



UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS



École Doctorale SST
LABORATOIRE de MÉCANIQUE et RHÉOLOGIE

THÈSE présentée par :

Cédric LE COQ

soutenue le : 7 juillet 2010

pour obtenir le grade de : Docteur de l'université François - Rabelais

Discipline/ Spécialité : Génie Mécanique et Systèmes

**PRÉDICTION DE LA FIABILITÉ DE COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES DE TYPE WL-CSP
SOU MIS A DES SOLLICITATIONS MÉCANIQUES**

THÈSE DIRIGÉE PAR :

TOUGUI Abdellah

Maître de Conférences HDR, Université de Tours

RAPPORTEURS :

FRÉMONT Hélène

HÉNAFF Gilbert

Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux

Professeur - ENSMA

JURY :

FRÉMONT Hélène

HÉNAFF Gilbert

LETHIECQ Marc

RANGANATHAN Narayanaswami

STEMPIN Marie-Pascale

TOUGUI Abdellah

Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux

Professeur - ENSMA

Professeur, Université de Tours

Professeur, Université de Tours

Docteur R&D, entreprise CANOE

Maître de Conférences HDR, Université de Tours

Remerciements

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) entre le département d'ingénierie des boîtiers de STMicroelectronics et le Laboratoire de Mécanique et Rhéologie de l'Université François Rabelais à Tours.

En premier lieu je tiens à remercier les trois personnes qui ont assuré l'encadrement des mes travaux de recherche pendant trois ans : Abdellah Tougui, Laurent Barreau et Marie-Pascale Stempin. Chacun à sa manière et dans son domaine m'a apporté ce qui était nécessaire au bon accomplissement de ces recherches.

Cette thèse s'est effectuée dans le cadre d'un contrat CIFRE. Je me dois donc de remercier STMicroelectronics et le LMR pour leur soutien, tant managérial que matériel.

Hélène Frémont et Gilbert Hénaff m'ont fait l'honneur d'accepter de rapporter mon manuscrit ; Marc Lethiecq et Narayanaswami Ranganathan d'être également membres du jury.

Merci également aux responsables du CEROC et du CERMEL, René Leroy et Florian Lacroix pour leur accueil au sein de ces Centres d'Etudes et de Recherche. Leurs conseils et appuis m'ont beaucoup apporté. Merci à Damien Joly et Jean-Louis Poisson, thésards dans les CER pour leur aide.

Du LMR et de STMicroelectronics, beaucoup de monde a participé au bon déroulement de ma thèse. Je n'ose citer les personnes de peur d'en oublier, cependant mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes du service de Fiabilité, du LAT, de R&D, du Laboratoire d'Applications, du service communication et bien sûr du PE&D qui m'ont également apporté leurs contributions et leurs encouragements.

Enfin, je remercie ma famille et tous mes amis qui m'ont écouté et supporté en toutes circonstances durant ces trois ans.

REMERCIEMENTS

Résumé

L'étude présentée s'inscrit dans le cadre général de l'amélioration de la fiabilité mécanique des composants électroniques. Les composants de type WL-CSP (Wafer-Level Chip-Scale Package : boîtier aux dimensions comparables à celles de la puce) sont couramment utilisés dans les appareils nomades (par exemple les téléphones) et assurent de nombreuses fonctions. La tenue dans le temps de ces appareils passe par l'allongement de la durée de vie de leurs éléments. Ce sujet est une problématique complexe car la structure des composants peut varier selon les technologies employées et nécessite des essais spécifiques, qui consomment beaucoup de temps et de ressources.

Un modèle numérique est développé afin d'accélérer le développement des boîtiers de ces composants et d'optimiser les ressources disponibles. Des essais de fiabilité sont menés sur le test de chute et un banc d'essai de flexion est mis en place. Les résultats de ces essais permettent de valider la simulation numérique et de mettre au point un modèle de fatigue.

D'autre part, une campagne de caractérisation des matériaux permet de déterminer les propriétés mécaniques de la structure étudiée. La caractérisation concerne notamment les couches minces pour lesquelles les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de leurs conditions de dépôts.

Ces éléments sont incorporés dans un modèle numérique incluant un certain nombre d'hypothèses. Le modèle est confronté à l'expérience pour déterminer les constantes d'un modèle de fatigue. Ensuite, la simulation et le modèle de fatigue sont utilisés conjointement pour évaluer l'influence de paramètres géométriques et matériaux sur la fiabilité des composants de type WL-CSP.

Mots clés : Essais mécaniques ; analyse mécanique dynamique ; nanoindentation ; fiabilité ; modélisation ; fatigue mécanique

RÉSUMÉ

Abstract

The work described in this report is related to the mechanical improvement of electronic devices mechanical reliability. WL-CSP (Wafer-Level Chip-Scale Package) components are widely used in handheld devices and run many functions. The longevity increase of such a device necessarily requires progresses in its components reliability. This subject is complex as the component structure can vary depending on the employed technologies. So, it requires time and resources.

A numerical model is developed to enhance the packages development as well as available resources. Reliability tests are performed on the drop-test bench and a bend-test bench is designed. These tests provide results to validate the numerical results and to establish a fatigue model.

Aside from these tests, the component materials are characterized to determine the studied structure properties. It specifically concerns the thin layers for which mechanical properties strongly depends on the deposition process.

All of this is incorporated in a numerical model which includes hypotheses. The model is compared with the experiments to determine fatigue model constants. Then, modeling and experiments are used together to evaluate material and geometrical parameters influence.

Keywords : Mechanical tests ; Dynamic Mechanical Analysis ; nanoindentation ; reliability ; modeling ; mechanical fatigue

ABSTRACT

Table des matières

Introduction	23
I Présentation de la technologie et état de l’art	27
1 Mise en boîtier des composants	29
1.1 La mise en boîtier	29
1.1.1 Introduction	29
1.1.2 Le soudage par fil	30
1.1.3 Les boîtiers avec matrice de billes	31
1.1.4 Description d’un WL-CSP et applications	32
1.2 Etapes de fabrication	34
1.2.1 Etapes de diffusion : procédés de dépôts	35
1.2.2 Etapes de finition	37
1.2.3 Assemblage sur circuit-imprimé	39
1.3 Etat de l’art	40
1.3.1 Essais de chute	41
1.3.2 Essais de flexion	50
1.3.3 Simulations	61
1.3.4 Alliages avec et sans plomb	68
1.4 Résumé de la première partie	72
II Essais mécaniques	75
2 Les essais mécaniques	77
2.1 Essais de chute	77
2.1.1 Résultats des essais de chute	77
2.1.2 Essai de relaxation des contraintes résiduelles	80
2.2 Essai de flexion	91

