilité et l'analyse de sensibilité pour surmonter les limites des méthodes DDO et HM. Son algorithme, tel que décrit dans les travaux de Kharmanda et al. [97-99], se compose de trois étapes clés. Grâce à cette approche, il est possible d'obtenir une conception plus fiable en offrant des niveaux de sécurité optimaux, tout en réduisant les désavantages inhérents aux méthodes conventionnelles de conception et d'optimisation.

- Dans la première étape de l'approche OSF, le point de conception optimal y_i^* est déterminé en résolvant le problème d'optimisation. La fonction objective est minimisée sous les contraintes déterministes et la fonction d'état limite $G(y)$. Le point le plus probable de défaillance est considéré comme étant le point de conception obtenu.

- Dans la deuxième étape, les facteurs de sécurité S_f sont calculés en effectuant une analyse de sensibilité de la fonction d'état limite. Généralement, pour n variables de conception et une distribution normale de la variable aléatoire y_i , l'équation (Eq. 10) est utilisée pour faciliter la transition de l'espace physique à l'espace normalisé. Les facteurs de sécurité peuvent être écrits sous la forme suivante :

$$S_{f_i} = 1 + \gamma_i \cdot u_i^*, i=1, \dots, n \quad (11)$$

Le coefficient de variance noté γ_i représente le lien entre la valeur moyenne m_i et l'écart-type σ_i de y_i , et peut donc être exprimé comme suit :

$$\gamma_i = \frac{\sigma_i}{m_i} \quad (12)$$

En se référant à [15], il est possible de calculer la valeur optimale du vecteur normalisé u_i^* en utilisant les dérivées de la fonction de performance au point de défaillance le plus probable, comme démontré ci-dessous :

$$u_i^* = \pm \beta_t \cdot \sqrt{\frac{\left| \frac{\partial G}{\partial y_i} \right|}{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial G}{\partial y_i} \right|}}, i=1, \dots, n \quad (13)$$

Le signe \pm dépend du signe de la dérivée :

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial y_i} > 0 \leftrightarrow u_i^* > 0 \\ \frac{\partial G}{\partial y_i} < 0 \leftrightarrow u_i^* < 0 \end{cases} \quad (14)$$

La troisième et dernière étape consiste à déterminer la solution optimale x_i^* , où les valeurs moyennes m_i des variables aléatoires y_i sont représentées par les variables de conception déterministes x_i . L'utilisation de l'équation suivante permet de calculer le plan optimal de manière efficace :

$$x_i^* = \frac{y_i^*}{S_{f_i}} \quad (15)$$

5.6.2.4 Méthode hybride robuste (RHM)

Le principal inconvénient de la méthode hybride classique est son temps de calcul élevé et peut converger vers une solution, P_x^* , dans la zone dangereuse ($G(x) > 0$), même si la distance $d_\beta(x, y)$ représente un niveau de fiabilité acceptable tel que montré dans la figure 5.4. Pour résoudre ce problème, Yaich et al. [16] ont élaboré une solution appelée RHM, qui consiste à incorporer une contrainte pour s'assurer que l'algorithme d'optimisation trouve la solution optimale dans la zone sûre. Cela implique que dans le HDS, la valeur de la fonction objective à la solution optimale, P_x^* , doit être supérieure à celle au point de conception P_y^* . Par conséquent, le RHM peut être défini comme suit :

$$\begin{aligned} \min_{x,y} \quad & F(x, y) = f(x) * d_\beta(x, y) \\ \text{s.t.} \quad & G(x, y) \leq 0 \\ & g_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, K \\ & d_\beta(x, y) \geq \beta_t \\ & f(x) \geq f(y) \end{aligned} \quad (16)$$

La figure 5.4 présente un exemple illustratif du RHM dans le HDS. Deux fonctions objectives, $f_1(x)$ and $f_2(x)$, se croisent avec la solution optimale P_x^* et le point de conception P_y^* . Le point optimale, P_x^* , est situé dans la région sûre, où $f(x^*)$ est supérieure à $f(y^*)$, et le niveau de fiabilité requis, $d_\beta = \beta_t$, est également satisfait.

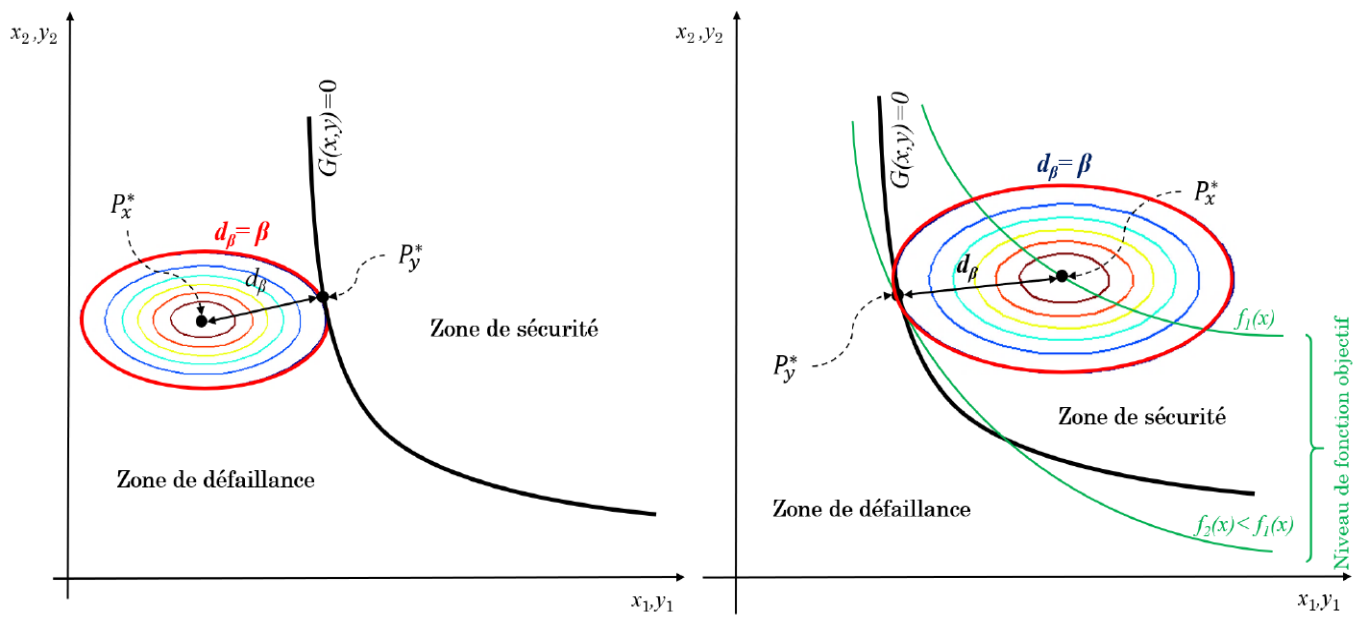


Figure 5.4 RHM dans l'espace de conception hybride

Dans la figure 5.5, l'organigramme expose l'intégralité de la méthode RHM. L'approche RHM a démontré une amélioration de la robustesse et une réduction du temps de calcul par rapport à la méthode HM conventionnelle. La prochaine section présentera les résultats de la simulation numérique du composant BGA soumis à des charges électro-thermomécaniques dans le logiciel ANSYS APDL. Ces résultats seront ensuite combinés avec MATLAB, analysés et discutés.