TABLE DES MATIÈRES

2.2.1	Conception du banc de test	91
2.2.2	Essais de flexion : présentation des résultats	95
2.3	Statistiques et fiabilité	103
2.3.1	Introduction à la fiabilité	103
2.3.2	Lien entre loi statistique et modèle de dégradation	105
2.4	Etude sur la fatigue mécanique	107
2.4.1	Introduction	108
2.4.2	Comportement cyclique, fatigue oligocyclique	109
2.4.3	Les modèles de prédiction	114
2.4.4	Conclusions et perspectives sur l'étude de la fatigue	118
2.5	Conclusion sur les essais mécaniques	119
III	Caractérisation des matériaux	121
3	Caractérisation des matériaux	123
3.1	La technique de mesure par DMA	123
3.1.1	Mesures sur circuit imprimé	124
3.1.2	Alliages pour les interconnexions	129
3.2	La technique de mesure par nanoindentation	133
3.2.1	Théorie de la nanoindentation	133
3.2.2	Propriétés des passivations	140
3.2.3	Propriétés des métallisations	142
3.2.4	Mesures sur les composés intermétalliques	148
3.3	Résumé des propriétés mécaniques obtenues par caractérisation	151
IV	Simulation numérique	153
4	Simulation numérique	155
4.1	Simulation numérique	155
4.1.1	Discussion sur les choix de modélisation <i>a priori</i>	156
4.1.2	Aspects numériques	165
4.2	Utilisation du modèle de fatigue	170
4.2.1	Calcul des durées de vie	170
4.2.2	Estimation de l'influence des paramètres de diffusion et d'assemblage	177
4.3	Conclusions sur le modèle numérique et perspectives	183
	Conclusion	185

TABLE DES MATIÈRES

A	Annexe 1 : Comparaisons entre PCB	189
B	Annexe 2 : Fabrication des éprouvettes métalliques	193
C	Annexe 3 : Procédure de retrait pour nano-indentation	195
D	Annexe 4 : Observations sur métallisations Al et Al-Cu	199
E	Annexe 5 : Distributions de Weibull	203
F	Annexe 6 : Notions de fiabilité	209
	F.0.1 Définition	209
	F.0.2 Spécificités de la fiabilité en mécanique	210
	F.0.3 Fiabilité à l'échelle d'un système	211
	F.0.4 Statistique appliquée à l'essai de chute	211
G	Annexe 7 : Grandeurs utilisées pour estimer la durée de vie des WL-CSP	215
	Glossaire	225

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux

1.1	Méthodes de soudage par fils [1]	31
1.2	Position des composants pour les circuits imprimés de test	45
1.3	Modes de vibrations d'un circuit imprimé de dimensions 100x48x1.6 mm [2]	46
1.4	Variations expérimentales proposées par <i>Zaal et Al.</i> [3]	47
1.5	Propriétés matériaux utilisées dans la simulation par <i>Zaal et Al.</i> [3]	47
1.6	Paramètres recommandés et optionnels pour le test de flexion 4-Points	54
1.7	Paramètres requis pour la machine de test	56
1.8	Paramètres du test en chargement monotone	57
1.9	Influence de l'amplitude de flexion et de la fréquence sur la durée de vie [4]	58
1.10	Conditions et paramètres expérimentaux	59
1.11	Propriétés des matériaux utilisés par <i>Pang et Al.</i> [5] – E est le module d'Young, σ_Y la limite élastique et ν le coefficient de Poisson	62
1.12	Comparaison des masses dans la modélisation de <i>Lall et Al.</i> [6]	63
1.13	Résultats de l'effet d'augmentation de la densité [7]	66
1.14	Propriétés des matériaux utilisés pour la simulation de la chute d'un QFN	66
1.15	Paramètres utilisés lors du test de flexion cyclique [8]	69
1.16	Résultats du test de flexion pour analyse de Weibull – Nombre de cycles à la rupture	70
1.17	Propriétés matériaux utilisées par <i>Hirata et Al.</i> [9]	71
1.18	Propriétés des alliages utilisés pour la simulation par <i>Lai et Al.</i> [10]	71
1.19	Influence de la composition de la brasure sur la tenue mécanique des WL-CSP, <i>Chen et Al.</i> [11]	72
2.1	Synthèse des observations sur les pièces défectueuses	83
2.2	Force de cisaillement – en N - après test de chute	90
2.3	Paramètres de Weibull de 3 distributions statistiques testées dans les mêmes conditions	99
2.4	Influence du système de détection sur l'essai de flexion	100
2.5	Influence de la pré-charge sur la tenue en flexion	100

LISTE DES TABLEAUX

2.6	Influence de la fréquence sur la tenue en flexion	100
2.7	Influence de l'assemblage sur la tenue en flexion	101
3.1	Analyse modale de la vibration d'un circuit imprimé lors du test de chute avec fixation 4 vis	126
3.2	Synthèse des propriétés mécaniques des 3 alliages étudiés à température ambiante	130
3.3	Performances relatives au test de chute sur 1 même boîtier avec 3 types d'alliages	132
3.4	Synthèse des essais pour déterminer l'influence des températures de déposition et de recuit	144
3.5	Propriétés des métallisations mesurées sur les composants	148
3.6	Synthèse des propriétés de composés intermétalliques présentée par <i>Limage et Al.</i>	150
4.1	Propriétés des matériaux utilisés	160
4.2	Descriptions des trois types de structures utilisées pour valider le modèle de fatigue	171
4.3	Description des cas de références et de leurs propriétés	176
4.4	Influence du diamètre de la couche d'adhésion, du plot de cuivre et du diamètre des billes sur la tenue mécanique au test de chute	178
G.1	Variations supposées des données de contraintes	217

Table des figures

1.1	Termes employés	30
1.2	Interconnexions réalisées par soudage par fil	31
1.3	Exemple de composant avec matrice de billes	32
1.4	a) Assemblage de type BGA - b) Assemblage de type WL-CSP	33
1.5	Exemples d'applications	34
1.6	Principales étapes de diffusion	35
1.7	Principe de dépôt par pulvérisation	36
1.8	Schéma d'une interconnexion pour un IPD et position de l'UBM	38
1.9	Principe de relaxation des contraintes par voie chimique	38
1.10	Principe de relaxation des contraintes par voie chimique	39
1.11	a) Exemple d'image aux rayons X - b) Microsection montrant une bulle . . .	40
1.12	Dimensions du circuit imprimé en mm et emplacement des composants . . .	42
1.13	a) Tour de chute - b) Véhicule test avec circuit imprimé monté sur colonnettes	42
1.14	Condition B de la norme JEDEC	43
1.15	Influence de la hauteur de chute sur le pic d'accélération [12]	44
1.16	a) Position des vis et des jauges de déformation - b) Réponse en déformation du circuit imprimé dans la direction longitudinale - Dimensions du circuit imprimé : 100x48x1.6 mm [2]	45
1.17	a) Le circuit imprimé se détache du fond noir - b) Déflexion du circuit imprimé lors de l'impact initial	47
1.18	Schéma des deux structures évaluées par <i>Alajoki et Al.</i> [13]	48
1.19	Images et analyses au microscope électronique à balayage d'une rupture d'un joint de soudure après le test de chute [14]	49
1.20	Méthode éléments finis par analyse dynamique modale - Observation du modèle local [14]	50
1.21	a) Distribution lognormale des défauts en fonction du nombre de chutes - b) Durée de vie en fonction de la déformation plastique équivalente - c) Représentation schématique de la distribution des billes en fonction des cas étudiés - d) Durée de vie normalisée en fonction de la déformation plastique normalisée pour trois cas [14]	51