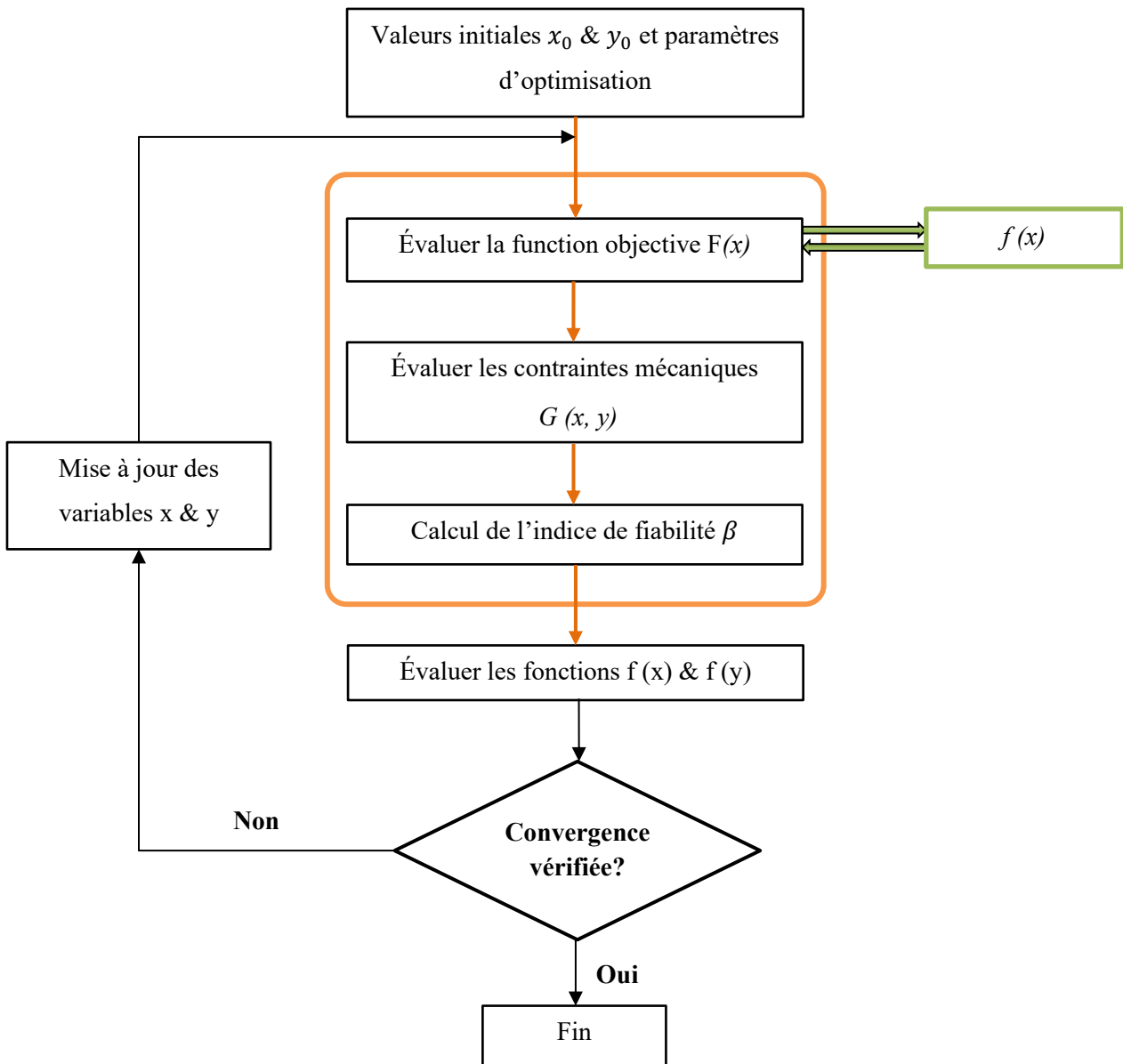


Figure 5.5 Organigramme de la méthode RHM

5.7 Résultats et discussions

Dans cette section, l'exemple de la figure 4.1 présenté dans chapitre précédent est étudié. Il se compose de joints de soudure sphéroïdaux avec une couche de cuivre en dessous et au-dessus, d'une puce de silicium en haut et d'un PCB-FR4 en bas. Les dimensions et les propriétés de l'assemblage sont indiquées dans le chapitre précédent. Un cas déterministe est d'abord considéré. Ensuite, une étude RBDO est réalisée pour obtenir une conception optimale et fiable du système. La figure 5.5 décrit le processus adopté pour identifier la conception optimale du système BGA étudié. Cette approche implique l'intégration de la boîte à outils d'optimisation MATLAB avec le logiciel d'éléments finis ANSYS APDL. La fonction objective et les

contraintes du problème RBDO ont été déterminées à l'aide d'un point initial x_0 . Pour chaque configuration x_i , un modèle ANSYS FE a été généré, suivi d'un maillage et de l'application de conditions limites. Une analyse transitoire a été entreprise pour évaluer la déformation plastique cumulée du profil au fil du temps, qui a ensuite été introduite dans MATLAB pour être comparée à la limite de déformation plastique maximale admissible. La mise à jour de x est nécessaire si le problème RBDO ne converge pas.

5.7.1 Description du problème d'optimisation

Notre objectif principal est d'optimiser la taille globale des joints de soudure tout en trouvant l'équilibre parfait entre, d'une part, la minimisation de la fonction objective qui est le volume, et donc la minimisation de la quantité de matériau utilisé, ce qui conduit à la minimisation des coûts et, d'autre part, la préservation de la fiabilité de ce composant, c'est-à-dire le fait que la déformation plastique admissible est toujours inférieure à la déformation plastique maximale. Les variables de conception sont le rayon "r" et la hauteur "h". Ces variables sont limitées entre la bande inférieure et la bande supérieure. Ces valeurs sont extraites de la littérature et présentée dans le tableau 5.5 ci-dessous.

Tableau 5.5 Limites inférieures et supérieures des variables

paramètre (mm)	Limites inférieures (x_L)	Limites supérieures (x_U)
Rayon	0.15	0.3
Hauteur	0.2	0.6

Ces variables de conception sont normalement distribuées et le coefficient de variance, γ , de chaque variable est égale à 0.1; m_r et m_h sont respectivement les valeurs moyennes de r et de h. Les variables de conception sont réexaminées en tant que variables aléatoires probabilistes, avec leurs distributions de probabilité présentées dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6 Caractéristiques des variables aléatoires

Paramètres (mm)	Valeure moyenne	γ	Type de distribution
rayon	0.22	0.1	Normal
hauteur	0.4	0.1	Normal

Grâce au logiciel d'éléments finis ANSYS-APDL, couplé à MATLAB, le calcul de la déformation plastique maximale a été effectué. Le problème d'optimisation a donc été identifié sur la base des équations présentées dans la section précédente. Il a été résolu par l'outil de programmation quadratique séquentielle (SQP) du logiciel MATLAB (fmincon).

5.7.2 Résultats du DDO et RBDO

5.7.2.1 Résultats de l'optimisation déterministe (DDO)

La méthode d'optimisation déterministe de la conception est basée sur la minimisation du volume du joint de brasage tout en maintenant sa fiabilité, c'est-à-dire que la déformation plastique accumulée responsable de la défaillance est inférieure à une limite maximale. Les variables de conception de l'optimisation sont le rayon "r" et la hauteur "h". Pour prendre en compte les incertitudes, il est courant d'appliquer un facteur de sécurité à la déformation plastique du joint soudé. Ce facteur de sécurité est déterminé en se basant sur l'expérience de l'ingénieur. Dans notre étude de cas, le facteur de sécurité a été fixé à une valeur de 1,5, telle qu'approuvée par les industries commerciales et fournie par la "boîte à outils d'ingénierie" comme détaillé dans les sections précédentes et présenté dans le tableau 5.4.

Par conséquent, la déformation plastique maximale dans le joint ne doit pas dépasser 0,167 ($\varepsilon_{pl\ max} = \frac{0.25}{1.5}$) et notre formulation du problème d'optimisation est exprimé comme suit :

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } V(r, h) = \frac{1}{3} * \pi * r^2 * h \\
 & \text{S.C } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_p \leq \frac{\varepsilon_{p\ adm}}{s_f} = 0.167 \\ r_L < r < r_U \\ h_L < h < h_U \end{array} \right. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Le problème d'optimisation a donc été identifié sur la base des équations présentées dans la section précédente. Il a été résolu par l'outil de programmation quadratique séquentielle (SQP) du logiciel MATLAB (fmincon). Les graphiques de sortie de l'algorithme d'optimisation sont présentés ci-dessous. La figure 5.6 présente les coordonnées X et Y du point courant calculé (point optimal). Le paramètre X est le numéro de la variable et le paramètre Y est la valeur. Pour le premier paramètre (X=1), la valeur optimale du rayon est de 0,22e-3 m, tandis que pour le second paramètre (X=2), la valeur optimale de la hauteur est de 0,416e-3 m.

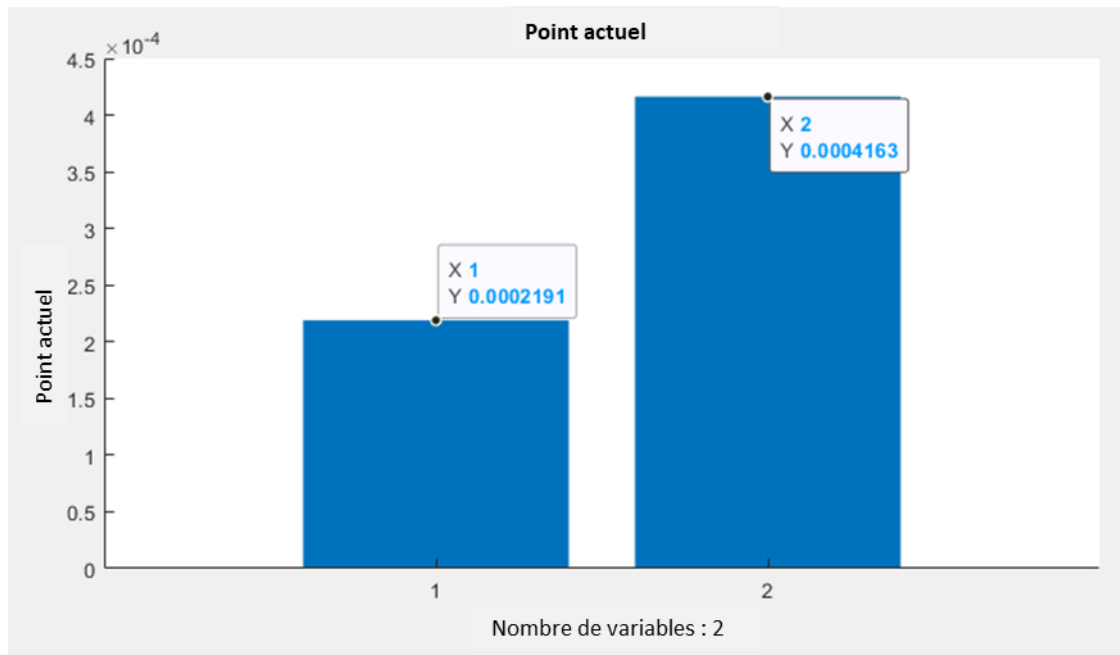


Figure 5.6 Coordonnées du point optimal

La figure 5.7 illustre la convergence de la fonction objective, qui est dans notre cas le volume, vers sa valeur optimale, de 2,625e-11m à 2,1e-11m. Ceci peut être interprété par le fait que le volume doit être aussi minimal que possible pour obtenir un coût minimal et aussi maximal que possible pour être fiable tout en respectant la contrainte qui est la déformation plastique admissible inférieure à la déformation plastique critique qui est égale à $\varepsilon_{pl\ max} = 0,167$, comme mentionné plus haut dans ce document. En fait, un compromis entre ces trois paramètres est essentiel, ce qui est illustré dans la formulation mathématique.

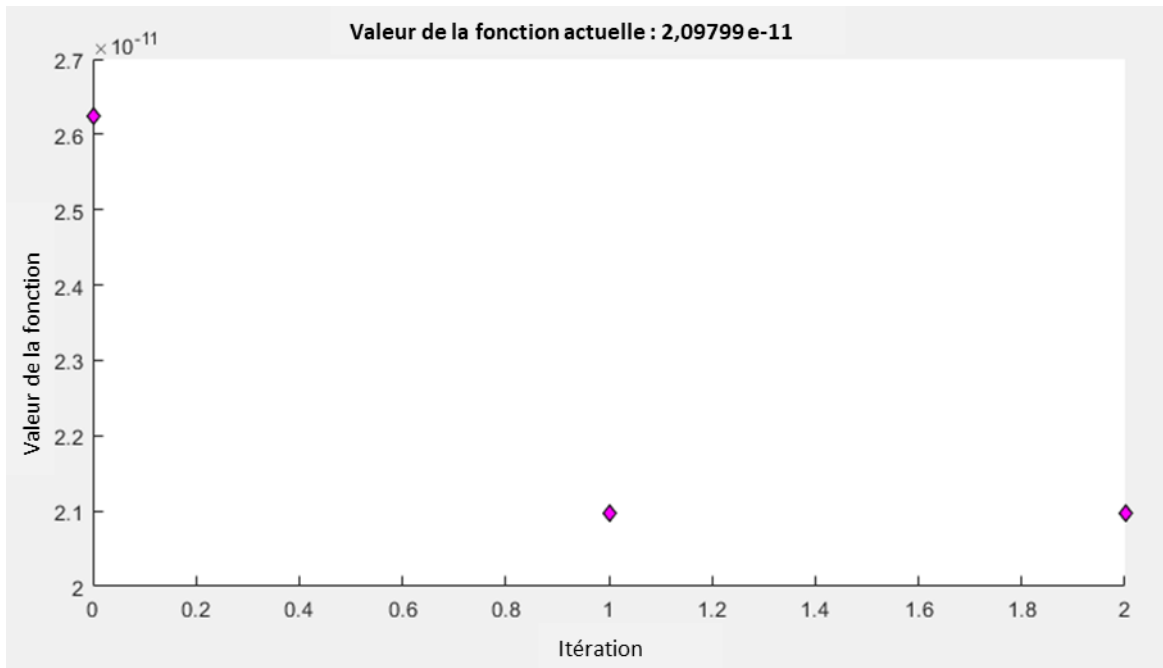


Figure 5.7 Fonction objective optimale

Grâce à la convergence de la violation maximale de la contrainte vers zéro, comme le met en évidence la figure 5.8 ci-dessus, notre problème est minimisé avec la précision requise et respecte les conditions de faisabilité. En d'autres termes, la convergence se produit vers un point réalisable.

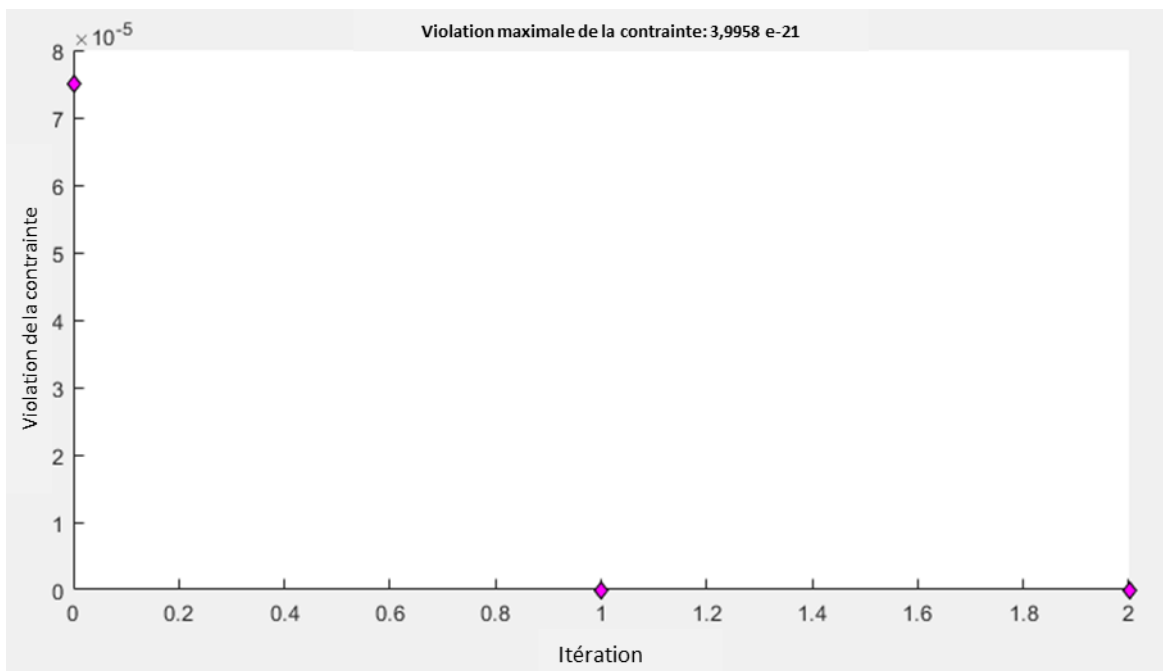


Figure 5.8 Violation de la contrainte maximale

Le tableau 5.7 présente les paramètres géométriques initiaux et optimaux, les volumes initiaux et optimaux et les déformations plastiques cumulées (contrainte d'optimisation).

Tableau 5.7 Résultats de l'optimisation déterministe

	1er Point	Valeurs initiales x_0	Solution optimale x_i^*
Variables de conception	rayon	0.25	0.22
	hauteur	0,4	0,416
Fonction objective	Volume	2,625E-11	2,1E-11
Contraintes d'optimisation	$\varepsilon_p \max$	0,162	0,137
Indice de fiabilité	β		3,011

En se référant aux résultats du DDO, nous sommes en mesure de prédire la configuration optimale X_{opt} qui offre une valeur minimale du volume V_{opt} . En outre, on peut déduire que les différentes contraintes ont été respectées. Les variables de conception sont parfaitement comprises dans l'intervalle fixé : r est dans l'intervalle $[0,15^{e-3} \ 0,375^{e-3}]$ et h appartient à l'intervalle $[0,2^{e-3} \ 0,8^{e-3}]$ ainsi que pour la contrainte d'optimisation $\varepsilon_{p \max} < 0,167$. La figure 5.9 présente un graphique qui vise à mieux illustrer l'efficacité de l'approche d'optimisation déterministe de la conception en termes d'optimisation de la géométrie. Dans ce graphique, nous cherchons à comparer les courbes de contraintes initiales et optimales calculées. Nous constatons une amélioration significative de la déformation plastique accumulée. Elle est minimisée par $\Delta\varepsilon_{acc} = 15,4 \%$ comme expliqué dans l'eq. (18) ci-dessous.

$$\Delta\varepsilon_{acc} = \frac{\varepsilon_{accmax} - \varepsilon_{accinit}}{\varepsilon_{accmax}} = \frac{0.162 - 0.137}{0.162} = 0.154 \quad (18)$$

Cela confirme l'optimalité de la solution obtenue.