TABLE DES FIGURES

1.22	Agrandissement de la résistance électrique d'un composant au moment de la défaillance [15]	52
1.23	Localisation d'une fissure dans une interconnexion observée par <i>Lai et Al.</i> [16]	53
1.24	Schéma de flexion 4-Points	54
1.25	Déformations typiques engendrées par l'appui sur des touches de téléphone	55
1.26	a) Circuit imprimé employé par les auteurs – b) Mode de défaillance observé [4]	58
1.27	1) Essai en flexion alternée – 2) 4 fractographies après essais : a) HSCBT sur SnPb b) Test de chute sur SnPb c) HSCBT sur SnAgCu d) Test de chute sur SnAgCu [17]	59
1.28	Comparaison des performances de BGA par le test IPC-9702 [18]	60
1.29	Méthode de test utilisée par Motorola et Advanced Micro Devices [19]	61
1.30	Accélération du nœud central du circuit imprimé à partir de la simulation [5]	63
1.31	Configuration d'un circuit « alternatif » avec deux composants assemblés [20]	64
1.32	Schéma de la méthode dite du « support excitation scheme » [21]	67
1.33	Observation des intermétalliques – A gauche SnAg ₃ Cu _{0.5} et à droite SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni [22]	68
1.34	Observation des fissurations après le test de chute [22]	69
2.1	Schéma d'une interconnexion dans les WL-CSP étudiés	78
2.2	Exemple de positionnement des composants sur un circuit imprimé	78
2.3	Localisation des défaillances dans un WL-CSP par microscopie acoustique (SAM)	79
2.4	a) Fissure dans la passivation, délamination entre aluminium et couche d'adhésion b) Fissure dans la passivation puis dans l'aluminium	79
2.5	Exemple d'observation avec un FIB	80
2.6	Schéma de l'essai de cisaillement	81
2.7	Résultats de cisaillement après mise en étuve	82
2.8	Observation de l'échantillon témoin après cisaillement de la puce côté composant	82
2.9	Observations typiques après cisaillement de la puce côté circuit imprimé	82
2.10	Observations typiques côté composant	83
2.11	Comparaison sur diagramme de Weibull des 4 types d'échantillons	84
2.12	Comparaison des imageries SAM pour les 4 échantillons	85
2.13	Structure du produit - Cas de l'échantillon témoin	85
2.14	Observation après « Dye and Pry » – a) Côté circuit imprimé – b) Côté composant – Entre les deux : plan de symétrie	86
2.15	a) Vue de face du WL-CSP – b) Composant orienté à 52° (tilt)	86

TABLE DES FIGURES

2.16	a) Vue générale de la structure sous la bille après essai de chute – b) Zoom sur une zone d'intérêt	87
2.17	Agrandissement sur la zone présentant des stries	87
2.18	a) Vue générale de la structure sous la bille après essai de chute – b) Zoom sur une zone d'intérêt	88
2.19	Agrandissements de la zone d'intérêt	88
2.20	a) Localisation des 4 points – b) Résultats des analyses chimiques	89
2.21	a) Localisation des 4 points – b) Résultats des analyses chimiques	89
2.22	a) Localisation des 3 points – b) Résultats des analyses chimiques	90
2.23	Faciès de rupture côté board (à gauche) et côté composant (à droite) d'un échantillon témoin	91
2.24	Design des appuis fabriqués pour être montés sur la machine de test de flexion	93
2.25	Schéma de câblage du pont de Wheatstone au boîtier Böse	94
2.26	Méthode pour la microsection en L [7]	95
2.27	Système de chargement, position de la jauge de déformation et de la nappe de fils électriques pour le suivi des résistances des chaînes électriques	96
2.28	Répétabilité du déplacement des appuis de chargement en fonction du nombre de cycles (les quatre couleurs sont superposées)	97
2.29	Observation de la variation de la résistance d'une chaîne électrique simplifiée	97
2.30	Evolution de la déformation en fonction du numéro de cycle	98
2.31	a) Mesure du déplacement (précision de $\pm 1\mu\text{m}$) b) Mesure de la déformation en fonction de la pré-charge	98
2.32	Micro-section au niveau d'une interconnexion	101
2.33	Observation par microscopie acoustique d'une chaîne électrique après essai de flexion	102
2.34	Courbe en baignoire avec les 3 comportements en fiabilité	103
2.35	Exemple de chaîne électrique – a) Billes reliées par des pistes d'aluminium sur la puce – Au milieu, plot de cuivre sur le circuit imprimé – b) Vue en coupe du composant assemblé sur circuit imprimé, et représentation schématique du passage du courant électrique	105
2.36	Exemple sur un IPAD 7x7 avec un pas de $400\mu\text{m}$ avec $1.5\mu\text{m}$ d'Al, $0.8/0.4\mu\text{m}$ de passivation USG/PSG et bille en $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ – l'agrégation de 99 points permet de faire apparaître un effet de courbure	106
2.37	Cumul d'environ 200 pièces sur ces 3 statistiques – 200, 350 et 480 correspondent aux températures de déposition de l'AlCu	107
2.38	Comparaison de 15 essais du test de chute pour 2 alliages en fonction de 3 critères	108
2.39	Exemple de courbe contrainte (σ)-déformation (ε) sous sollicitation monotone [23]	109
2.40	Schéma d'une boucle d'hystérésis contrainte-déformation	110

TABLE DES FIGURES

2.41	Courbe de contrainte de Wöhler représentant en échelle semi-logarithmique la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles de chargement . . .	112
2.42	Exemple de fissure initiée après test de flexion	118
3.1	Présentation du viscoanalyseur VA2000	124
3.2	Variation de la rigidité en fonction de la fréquence - Réponse d'un circuit imprimé Aspocomp conception ST avec un pas de 500 μm	125
3.3	Variation du module E en fonction de la fréquence - Réponse d'un circuit imprimé Aspocomp conception ST avec un pas de 500 μm	126
3.4	Exemple de mesures en flexion 3-points à plusieurs températures et fréquences sur circuit imprimé	128
3.5	Equivalent temps/température sur circuit imprimé Ibidem conception ST avec un pas de 500 μm Mesures entre -125 °C et + 50 °C – L'échelle de gauche correspond aux points de mesures en rouge et l'échelle de droite à ceux en bleu	128
3.6	Schéma et dimensions des éprouvettes de traction	129
3.7	Relevé de températures du moule lors de son passage dans le four	129
3.8	Essais de traction statique sur $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ température ambiante sur 5 éprouvettes	130
3.9	Superposition des courbes moyennes de traction pour les 3 alliages : température ambiante	131
3.10	Limite conventionnelle à 0.2 % de déformation en fonction de la température pour 3 alliages	133
3.11	Résistance mécanique en fonction de la température pour 3 alliages	134
3.12	Description de la géométrie utilisée dans le modèle d'Oliver et Pharr [24] . .	134
3.13	Courbe force-pénétration et grandeurs utilisées dans l'analyse mécanique O&P	136
3.14	Schéma de principe du nanoindenteur Micro Materials Ltd (NanoTest) utilisé [25]	137
3.15	Exemples schématiques de courbes force-déplacement pour plusieurs propriétés et comportements de matériaux [26]	139
3.16	a) Etat de surface sur un WL-CSP de 5x5 billes avec un pas de 500 μm – b) Etat de surface sur une plaquette recouverte uniquement et totalement d'USG	140
3.17	A gauche mesures sur BCB polymérisé à 85 % - A droite sur BCB polymérisé à 100 % - En abscisses la profondeur d'indentation (nm) et en ordonnées la force (en mN)	141
3.18	Nanoindentation sur passivation PBO	142
3.19	Observation des empreintes sur BCB	143
3.20	Comparaison de 2 séries de charge-décharge sur l'alliage Al-Cu déposé à 450 °C (en bleu) et celui déposé à 350 °C et recuit à 480 °C (en rouge)	145

TABLE DES FIGURES

3.21	Comparaison d'un alliage AlCu déposé à 480 °C puis recuit à 450 °C, sur oxyde thermique en bleu et sur oxyde PECVD en rouge	145
3.22	Courbes d'hystérésis pour l'Al-Cu	147
3.23	Observation des indentations sur Al-Cu - a) Vue générale - b) Agrandissement	147
3.24	Reconstitution 3D des empreintes d'indentations sur Al-Cu - a) Vue générale - b) Agrandissement	148
3.25	a) Bille avec IMC après électromigration – b) Bille indentée avec 4 zones de multi-chargement (encerclée de rouge)	149
3.26	Cycle d'hystérésis en multi-chargement sur IMC	149
4.1	Représentation schématique des règles d'écrouissage (repère avec deux contraintes principales)	157
4.2	Comparaison des propriétés matériaux simplifiées avec celles mesurées pour les deux alliages modélisés de la bille de brasure	161
4.3	Structure comprenant, du haut vers le bas, Sn – Intermétalliques – Ti/Ni/Cu – Oxyde	163
4.4	Quart du circuit imprimé et de la puce représentés, les plans de symétries sont indiqués	164
4.5	a) Modèle statique avec déflexion au centre du circuit imprimé – b) Modèle statique avec flexion répartie sur l'ensemble du circuit imprimé	164
4.6	Structure sur Silicium d'une « technologie » de WL-CSP	166
4.7	Les zones sélectionnées en rouge sont utilisées pour l'interpolation des nœuds entre modèle global et modèle local	167
4.8	Représentation temporelle de l'accélération appliquée en dynamique	168
4.9	Influence du pas de temps sur la flèche maximale et la déformation maximale au centre du circuit imprimé	168
4.10	Éléments SOLID186 à 20 nœuds monocouche	169
4.11	Comparaison de la déformation plastique dans la brasure en fonction de l'ouverture de la passivation et du type d'élément utilisé	169
4.12	Distribution des déformations plastiques dans la bille, vue depuis le silicium	171
4.13	Distribution des contraintes normales en Pa dans la métallisation Al-Cu, vue depuis le circuit imprimé	172
4.14	Distribution des contraintes selon z, en Pa, dans la passivation	172
4.15	Distribution des déformations plastiques dans le plot de cuivre	172
4.16	Distribution des contraintes selon z, en Pa, dans les intermétalliques	173
4.17	Schéma localisant les extremums de contraintes observées dans la simulation, vue en coupe d'un WL-CSP – En rouge les contraintes positives et en bleu les contraintes négatives	173
4.18	Schéma de la courbe de plasticité d'un métal	175

TABLE DES FIGURES

4.19	Relation entre la durée de vie des structures de références et la déformation plastique maximale calculée dans la brasure	177
4.20	Estimation de la durée de vie des composants en fonction de la taille de la matrice de billes	179
4.21	Estimation de la durée de vie en fonction de la disposition des billes sur le composant	179
4.22	Influence du diamètre du plot d'aluminium sur la tenue au test de chute . .	180
4.23	Influence de l'épaisseur de la puce en silicium sur la tenue mécanique du composant	181
4.24	Influence du matériau utilisé pour la puce sur la tenue mécanique du composant	182
4.25	Estimation de l'influence du module d'Young du circuit imprimé sur la tenue mécanique des WL-CSP au test de chute	182
A.1	Schéma de découpe du PCB Client	189
A.2	Caractérisation du module réduit pour le PCB Client pitch 500 μm en fonction de la zone étudiée et pour deux forces de sollicitation dynamique	190
A.3	Caractérisation du module réduit pour le PCB ST Microelectronics pitch 500 μm en fonction de la zone étudiée et pour deux forces de sollicitation dynamique	190
A.4	Comparaison des PCB en fonction du design, du fournisseur et de la référence	191
A.5	Découpage d'un PCB Client pitch 500 perpendiculairement au découpage précédent	191
B.1	Moule graphite	194
B.2	Eprouvette moulée vue aux Rayons X	194
C.1	Techno B	195
C.2	Techno D	196
C.3	Techno C	196
C.4	Techno C	196
C.5	Techno D	197
C.6	Techno B	197
C.7	Techno B	197
C.8	Techno C	198
C.9	Vérification du retrait par tests électriques sur les pistes.	198
D.1	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C	199
D.2	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C	200
D.3	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C et ayant vu le budget thermique de la passivation	200
D.4	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C et recuit à 450 °C	200

TABLE DES FIGURES

D.5	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 200 °C	201
D.6	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C	201
D.7	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C recuit à 450 °	201
D.8	AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C recuit à 450 °	202
E.1	Essai de répétabilité du test de flexion dans les conditions JEDEC avec 1 N de pré-charge et une fréquence de sollicitation de 1 Hz	203
E.2	Distribution 1 avec les intervalles de confiance	204
E.3	Distribution 2 avec les intervalles de confiance	204
E.4	Distribution 3 avec les intervalles de confiance	205
E.5	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 13117 cycles	205
E.6	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 1 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10005 cycles	206
E.7	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, enregistreur	206
E.8	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 0 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10664 cycles	207
E.9	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 1 N, fréquence 3 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10111 cycles	207
E.10	Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 12298 cycles et assemblage par flux	208
F.1	Fonction de fiabilité	209
F.2	Comparaison de l'évolution du taux de défaillance en électronique (à gauche) et en mécanique (à droite)	211
F.3	Effet du facteur de forme β sur la densité de probabilité	212
F.4	Effet du facteur d'échelle η sur la <i>pdf</i>	213
F.5	Effet du paramètre de position γ sur la pdf <i>pdf</i>	213
F.6	Taux de défaillance dans le cas d'une seule population a) Un seul niveau de contraintes – b) Taux de défaillance dans le cas de deux niveaux de contraintes	214

TABLE DES FIGURES

Introduction

Dans le domaine de l'électronique, les efforts de recherche ont porté sur la miniaturisation des composants et l'intégration d'un nombre croissant de fonctions en une seule pièce. Ces travaux permettent aujourd'hui d'industrialiser des produits intégrés pour un coût très réduit. En parallèle les applications électroniques ont connu un essor et une démocratisation à l'échelle mondiale, en particulier pour les applications nomades. Le composant étudié est largement employé dans la téléphonie mobile, et plus généralement dans les appareils portatifs. Ces appareils subissent au cours de leur cycle de vie diverses contraintes : variations de température, d'humidité et sollicitations mécaniques. Les recherches sont focalisées sur les sollicitations mécaniques qui peuvent être : les chocs accidentels et l'usure progressive liée aux pressions répétées de l'utilisateur sur les touches de clavier.