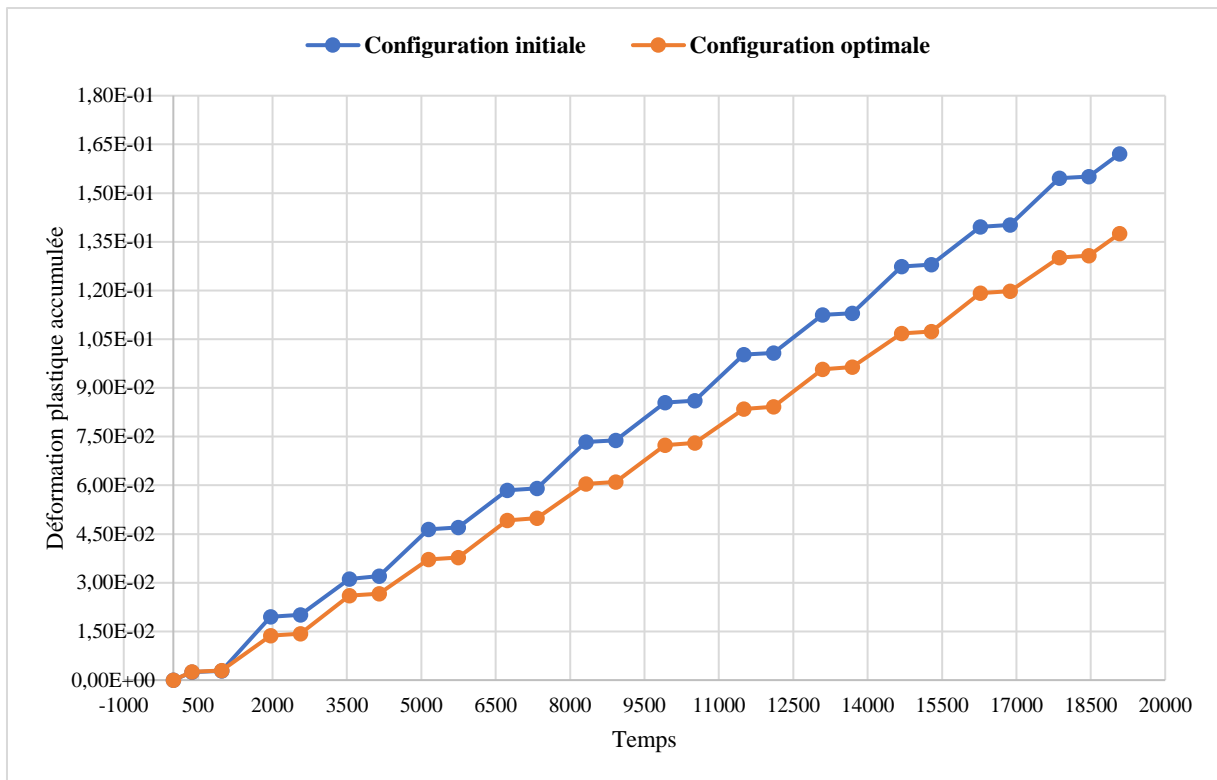


Figure 5.9 Comparaison de la contrainte initiale et de la contrainte

Cependant, le paramètre le plus important à considérer est l'indice de fiabilité. Dans cette étude, le niveau de fiabilité requis est fixé à $\beta_t = 3$, ce qui équivaut à une probabilité de défaillance d'environ 10^{-3} . L'indice de fiabilité β doit être supérieur à 3, comme indiqué dans les travaux précédents [86], [88] – [92].

Afin d'évaluer plus avant l'efficacité de la méthode DDO, le problème d'optimisation est résolu avec différents points initiaux. Le tableau 5.8 montre que la modification de x_0 converge vers une solution réalisable, mais pas vers l'indice de fiabilité cible. Il est important de souligner que les variables mentionnées x_0 sont choisies au hasard.

Tableau 5.8 Points initiaux

	Variables	2ème point	3ème point	4ème point	5ème point	6ème point
Valeurs initiaux x_0	rayon	0,375	0,3	0,22	0,27	0,25
	hauteur	0,7	0,5	0,38	0,5	0,39
	Volume	1,03e-10	4,725e-11	1,9312e-11	3,827e-11	2,56e-11

solution optimale x_i^*	rayon _{opt}	0,355	0,26	0,196	0,254	0,206
	hauteur _{opt}	0,71	0,52	0,392	0,508	0,412
Fonction objective	Volume _{opt}	9,4e-12	3,692e-11	1,582e-11	3,442e-11	1,836e-11
Contrainte d'optimisation	$\varepsilon_p \max$	0,11	0,158	0,12	0,155	0,164
Indice de fiabilité	β	6,2917	2,2413	2,0651	2,011	3,7684

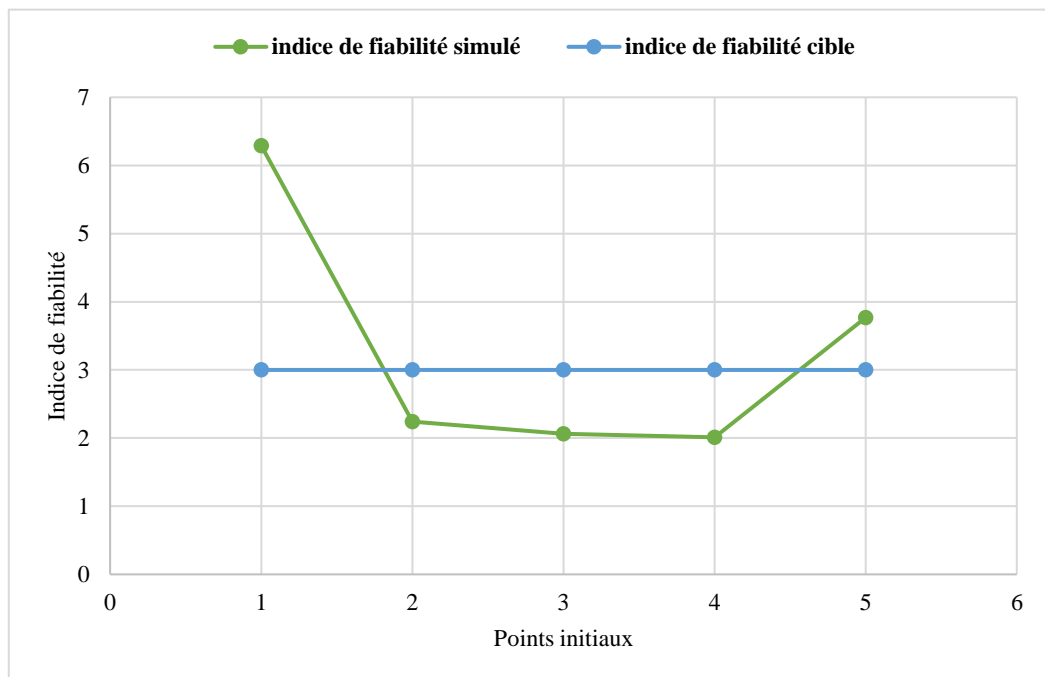


Figure 5.10 Graphique de l'indice de fiabilité

Il convient de noter que nos résultats correspondent à une conception optimale puisque la solution obtenue respecte la contrainte de déformation plastique et l'intervalle des variables de conception. Par conséquent, l'indice de fiabilité, représenté dans le tableau 5.8 et la figure 5.10, ne satisfait pas au niveau de fiabilité souhaité et attendu car il fluctue entre des valeurs supérieures et inférieures de l'indice de fiabilité cible β_t . Cette conception ne peut donc pas garantir le niveau de fiabilité escompté et peut conduire à une solution peu sûre, entraînant un risque élevé de défaillance. L'absence de contrainte de fiabilité constitue la principale limite,

étant donné les incertitudes entourant les facteurs de sécurité déduits à partir des expériences d'ingénierie.

Dans cette perspective, l'utilisation de l'optimisation fiabiliste RBDO est d'un grand intérêt pour obtenir un niveau de fiabilité proche. Durant l'intégralité du processus de conception des structures mécaniques, une prise en compte complète des incertitudes est essentielle pour parvenir à une conception optimale précise d'une structure.