Au niveau de l'application, les fabricants de téléphones mobiles cherchent à diminuer le nombre de retours clients, ou tout au moins à ne pas les augmenter. En effet, plus le nombre de fonctions augmente et plus la taille des interconnexions dans les composants électroniques est réduite. En conséquence, ceux-ci résistent moins bien aux sollicitations mécaniques, à structure comparable. A cette tendance de fond s'ajoute une préoccupation environnementale : le plomb traditionnellement présent dans les interconnexions est maintenant pratiquement interdit. Aussi, des recherches ont été menées pour sélectionner une alternative acceptable à cet élément et l'alliage ternaire retenu est SnAgCu avec des proportions proches de l'eutectique. La recherche porte donc sur l'amélioration de la résistance des composants électroniques pour diminuer le nombre de retours clients tout en satisfaisant les contraintes décrites.

Le travail présenté ici porte sur le boîtier d'un composant IPAD (Integrated Passive and Active Device). Les composants passifs assurent des fonctions de filtres ou de protection (pour les décharges électrostatiques) et d'autres fonctions incluant du traitement analogique. En réalité, on s'intéresse plus précisément aux interconnexions, indépendamment de sa fonction. Cette interconnexion est constituée d'un plot d'aluminium protégé par une passivation, d'une couche multifonction (adhésion, barrière chimique, etc.) ainsi que d'une bille en alliage SnAgCu. Cette structure permet un gain de place important, c'est pourquoi on retrouve ce type d'interconnexion dans de nombreux appareils portables.

Pour être testé, le composant est monté sur circuit imprimé puis l'ensemble est sollicité mécaniquement de deux manières. Soit le chargement mécanique correspond à celui d'une chute représentative pour un composant à l'intérieur d'un appareil portable. Soit le chargement correspond à une flexion typique de l'appui sur les touches de l'appareil. Dans tous les cas on utilise les standards spécifiques appelés JEDEC (pour Joint Electronic and

Device Engineering Council). Ces essais standardisés font partie du travail présenté ici dans le sens où les bancs de tests ont été instrumentés et un banc de flexion a été mis en place. Ensuite les résultats sont traités de façon statistique et sous la forme d'analyses de défaillances (micro-sections, observations au microscope électronique à balayage, etc.). Ces analyses ont permis de déterminer les points critiques de la structure et de visualiser la propagation d'une fissure ou de détecter d'autres défauts éventuels.

La simulation par éléments finis est largement adoptée pour modéliser les phénomènes qui ont eu lieu lors de ces essais mécaniques. Cependant de nombreuses difficultés limitent l'exploitation de cet outil. En premier lieu la connaissance des propriétés des matériaux est imparfaite : les alliages ternaires sont rarement caractérisés pour de fortes vitesses de déformations, la technique de dépôt de l'alliage d'aluminium et sa faible épaisseur confèrent à celui-ci un comportement différent du comportement qu'aurait un matériau massif et les passivations sont des matériaux spécifiques. D'autre part la méthodologie même est difficile à mettre en place, on peut difficilement mesurer l'avance d'une fissure dans la structure de l'interconnexion ou même visualiser des stries de fatigue. Il s'agit donc de rechercher une approche applicable dans cette situation. Enfin la simulation numérique pose des problèmes quant aux choix à effectuer pour simplifier le calcul tout en conservant un résultat qui ait un sens d'un point de vue physique.

La finalité des travaux présentés ici est de pouvoir évaluer finement la tenue mécanique des interconnexions (soumises aux tests de chute et de flexion) pour envisager ou au contraire renoncer à développer des innovations technologiques. Ils doivent aussi apporter des pistes de réflexion pour comprendre quels paramètres ont une influence majeure sur la tenue en fatigue de la technologie standard actuellement utilisée.

Cette étude s'articule en quatre parties. Le premier chapitre commence par décrire le boîtier du composant étudié. En effet, la structure et la méthode de fabrication ont une influence notable sur la tenue mécanique en fatigue. De plus, il existe plusieurs méthodes pour déposer les billes ou encore pour assembler le composant sur le circuit imprimé. On retrouve ces méthodes ainsi que d'autres paramètres concernant l'influence sur la tenue à la chute et à la flexion du composant dans l'état de l'art. Des résultats sur des composants proches de ceux étudiés sont aussi présentés car les études sont très nombreuses et une partie est comparable à la problématique exposée ici. Les essais sont présentés de façon détaillée dans le Chapitre 2. Celui-ci inclut des mesures sur le banc du test de chute, ainsi que la mise en place du banc de flexion. Une réflexion sur les modèles statistiques est initiée car des paramètres d'une distribution statistique servent ou peuvent servir de critères pour évaluer la tenue en fatigue du composant étudié.

Le troisième chapitre regroupe les mesures visant à caractériser les matériaux impliqués dans les tests de fiabilité mécanique. Deux techniques sont mises en œuvre selon l'échelle du matériau considéré. Ainsi, plusieurs modèles de circuits imprimés et plusieurs alliages sans-plomb sont mesurés avec un analyseur mécanique dynamique (DMA). D'autre part, les couches fines déposées sur la plaquette de silicium sont mesurées sur de très faibles profondeurs, de l'ordre de la centaine de nanomètres, par la technique de nano-indentation.

Ces propriétés matériaux sont ensuite exploitées dans un modèle de simulation numérique exposé dans le quatrième chapitre. L'objectif principal de ce chapitre est de discuter les hypothèses à retenir dans le cadre de la modélisation des essais de chute et de flexion.

INTRODUCTION

Le modèle numérique pour le test de chute est plus avancé que celui du test de flexion, par ailleurs de nombreux résultats de fiabilité existent pour le test de chute. En conséquence la discussion porte ensuite sur les modèles de fatigue qui peuvent être utilisés et les facteurs qui influencent les résultats de simulation. Un modèle de fatigue particulier est utilisé pour exploiter les données statistiques disponibles. Ce modèle est couplé à la simulation pour ensuite présenter des solutions technologiques actuellement en évaluation.

Première partie

Présentation de la technologie et état de l'art

Chapitre 1

Mise en boîtier des composants

Dans ce chapitre on décrit les informations nécessaires concernant les composants testés, on précise également les termes employés. La première partie met en perspective l'évolution des boîtiers électroniques pour situer le WL-CSP (Wafer-Level Chip-Scale Package) dans un cadre plus général. La deuxième partie décrit plus précisément la structure de ce type de composant. Les étapes de fabrication qui figurent dans la troisième partie permettent de situer les étapes de diffusion par rapport aux étapes de finition. Enfin, le circuit imprimé est un élément essentiel des tests de fiabilité étudiés ici, on présente donc l'étape d'assemblage du composant sur celui-ci.