5.7.2.2 Résultats de l'optimisation fiabiliste (RBDO)

Pour remédier à cette limitation, il est essentiel d'exploiter les méthodes RBDO. Grâce à ces techniques, il devient possible de trouver un équilibre entre l'obtention du niveau de fiabilité souhaité et le respect des contraintes de conception, permettant l'obtention des solutions de conception plus robustes et plus efficaces. Pour obtenir la solution optimale par la méthode OSF, le point de conception doit être déterminé dans un premier temps. Ce point de conception est déterminé en résolvant le problème d'optimisation indiqué par la formulation :

$$\begin{aligned} \min_y \quad & V(y) \\ \text{S.C} \quad & \varepsilon_{p_{adm}} \leq \varepsilon_{p_{cri}} \\ & y_L < y < y_U \end{aligned} \quad (20)$$

La suite des opérations implique le calcul des coefficients de sécurité en se basant sur les dérivées de la fonction d'état limite conformément à l'équation (9). Ensuite, la solution optimale est obtenue en divisant la valeur du point de conception par les coefficients de sécurité calculés, comme indiqué dans l'équation (13). Les résultats issus de cette méthode sont résumés de manière concise dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 Résultats de la méthode OSF

		x_0	y_i^*	Facteurs de sécurité	x_i^*
Variables de conception (mm)	r	0.15	0.225	1.5458	0.1457
	h	0.2	0.35	1.4559	0.18
Fonction objective (m³)	V	0.47 e-11	1.85 e-11		0.4 e-11

Contrainte d'optimisation	$\varepsilon_{p\ max}$	0.0235	0.0126		0.0266
Indice de fiabilité	β				3

Notamment, la déformation plastique cumulée ne satisfait pas à la condition de contrainte. En outre, le point optimal (x_i) se situe en dehors de la plage requise, ce qui indique que la méthode OSF peut ne pas être stable dans toutes les circonstances. Il devient donc évident que l'utilisation de la méthode HM (méthode hybride) pourrait être impérative pour résoudre efficacement ce problème. La fonction objective du problème de la méthode hybride peut être exprimée en termes de produit du volume et de la distance dans le HDS, comme le montre la formulation suivante :

$$\begin{aligned}
 \min_{x,y} \quad & F(x,y) = V(r,h) * d_{\beta}(x,y) \\
 \text{S.C} \quad & \varepsilon_{p\ adm} \leq \varepsilon_{p\ cri} \\
 & d_{\beta}(x,y) \geq \beta_t \\
 & x_L < x < x_U \\
 & y_L < y < y_U
 \end{aligned} \tag{21}$$

Le tableau 5.10 résume les résultats clés de l'approche, où il est observé que le point optimal est situé dans la région non sûre avec une valeur maximale de déformation plastique : $\varepsilon_{p\ max} > 0,167$. Cependant, la distance entre le point de conception et le point optimal, représentée par β , indique un niveau de fiabilité acceptable.

Tableau 5.10 Résultats de la méthode HM

		x_0	y_0	x_i^*	y_i^*
Variables de conception (mm)	r	0.15	0.3	0.3	0.29
	h	0.2	0.5	0.2	0.4
Fonction objective (m³)	V	0.47 e-11	4.71 e-11	1.88 e-11	3.52 e-11
Contrainte d'optimisation	$\varepsilon_{p\ max}$	0.0235	0.0126	0.32	0.104

Indice de fiabilité	β	3.2		3	
----------------------------	---------	-----	--	---	--

Pour remédier à cette problématique et s'assurer que le point optimal se trouve dans la zone de sécurité, nous avons recouru à une méthode hybride robuste. L'approche hybride robuste implique l'utilisation d'un modèle mathématique qui peut être formulé de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 \min_{x,y} \quad & F(x,y) = V(r,h) * d_{\beta}(x,y) \\
 \text{S.C} \quad & \varepsilon_{p_{adm}} \leq \varepsilon_{p_{cri}} \\
 & d_{\beta}(x,y) \geq \beta_t \\
 & V(x) \geq V(y) \\
 & x_L < x < x_U \\
 & y_L < y < y_U
 \end{aligned} \tag{22}$$

Le tableau 5.11 offre une présentation détaillée des résultats significatifs issus de l'application de la méthode hybride robuste (RHM). Il convient de souligner que la solution optimale obtenue à ce stade se situe dans la zone de sécurité, ce qui garantit que le niveau de fiabilité est dûment vérifié. Les variables de conception sont parfaitement comprises dans l'intervalle fixé : r appartient à $[0,15^{e-3} \ 0,375^{e-3}]$ et h est dans le domaine $[0,2^{e-3} \ 0,8^{e-3}]$ ainsi que pour la contrainte d'optimisation $\varepsilon_{p_{max}} < 0,167$.

Tableau 5.11 Résultats de la méthode RHM

		x_0	y_0	y_i^*	x_i^*
Variables de conception (mm)	r	0.15	0.3	0.25	0.26
	h	0.2	0.5	0.41	0.39
Fonction objective (m³)	V	0.47 e-11	4.71 e-11	2.7 e-11	2.76 e-11
Contrainte d'optimisation	$\varepsilon_{p_{max}}$	0.0235	0.0126	0.012	0.0083
Indice de fiabilité	β	3.2			3

Cette amélioration remarquable de la méthode RHM par rapport à l'approche HM classique s'est traduite par une optimisation considérable des performances en termes d'efficacité computationnelle. La figure 5.11 présente un graphique qui illustre mieux l'efficacité de l'approche d'optimisation de la conception par la méthode hybride robuste. Dans ce graphique, les courbes de contraintes initiales et optimales calculées sont comparées. Nous en déduisons une amélioration significative de la déformation plastique accumulée. Elle est minimisée de 33 %. Cela confirme l'optimalité de la solution obtenue.

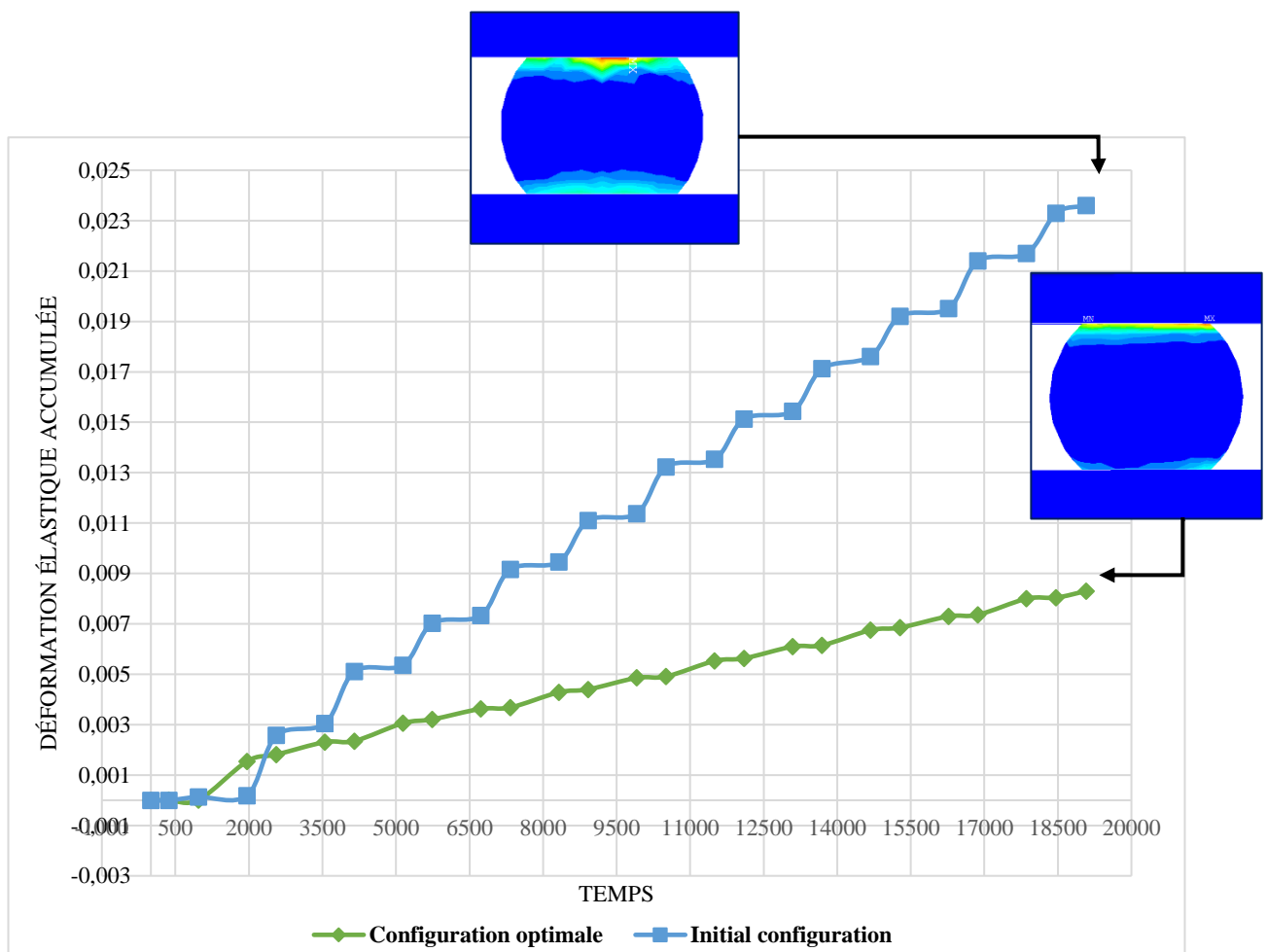


Figure 5.11 Comparaison des contraintes

5.8 Conclusion and perspectives

Dans l'industrie et la recherche, l'importance de composants BGA fiables et conçus de manière optimale a considérablement augmenté. Afin de surmonter ce défi, nous avons développé une approche novatrice qui vise à optimiser la structure du BGA. En adoptant la méthode RBDO, nous évaluons les variables de conception géométrique du composant BGA et déterminons les