1.1 La mise en boîtier

1.1.1 Introduction

Si on fait l'analogie d'un composant électronique avec le corps humain, alors la puce en serait le cerveau et le boîtier (package) le reste du corps. En effet, le rôle du boîtier est de permettre à la puce de communiquer avec son environnement, de lui apporter de l'énergie et de la protéger.

Le schéma de la figure 1.1 précise les termes employés par la suite ainsi que le processus de fabrication. La plaquette est l'élément de base à partir duquel les puces sont produites. Cette plaquette doit ensuite être découpée par sciage pour séparer chacun de ses éléments. Le terme de « boîtier » est générique et regroupe une grande diversité de procédés pour assurer les fonctions suivantes :

- Protéger la puce
- Lui permettre de communiquer avec d'autres éléments
- L'alimenter électriquement

Pour de nombreuses technologies, le processus de mise en boîtier est le suivant : production d'une plaquette, découpe de celle-ci puis mise en boîtier.

Le processus pour fabriquer un WL-CSP - boîtier décrit plus précisément par la suite - est différent car cette mise en boîtier consiste à souder des billes de brasure. Les billes sont déposées directement sur la plaquette puis refondues pour qu'elles puissent adhérer aux puces. La séparation des composants par sciage intervient ensuite. L'ensemble formé par la

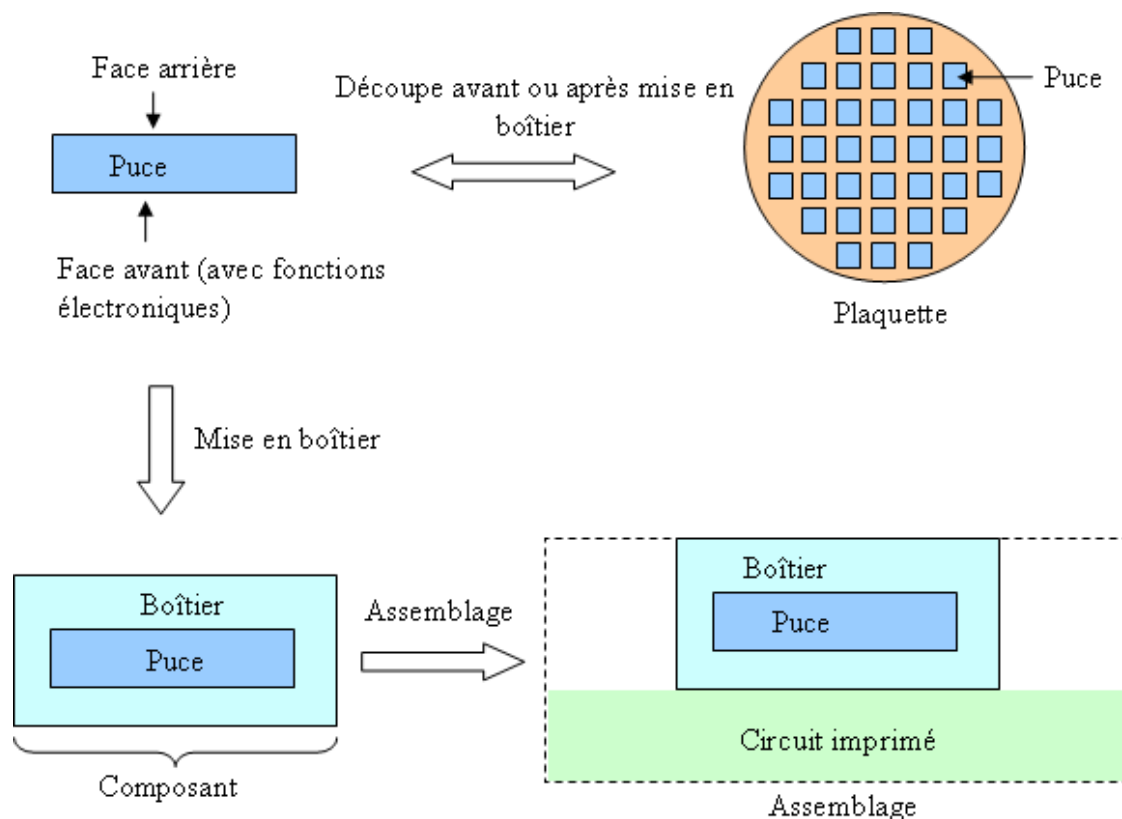


FIG. 1.1 – Termes employés

puce et son boîtier forment le composant. Celui-ci constitue une des briques élémentaires pour les produits connus du grand public tels que les téléphones. Le processus de mise en boîtier sur la plaquette est nommé « Wafer-Level ». Par analogie, les tests dits « Board-Level » consistent à appliquer une sollicitation à l'assemblage (i.e. composants assemblés sur circuit imprimé). De part leur taille réduite, les WL-CSP peuvent être assemblés sur d'autres composants au lieu d'être assemblés sur circuit imprimé, dans ce cas ils sont nommés « Flip-Chips ».

1.1.2 Le soudage par fil

Cette technique est brièvement présentée pour mettre en perspective l'évolution des boîtiers en électronique. Le soudage par fil est une technique d'interconnexion électrique qui utilise des fils fins et une combinaison d'énergies sous forme de chaleur, de pression et d'ultrasons. Il s'agit d'un procédé de soudure en phase solide pour lequel les deux métaux en contact (le fil et le plot) sont fortement liés. Une fois les métaux en contact, le partage d'électrons et la diffusion d'atomes permet la formation de la soudure. La chaleur permet d'accélérer la diffusion interatomique et donc la formation d'une soudure. Les procédés de soudage par fil peuvent être classés en trois catégories comme le montre le tableau 1.1 [1].

Concernant les plots, le revêtement peut aussi être en Pd ou Ag pour les fils en or, il

1.1. LA MISE EN BOÎTIER

Soudage par fil	Pression	Température	Energie ultrasonique	Fil	Plot
Thermocompression	Elevée	300-500 °C	Non	Au	Al, Au
Thermosonique	Basse	100-150 °C	Oui	Au	Al, Au
Ultrasonique	basse	25 °C	Oui	Au, Al	Al, Au

TAB. 1.1 – Méthodes de soudage par fils [1]

peut être en Cu, Ni, etc. pour les fils en aluminium. Il existe deux formes basiques de fils de soudure : la forme « ball bond » et la forme « wedge bond » auxquelles correspondent des techniques et des matériaux spécifiques. Actuellement le soudage thermosonique avec des « ball bonds » en or est le plus répandu car cette technique est plus rapide qu'avec de l'aluminium. Le soudage par fil est un procédé peu coûteux car il n'est pas utile de modifier la puce.

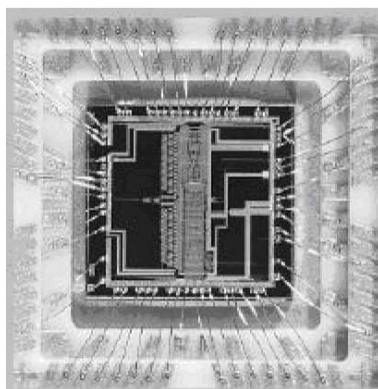


FIG. 1.2 – Interconnexions réalisées par soudage par fil

La principale limitation du soudage par fil est due à l'organisation des fils autour du composant, comme l'illustre la figure 1.2. En effet, il y a un risque de court-circuit si ceux-ci sont mal positionnés. Il existe d'autres limitations, citons la tenue en courant liée à la taille du fil et des phénomènes électriques parasites pour les circuits avec des courants radio fréquence (RF)

1.1.3 Les boîtiers avec matrice de billes

A l'origine, l'appellation CSP était l'abréviation pour « Chip Size Packaging » (boîtier de la même taille que la puce) mais très peu de boîtiers sont vraiment de la taille de la puce. La signification de l'acronyme a donc évolué, il veut maintenant dire « Chip Scale Packaging » : boîtier à l'échelle de la puce. D'après la norme IMC J-STD-012 un CSP doit avoir une aire inférieure ou égale à 1.2 fois la surface du silicium et doit être directement assemblé en surface. Au contraire de la plupart des types de boîtiers, la dénomination CSP ne contient aucune information sur la fonction pour laquelle le boîtier est construit. C'est pourquoi on trouve dans ce groupe probablement moins de caractéristiques communes que dans les autres groupes de boîtiers. Tous les boîtiers qui satisfont les conditions dimensionnelles et

la capacité de montage en surface sont appelés des CSP. Le boîtier BGA (pour Ball Grid Array : matrice de billes) est un type de CSP intéressant pour comprendre le principe de fonctionnement d'un WL-CSP. La tendance actuelle pousse à la fois à la miniaturisation, à des performances supérieures et à des produits plus petits et plus légers, raisons pour lesquelles ce type d'interconnexion a été développé.

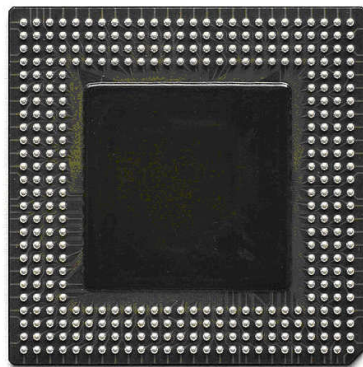


FIG. 1.3 – Exemple de composant avec matrice de billes

Un boîtier BGA (sur la figure 1.3 on peut voir les billes en face arrière du composant) est en fait une puce posée sur un substrat. Des fils relient la face avant de celle-ci au substrat qui véhicule le courant électrique dans les billes, l'ensemble est moulé dans une résine. Chaque bille constitue une interconnexion. Ce boîtier peut en général être caractérisé par les éléments suivants :

- C'est un boîtier pour des applications de composants montés en surface
- C'est un boîtier « surfacique », c'est-à-dire qu'il utilise tout ou partie de l'empreinte (footprint) du composant pour les interconnexions
- Les interconnexions sont constituées de billes (sphères), d'alliages de soudure ou parfois d'autres métaux

Le principal inconvénient est lié au fait que les billes ne peuvent pas absorber les efforts liés aux flexions du circuit imprimé aussi bien que le ferait une plus longue connexion. Les efforts sont créés par la différence entre les coefficients de dilatation thermique entre le circuit imprimé et le BGA, ceci génère une contrainte thermique. Les essais mécaniques de chutes et de flexion produisent la flexion du circuit imprimé comme cela sera décrit par la suite. D'autre part, lorsqu'un BGA est soudé, il est très difficile de vérifier visuellement la qualité de l'ensemble des soudures. A cet effet on utilise des rayons X ou des microscopes particuliers (tels que le microscope acoustique) mais ces techniques sont coûteuses.

1.1.4 Description d'un WL-CSP et applications

Afin de répondre à une demande de miniaturisation de plus en plus importante des circuits imprimés, DELCO et IBM ont développé un assemblage miniaturisé : le WL-CSP. Celui-ci consiste à souder directement la puce sur le circuit imprimé sans substrat intermédiaire. Le WL-CSP supprime ainsi le volume inutile dans les assemblages classiques. Le schéma de la figure 1.4 illustre la façon dont le WL-CSP permet de réduire la surface des composants. La répartition des billes de brasure sur la face avant définit l'empreinte

1.1. LA MISE EN BOÎTIER

du composant, celle-ci doit correspondre avec l’empreinte du PCB sur lequel ce composant est assemblé. La face contenant les fonctions électroniques doit être orientée vers le circuit imprimé pour permettre cet assemblage, c’est l’origine du nom « Flip-Chip ».

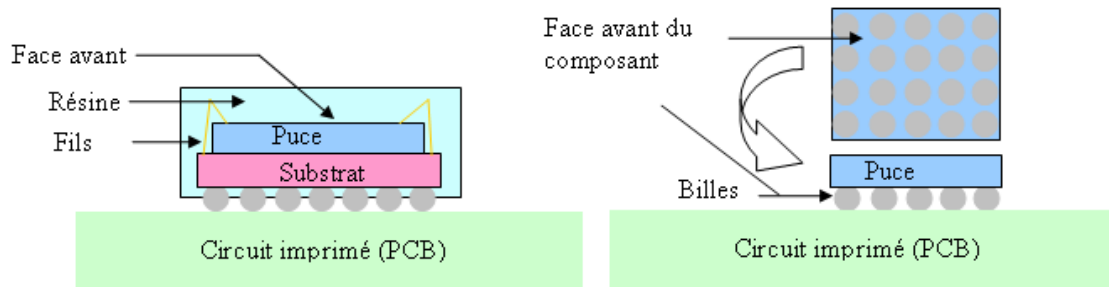


FIG. 1.4 – a) Assemblage de type BGA - b) Assemblage de type WL-CSP

Les puces semi-conductrices sont fabriquées sur silicium, les composants passifs peuvent être déposés sur d’autres matériaux : verre, AsGa, saphir, etc. Les puces sont connectées directement au circuit par les billes, métal d’apport de la brasure. Ces connexions sont en alliage SnPb ou en SnAgCu (principal alliage sans-plomb). Chaque puce peut réaliser une fonction simple (diode, filtre, ...) ou une fonction électronique plus complexe (microprocesseur ou circuit dédié).

Les Flip-Chips fabriqués par STMicroelectronics sont relativement gros par rapport aux possibilités technologiques pour simplifier le montage sur les chaînes de production. Leurs tailles s’adaptent aux équipements de fabrication utilisés habituellement pour la pose de boîtiers électroniques classiques sur les circuits.

Les Flip-Chips avec un pas (pitch) inférieur à $300\text{ }\mu\text{m}$ sont très peu utilisés dans l’industrie car ils sont trop petits et donc trop difficiles à assembler sur des circuits imprimés. Désormais, ils sont surtout montés sur les CSP pour créer des fonctions plus complexes.

Les billes sont des métaux d’apport qui permettent d’assembler mécaniquement et électriquement la puce par brasure sur le circuit imprimé tout en assurant la conduction du courant entre ces deux éléments. Ces billes tiennent à la puce grâce à un dépôt réalisé sur le substrat d’accueil dont les éléments diffusent avec les éléments des billes pour former à l’interface un intermétallique.