variables optimales qui favorisent le niveau d'efficacité de la structure. Notre approche tient compte de la faisabilité technique et économique, garantissant une conception optimale des joints de soudure des BGA. Cette étude présente en détail les résultats de notre recherche, fournissant ainsi une analyse approfondie des données recueillies, en soulignant les avantages de notre approche et son potentiel pour des applications pratiques. Afin que les composants électroniques Ball Grid Array (BGA) soient plus fiables, une approche basée sur un modèle numérique basé sur des éléments finis a été développée à l'aide du logiciel ANSYS, combinée à un algorithme d'optimisation implémenté à travers le programme MATLAB. L'objectif principal était la réduction du volume du joint soudé avec prise en considération des contraintes de déformation plastique et de variables de conception, afin d'obtenir un joint soudé BGA optimal qui réponde aux exigences de fiabilité. Une nouvelle méthode appelée RHM a été proposée après avoir constaté que d'autres méthodes de conception basée sur la fiabilité (RBDO) telles que l'approche HM et OSF présentaient des problèmes de stabilité et de sécurité. La méthode RHM se distingue par son remarquable gain d'efficacité computationnelle, permettant ainsi une substantielle amélioration des temps de calcul tout en garantissant à la fois la fiabilité et la contrainte de déformation plastique accumulée. Cette approche RBDO s'est avérée efficace dans la résolution des problèmes d'optimisation rencontrés. Pour cette raison, elle peut être investie de manière suffisamment efficace dans des domaines tels que les industries électroniques pour s'avérer mieux adaptée que d'autres approches impliquant des applications prometteuses dans ce domaine. Aussi précieux et remarquable qu'il puisse être, ce travail nécessite beaucoup de temps pour résoudre le problème lié au couplage entre ANSYS et MATLAB. En récapitulant, nous assurons que cette synthèse serait précieuse pour ouvrir d'autres pistes de recherche fructueuses et offrir des directions de recherche futures prometteuses. À cet égard, notre travail peut être étendu en remplaçant le modèle ANSYS par un métamodèle, non seulement pour améliorer le couplage, mais aussi en vue de minimiser le temps de calcul.

Conclusion Générale

En conclusion, cette thèse a exploré le problème de la fiabilité et de l'optimisation des joints de soudure pour les composants BGA. Elle a généré des avancées majeures dans le secteur de l'ingénierie électronique. En utilisant une méthodologie rigoureuse, cette recherche a exposé et discuté en détail les principales conclusions obtenues à travers les différents chapitres de la thèse.

La revue de littérature a établi une base solide de connaissances en identifiant et en définissant les termes clés nécessaires à la compréhension des mécanismes de défaillance des joints de brasure, des modèles de fatigue et de la formation de la couche IMC. Cette revue de littérature a posé un socle essentiel pour la poursuite de la recherche.

La modélisation analytique et numérique du couplage multiphysique dans les joints de brasure a permis d'approfondir notre compréhension des interactions électro-thermomécaniques et de leur impact sur les performances et la fiabilité de ces joints. Cette étude a fourni des données essentielles sur les contraintes et les déformations qui se produisent dans les joints de brasure, ainsi que sur la zone de contraintes concentrées présente au niveau de la bille de soudure.

La comparaison des alliages de brasure, tels que le SnPb, le SAC et l'InnoLot, a permis de déterminer l'alliage le plus fiable en analysant leur performance électro-thermomécanique. Les résultats ont fourni des indications précieuses pour le choix optimal des alliages de brasure, en considérant les performances requises et les contraintes environnementales.

L'optimisation fiabiliste des joints de brasure a été abordée en prenant en considération la forme de la bille de soudure et les paramètres géométriques des joints. Les approches déterministes et fiabilistes ont permis d'obtenir des conceptions robustes et fiables des joints de brasure, en tenant compte des incertitudes inhérentes aux matériaux et aux conditions de charge. Ces résultats ont ouvert la voie à des améliorations pratiques dans la conception et la fabrication des joints de brasure.

En résumé, cette thèse a marqué une avancée substantielle dans le domaine de la fiabilité et de l'optimisation des joints de brasure dans les composants BGA, en fournissant de nouvelles connaissances et en proposant des méthodologies innovantes. Les résultats obtenus ont des implications pratiques importantes pour l'industrie électronique, en permettant d'améliorer la performance et la fiabilité des systèmes électroniques.

Références

- [1] Y.-E. Shin, J.-H. Lee, Y.-W. Koh, C.-W. Lee, J.-H. Yun, and S.-B. Jung, “A Study on, uBGA Solder Joints Reliability Using Lead-free Solder Materials,” 2002.
- [2] Dompierre Benoît, “Fiabilité mécanique des assemblages électroniques utilisant des alliages du type SnAgCu,” 2011, doi: 10.13140/2.1.4381.9200.
- [3] M. Jean-baptiste Libot et al., “Méthodologie d’évaluation de la durée de vie des assemblages,” 2017.
- [4] “Le crash du vol d’AirAsia est dû à une pièce défectueuse,” *Le Monde*, Dec. 2015.
- [5] “Vol Indonesia AirAsia 8501,” Wikipédia.
- [6] Marie-Violette Bernard, “Disparition du vol QZ8501 d’AirAsia,” franceinfo, 2016.
- [7] A. Amar, B. Radi, and A. El Hami, “Reliability based design optimization applied to the high electron mobility transistor (HEMT),” *Microelectronics Reliability*, vol. 124, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114299.
- [8] Safa Assif, El hami Abdelkhalak, and Agouzoul Mohamed, “Fiabilité et optimisation des structures mécaniques à paramètres incertains : application aux cartes électroniques,” 2013. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00950354>
- [9] Depiver Joshua Adeniyi, Sabuj Mallik, and Yiling Lu, “Thermo-mechanical reliability studies of lead-free solder interconnects,” 2020.
- [10] van Nhat Le, “Modélisation de la tenue en fatigue des joints de brasure dans un module de puissance,” 2017.
- [11] “Cap sur la Mécatronique.”
- [12] Hamdani Hamid, El hami Abdelkhalak, and Bouchaib Radi, “Métamodèles pour l’étude fiabiliste des systèmes mécatroniques.”
- [13] Abdelhamid Amar, Abdelkhalak ELHAMI, and Bouchaïb RADI, “Optimisation fiabiliste en mécatronique, application à des transistors de puissance,” 2022.

- [14] N. Hammouda, N. Hammouda, G. Habchi, C. Barthod, and O. Duverger, "Mise en oeuvre d'une méthodologie d'évaluation de la fiabilité pour les systèmes mécatroniques," 2013. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-03440521>
- [15] B. J. Baliga, "IGBT Applications: Defense," in *The IGBT Device*, Elsevier, 2023, pp. 489–533. doi: 10.1016/B978-0-323-99912-0.00015-5.
- [16] Y. Zhang, J. Wang, Y. Zeng, and J. Zhang, "Calculating method of MTBF for integrated circuit," in *Journal of Physics: Conference Series*, Jul. 2018, p. 012049. doi: 10.1088/1742-6596/1053/1/012049.
- [17] Bessem Debich, Abdelkhalak EL HAMI, and Lassaad WALHA, "Modélisation, simulation et fiabilité des matériaux à changement de phase pour l'automobile et l'aéronautique."
- [18] M. Bouguila, A. Samet, M. A. Ben Souf, A. El Hami, and M. Haddar, "Thermal performances of finned heat sink filled with nano-enhanced phase change materials: Design optimization and parametric study," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 202, p. 123710, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123710.
- [19] Marko Wang, "Types de packages BGA: le guide ultime de la FAQ en 2022," Aug. 08, 2022.
- [20] Ayda HALOUANI, Cherouat Abel, and Haddar Mohamed, "Modélisation et simulation multi-physique pour la fiabilisation des composants électroniques," 2020.
- [21] "Collage - Dosage - Equipement UV."
- [22] W. W. Lee, L. T. Nguyen, and G. S. Selvaduray, "Introductory invited paper Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/microrel
- [23] M. Motalab, "A Constitutive Model for Lead Free Solder Including Aging Effects and Its Application to Microelectronic Packaging," 2013.
- [24] S. Cheng, C. M. Huang, and M. Pecht, "A review of lead-free solders for electronics applications," *Microelectronics Reliability*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 77–95, Aug. 01, 2017. doi: 10.1016/j.microrel.2017.06.016.

- [25] “JEDEC STANDARD Power and Temperature Cycling JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION.” [Online]. Available: www.jedec.org
- [26] JESD22-A104F, “JEDEC STANDARD Temperature Cycling,” Nov. 2020 [Online]. Available: www.jedec.org
- [27] J.-B. Libot et al., “Experimental strain energy density dissipated in SAC305 solder joints during different thermal cycling conditions using strain gages measurements,” 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), vol. 29, pp. 748–755, 2018, doi: 10.1109/ECTC.2018.00116i.
- [28] D. M. Pierce, S. D. Sheppard, P. T. Vianco, J. A. Regent, and J. M. Grazier, “Validation of a general fatigue life prediction methodology for Sn-Ag-Cu lead-free solder alloy interconnects,” *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME*, vol. 130, no. 1, pp. 0110031–01100312, Mar. 2008, doi: 10.1115/1.2837515.
- [29] F. X. Che and J. H. L. Pang, “Characterization of IMC layer and its effect on thermomechanical fatigue life of Sn-3.8Ag-0.7Cu solder joints,” *J Alloys Compd*, vol. 541, pp. 6–13, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.06.104.
- [30] Marc Grieu, Yves BIENVENU, and Jacques RENARD, “Étude de la fatigue des joints brases de composants electroniques soumis à des sollicitations thermomecaniques, vibratoires et combinees.”
- [31] Stéphane Zanella, “Creep Fatigue Interaction in Solder Joint Alloys of Electronic Packages.”
- [32] Matthieu Berthou, “Fiabilité des assemblages sans plomb en environnement sévère,” Université Sciences et Technologies, Bordeaux, 2012.
- [33] E. P. Ooi et al., “Fracture Behaviour of Intermetallic Compound (IMC) of Solder Joints Based on Finite Element Simulation Result.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309430759>
- [34] G. Petrone and G. Cammarata, “Numerical Modelling for Thermal Design of Electronic Equipments.” [Online]. Available: www.intechopen.com
- [35] J. Harvest, G. Student, A. S. Fleischer, and R. D. Weinstein, “THERMAL

MANAGEMENT OF HEAT GENERATING DEVICES IN CLOSE PROXIMITY ON PRINTED CIRCUIT BOARDS.” [Online]. Available: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/ht2005/72567/>

[36] J. Harvest, A. S. Fleischer, and R. D. Weinstein, “Modeling of the thermal effects of heat generating devices in close proximity on vertically oriented printed circuit boards for thermal management applications,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 3, pp. 253–261, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.04.018.

[37] K. C. Yang, S. H. Lee, J. M. Kim, Y. K. Choi, D. F. Farson, and Y. E. Shin, “Characteristics of Sn-2.5Ag flip chip solder joints under thermal shock test conditions,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 435–441, 2009, doi: 10.1007/s12206-008-1124-z.

[38] C. Han and B. Han, “Board level reliability analysis of chip resistor assemblies under thermal cycling: A comparison study between SnPb and SnAgCu,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 879–886, Mar. 2014, doi: 10.1007/s12206-013-1154-z.

[39] M. Jean-baptiste Libot et al., “Méthodologie d’évaluation de la durée de vie des assemblages,” 2017.

[40] “alignment Ability of Copper Ball on Soldering (2/4).”

[41] P. Hegde, A. R. Ochana, D. C. Whalley, and V. V. Silberschmidt, “Finite element analysis of lead-free surface mount devices,” *Comput Mater Sci*, vol. 43, no. 1, pp. 212–220, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.commatsci.2007.07.046.

[42] ZSK, “CY14B108L/CY14B108N, 8-Mbit (1024 K × 8/512 K × 16) nvSRAM,” 2017.

[43] Debich Bessem, El Hami Abdelkhalak, Yaich Ahmed, Gafsi Wajih, Walha Lassaad, and Haddar Mohamed, “Design optimization of PCM-based finned heat sinks for mechatronic components: A numerical investigation and parametric study,” *J Energy Storage*, vol. 32, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101960.

[44] S. Ghenam, A. Elhami, A. Akrouf, W. Gafsi, and M. Haddar, “Electro-

Thermomechanical Modelling of a BGA Assembly Subjected to a Damaging Displacement and to Random Vibrations,” 2022, pp. 353–364. doi: 10.1007/978-3-030-84958-0_38.

[45] S. Ghenam, A. El Hami, W. Gafsi, A. Akrouf, and M. Haddar, “Optimal performance and cost-effective design of BGA solder joints using a deterministic design optimization (DDO) under real operating conditions,” *Microelectronics Reliability*, vol. 146, p. 115019, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.microrel.2023.115019.

[46] J. a. Depiver, S. Mallik, and D. Harmanto, “Solder joint failures under thermo-mechanical loading conditions—A review,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 7, no. 1. Taylor and Francis Ltd., pp. 1–26, 2021. doi: 10.1080/2374068X.2020.1751514.

[47] J. A. Depiver, S. Mallik, and E. H. Amalu, “Thermal fatigue life of ball grid array (BGA) solder joints made from different alloy compositions,” *Eng Fail Anal*, vol. 125, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105447.

[48] Y. Yao, L. M. Keer, and M. E. Fine, “Modeling the failure of intermetallic/solder interfaces,” *Intermetallics (Barking)*, vol. 18, no. 8, pp. 1603–1611, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.intermet.2010.04.016.

[49] J. Feng, C. Hang, Y. Tian, B. Liu, and C. Wang, “Growth kinetics of Cu₆Sn₅ intermetallic compound in Cu-liquid Sn interfacial reaction enhanced by electric current,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 1775, Jan. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-20100-1.

[50] Holm Altenbach, “Book Review: Sia Nemat-Nasser, *Plasticity -A Treatise on Finite Deformation of Heterogeneous Inelastic Materials*,” 2005.

[51] Alix BONAVENTURE, Guillaume MONTAY, and Danièle AYRAULT, “Evaluation expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans des structures soudées en multipasse,” 2012.

[52] Yao Bin, Wang xiaofeng, and Zou Yabing, “The Study of Thermally Induced Warpage of BGA Package during Reflow Soldering,” in *19th International Conference on Electronic Packaging Technology*, 2018.

[53] W. Dauksher and J. Lau, “A finite-element-based solder-joint fatigue-life prediction methodology for SnAgCu ball-grid-array packages,” *IEEE Transactions on Device and*

Materials Reliability, vol. 9, no. 2, pp. 231–236, Jun. 2009, doi: 10.1109/TDMR.2009.2014943.

[54] E. Santecchia et al., “A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016. Hindawi Limited, 2016. doi: 10.1155/2016/9573524.

[55] C. Choi and A. Dasgupta, “Fatigue of solder interconnects in microelectronic assemblies under random vibration,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 165–169. doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.243.

[56] J. Gao and J. B. Kwak, “Reliability and thermal fatigue life prediction of solder joints for advanced automotive microelectronics,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 8, pp. 3633–3641, Aug. 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0734-6.

[57] S. Y. Yang, Ii. Kim, and S. B. Lee, “A study on the thermal fatigue behavior of solder joints under power cycling conditions,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 31, no. 1, pp. 3–12, Mar. 2008, doi: 10.1109/TCAPT.2007.906294.

[58] X. Li, R. Sun, and Y. Wang, “A review of typical thermal fatigue failure models for solder joints of electronic components,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Oct. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/242/1/012103.

[59] J. Adeniyi Depiver, S. Mallik, and E. H. Amalu, “Comparing and benchmarking fatigue behaviours of various SAC solders under thermo-mechanical loading,” in *Proceedings - 2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020. doi: 10.1109/ESTC48849.2020.9229699.

[60] O. Bendaou, M. Agouzoul, A. El Hami, and O. Bendaou, “Reliability Based Design Optimization of BGA Electronic Packages using the Kriging Substitution Model,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ripublication.com>

[61] Ghenam Sinda, El Hami Abdelkhalak, Gafsi Wajih, Akrouit Ali, and Haddar Mohamed, “Electro thermomechanical coupling of a BGA assembly subjected to combined and alternating power and thermal cycles,” 2022.

[62] W. K. Le, M. B. Zhou, and X. P. Zhang, “The effects of the decreasing joint size on

interfacial microstructure and shear behavior of micro-scale BGA structure Cu/Sn–3.0Ag–0.5Cu/Cu joints under coupled electromechanical loads,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 33, no. 3, pp. 1464–1479, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10854-021-07638-z.

[63] G. Sinda, E. Abdelkhalak, G. Wajih, A. Ali, and H. Mohamed, “A sensitivity study of BGA geometrical parameters based on electro-thermal fatigue analysis.”

[64] R. J. Coyle, K. Sweatman, and B. Arfaei, “Thermal Fatigue Evaluation of Pb-Free Solder Joints: Results, Lessons Learned, and Future Trends,” *JOM*, vol. 67, no. 10, pp. 2394–2415, Oct. 2015, doi: 10.1007/s11837-015-1595-1.

[65] R. Coyle et al., “iNEMI Pb-FREE ALLOY CHARACTERIZATION PROJECT REPORT: PART IV-EFFECT OF ISOTHERMAL PRECONDITIONING ON THERMAL FATIGUE LIFE.”

[66] Pradeep Lall, Vikas Yadav, Jeff Suhling, and David locker, “High strain rate mechanical behavior of SAC-Q Solder,” in 16th IEEE ITherm Conference, 2017.

[67] M. N. Zulkifli, Z. A. Z. Jamal, and G. A. Quadir, “Temperature cycling analysis for ball grid array package using finite element analysis,” *Microelectronics International*, vol. 28, no. 1, pp. 17–28, 2011, doi: 10.1108/13565361111097083.

[68] T. C. Chiu, J. J. Lin, H. C. Yang, and V. Gupta, “Reliability model for bridging failure of Pb-free ball grid array solder joints under compressive load,” *Microelectronics Reliability*, vol. 50, no. 12, pp. 2037–2050, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.microrel.2010.06.012.

[69] X. Q. Shi, H. L. J. Pang, W. Zhou, and Z. P. Wang, “Low cycle fatigue analysis of temperature and frequency effects in eutectic solder alloy,” 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ijfatigue

[70] C. Kanchanomai, Y. Miyashita, and Y. Mutoh, “Low-cycle fatigue behavior of Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, and Sn-Ag-Cu-Bi lead-free solders,” *J Electron Mater*, vol. 31, no. 5, pp. 456–465, 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0100-0.

[71] “Tenue en fatigue.”

[72] Z. Zhu, Y. C. Chan, and F. Wu, “Failure mechanisms of solder interconnects under

current stressing in advanced electronic packages: An update on the effect of alternating current (AC) stressing,” *Microelectronics Reliability*, vol. 91. Elsevier Ltd, pp. 179–182, Dec. 01, 2018. doi: 10.1016/j.microrel.2018.10.002.

[73] C. Kanchanomai, Y. Miyashita, Y. Mutoh, and S. L. Mannan, “Low cycle fatigue and fatigue crack growth behaviour of Sn–Ag eutectic solder,” *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 30–36, Dec. 2002, doi: 10.1108/09540910210444700.

[74] Lei Qiao, Yong Zuo, Limin Ma, Yutian Shu, and Fu Guo, “Failure behaviors of Sn-0.3Ag-0.7Cu solder joint under creep and current stressing,” 2014.

[75] Mounira Bouarroudj-Berkani, Stéphane LEFEBVRE, and Zoubir KHATIR, “Etude de la fatigue thermo mécanique de modules électroniques de puissance en ambiance de températures élevées pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides,” 2008.

[76] C. Kanchanomai, Y. Miyashita, and Y. Mutoh, “Low-cycle fatigue behavior of Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, and Sn-Ag-Cu-Bi lead-free solders,” *J Electron Mater*, vol. 31, no. 5, pp. 456–465, 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0100-0.

[77] V. Gektin, A. Bar-Cohen, and J. Ames, “Coffin-Manson Fatigue Model of Underfilled Flip-Chips,” 1997.

[78] A. Ivan, D. Ferdian, S. Harjanto, D. Marta, A. Ashari, and H. Castane, “Finite Element Analysis Applications in Failure Analysis: Case Studies,” in *Finite Element Analysis - Applications in Mechanical Engineering*, InTech, 2012. doi: 10.5772/51024.

[79] C. Basaran, H. Ye, D. C. Hopkins, D. Frear, and J. K. Lin, “Failure modes of flip chip solder joints under high electric current density,” *Journal of Electronic Packaging*, Transactions of the ASME, vol. 127, no. 2, pp. 157–163, Jun. 2005, doi: 10.1115/1.1898338.

[80] C. Barbagallo, “Thermo-Mechanical Analysis and Fatigue Life Prediction for an Electronic Surface-Mount Device (SMD).” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/309951388>

[81] C. Lau, M. Z. Abdullah, and C. Y. Khor, “Optimization of the reflow soldering process with multiple quality characteristics in ball grid array packaging by using the grey-based

Taguchi method,” *Microelectronics International*, vol. 30, no. 3, pp. 151–168, Jul. 2013, doi: 10.1108/MI-09-2012-0067.

[82] K. A. V Uday Kiran, N. Vigneshwar, D. G. Solomon, and J. J. Arulraj, “Significance of Taguchi Design compared to Response Surface Methodology in predicting optimal machining conditions for PCM process,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1128, no. 1, p. 012019, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1128/1/012019.

[83] J. Zhang and D. Zhang, “Study of Response Surface Methodology in Thermal Optimization Design of Multichip Modules,” *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, vol. 3, no. 12, pp. 2075–2080, Dec. 2013, doi: 10.1109/TCPMT.2013.2271244.

[84] Sridhar Canumalla, “Robust Design of Third Level Packaging in Portable Electronics: Solder Joint Reliability under Dynamic Mechanical Loading,” in *Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2008.

[85] H. A. Hadim and T. Suwa, “Integrated Thermomechanical Design and Optimization of BGA Packages Using Genetic Algorithm,” in *Volume 4, ASMEDC*, Jan. 2004, pp. 495–502. doi: 10.1115/HT-FED2004-56512.

[86] K. Dammak, A. Yaich, A. el Hami, L. Walha, and M. Haddar, “An efficient optimization based on the robust hybrid method for the coupled acoustic–structural system,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 27, no. 21, pp. 1816–1826, Nov. 2020, doi: 10.1080/15376494.2018.1525629.

[87] B. Debich, A. El Hami, A. Yaich, W. Gafsi, L. Walha, and M. Haddar, “An efficient reliability-based design optimization study for PCM-based heat-sink used for cooling electronic devices,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 12, pp. 1661–1673, May 2022, doi: 10.1080/15376494.2020.1836291.

[88] F. Abid, A. el Hami, T. Merzouki, L. Walha, and M. Haddar, “An approach for the reliability-based design optimization of shape memory alloy structure,” *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 49, no. 2, pp. 155–171, Feb. 2021, doi: 10.1080/15397734.2019.1665541.

[89] A. Yaich, F. Abid, T. Merzouki, A. El Hami, L. Walha, and M. Haddar, “A robust method for the reliability-based design optimization of shape memory alloy actuator,”

Mechanics Based Design of Structures and Machines, vol. 51, no. 3, pp. 1563–1581, Mar. 2023, doi: 10.1080/15397734.2021.1873803.

[90] A. Kamel, K. Dammak, A. el Hami, M. ben Jdidia, L. Hammami, and M. Haddar, “A modified hybrid method for a reliability-based design optimization applied to an offshore wind turbine,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 9, pp. 1229–1242, Apr. 2022, doi: 10.1080/15376494.2020.1811927.

[91] A. Kamel et al., “A Reliability optimization of a coupled soil structure interaction applied to an offshore wind turbine.,” *Applied Ocean Research*, vol. 113, p. 102641, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.apor.2021.102641.

[92] K. Dammak, A. el Hami, S. Koubaa, L. Walha, and M. Haddar, “Reliability based design optimization of coupled acoustic-structure system using generalized polynomial chaos,” *Int J Mech Sci*, vol. 134, pp. 75–84, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.10.003.

[93] Loida Bauto, “Factor of Safety: Ratio for Safety in Design and Use,” *SafetyCulture* , Nov. 23, 2022.

[94] Y. Aoues and A. Chateaneuf, “Benchmark study of numerical methods for reliability-based design optimization,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 41, no. 2, pp. 277–294, Mar. 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0412-2.

[95] G. Kharmanda, A. Elhami, and N. Olhoff, “Global Reliability-Based Design Optimization,” 2004, pp. 255–274. doi: 10.1007/978-1-4613-0251-3_14.

[96] F. Moses, “Structural system reliability and optimization,” *Comput Struct*, vol. 7, no. 2, pp. 283–290, Apr. 1977, doi: 10.1016/0045-7949(77)90047-5.

[97] G. Kharmanda and N. Olhoff, “Extension of optimum safety factor method to nonlinear reliability-based design optimization,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 34, no. 5, pp. 367–380, Nov. 2007, doi: 10.1007/s00158-007-0107-5.

[98] G. Kharmanda, N. Olhoff, and A. El-Hami, “Optimum values of structural safety factors for a predefined reliability level with extension to multiple limit states,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 27, no. 6, pp. 421–434, 2004, doi: 10.1007/s00158-004-0405-0.

[99] G. Kharmanda, M.-H. Ibrahim, A. Abo Al-kheer, F. Guerin, and A. El-Hami, “Reliability-based design optimization of shank chisel plough using optimum safety factor strategy,” *Comput Electron Agric*, vol. 109, pp. 162–171, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.compag.2014.09.001.