En électronique, les brasures doivent :

- Être refondues d’après un profil de température idéal pour le brasage en appliquant une température uniforme sur l’ensemble de la plaquette.
- Ne pas avoir une température de fusion trop élevée :
 - a) Afin de garder toutes les qualités des composants et des cartes. Ainsi, il ne faut pas dépasser $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ lors des phases de refusion.
 - b) Il est important de garder un intervalle de température le plus grand possible entre le solidus et les conditions d’utilisation afin de ne pas dégrader prématurément la brasure.
- Assurer une bonne mouillabilité avec les traces de métaux se trouvant sur les circuits et sur la puce. L’alliage doit avoir une bonne affinité avec les métaux tels que : Cu, Au, Ag, Sn, Ni.

1.2. ETAPES DE FABRICATION

- Doivent résister aux contraintes mécaniques et thermomécaniques :
 - a) La sollicitation principale que subissent les joints brasés est la contrainte de cisaillement liée aux différences de coefficients de dilatation thermique des éléments en présence, pendant les variations de températures que peut subir le système.
 - b) Ce phénomène est souvent combiné avec des vibrations et/ou des chocs.
 - c) Il faut donc chercher une microstructure métallurgique permettant d'amortir ces déformations (structure fine et croissance d'intermétalliques faibles)
- L'alliage doit respecter les conditions environnementales : pour cette raison l'utilisation du Pb dans les alliages est interdite en Europe (depuis 2006).

Pour répondre à tous ces critères, STMicroelectronics réalise des brasures avec l'alliage $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$, proche de l'eutectique. La température de fusion à l'eutectique est de 217°C pour une composition de 3.38 % de Ag et 0.84 % de Cu.

A température ambiante cet alliage eutectique est composé de trois phases : la matrice d'étain, les précipités de Cu_6Sn_5 , de Cu_3Sn et de Ag_3Sn .

Les CSP sont largement utilisés dans de nombreuses applications :

- Produits de grande consommation (par exemples des modules de montres)
- Modules électroniques dans l'automobile
- Récepteurs et produits radio
- Télécommunications (systèmes réseaux, produits sans fils), etc.



FIG. 1.5 – Exemples d'applications

Les composants fabriqués à Tours peuvent être des IPD (pour Integrated Passive Device : composants passifs intégrés) ou des IPAD (Integrated Passive and Active Device : composants passifs et actifs intégrés). Leurs applications sont principalement celles des applications portables comme les téléphones, baladeurs audio, assistants personnels, etc. (cf. figure 1.5) : protections, filtres, amplificateurs, etc.

1.2 Etapes de fabrication

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

1.2. ETAPES DE FABRICATION

démontré par la suite. D'autre part, dans un WL-CSP les étapes de fabrications (diffusion et finition) sont très proches, l'explication qui suit doit aider à faire le lien entre ces deux étapes.

1.2.1 Etapes de diffusion : procédés de dépôts

Les différents dépôts ont une influence notable sur la résistance mécanique des composants. De nombreux paramètres liés aux procédés interviennent. Pour cette raison cette partie développe les techniques utilisées pour déposer les couches métalliques ainsi que les couches isolantes et protectrices.

1.2.1.1 Dépôts de passivation

Les oxydes et passivations (diélectriques) sont généralement déposés par des procédés de photogravure tels que celui décrit sur la figure 1.6. Les variations dans le procédé peuvent être liées aux températures utilisées, à la finesse des motifs du masquage ainsi qu'au type de résine, certaines résines étant dédiées aux couches épaisses par exemple.

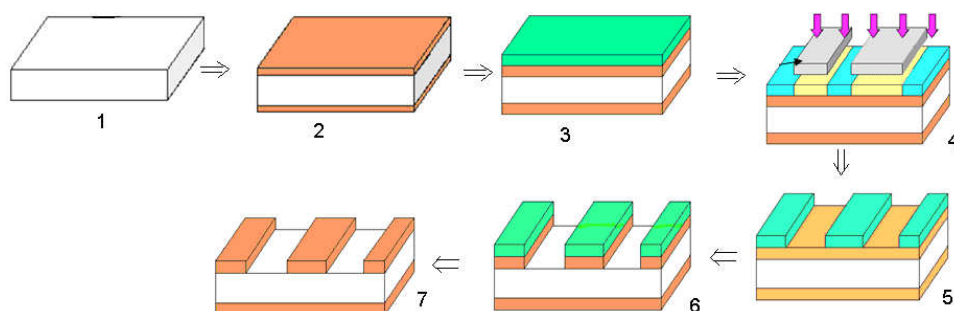


FIG. 1.6 – Principales étapes de diffusion

On peut voir sur la figure 1.6 la décomposition des étapes :

1. Préparation du support de base : substrat en silicium
2. Oxydation : comme il est impossible d'oxyder partiellement une plaquette, celle-ci est oxydée (SiO_2) sur toute sa surface, puis les zones non désirées sont retirées par un procédé de photogravure. Cette ouverture de zones dans l'oxyde permettra la diffusion (dopage) future des plaquettes.
3. Dépôt de résine : la plaquette est recouverte d'un film de résine photosensible.
4. Insolation – Photolithographie : on procède à l'alignement (manuel ou automatique) d'un masque sur la plaquette afin de cacher certaines parties de celles-ci. Seules les parties non masquées vont réagir aux rayons UV : la résine se polymérise.
5. Développement : lorsqu'on utilise de la résine négative, seules les zones non exposées aux UV (c'est-à-dire masquées) seront dissoutes et éliminées au développement. Pour les résines positives, c'est l'inverse.
6. Gravure : on fait une gravure (attaque par plasma) pour obtenir l'ouverture de l'oxyde qui permettra la diffusion dans les zones choisies.

1.2. ETAPES DE FABRICATION

7. Retrait de la résine : à présent, la résine restante est devenue inutile, on l'élimine totalement.

Après ces étapes, on obtient un silicium recouvert en face avant d'un revêtement dont le motif est défini par les ouvertures dans le masque à l'étape n°4.

Certains phénomènes sont propres aux dépôts organiques, en particulier on note un phénomène de plissage lors de l'empilement de plusieurs couches. Ceci est dommageable pour l'état de surface final mais aussi pour l'adhésion entre deux couches de ce diélectrique.

Notons également que les dépôts organiques sont dits « planarisants », le relief créé par les couches inférieures disparaît dans la mesure où l'épaisseur de ce dernier dépôt est suffisante. Cela est lié à leurs propriétés ainsi qu'à la méthode de dépôt. A l'inverse les dépôts de types minéraux, nommés USG (Undoped Silicate Glass) ou PSG (Phospho-Silicate Glass) ne sont pas planarisants, il y a donc un effet lié au « passage de marche » lorsqu'un relief est rencontré. Ce passage de marche génère des imperfections et éventuellement des amorces de fissures.

1.2.1.2 Dépôts de métallisations

Les métallisations peuvent être déposées selon plusieurs méthodes, selon les vitesses de dépôt attendues ou selon leurs natures. Dans le cas d'une métallisation en aluminium ou aluminium-cuivre, il s'agit d'un dépôt de type PVD (pour Physical Vapor Deposition : dépôt physique en phase vapeur).

Le dépôt physique en phase vapeur fait partie de la catégorie des dépôts sous vide, c'est un terme général qui décrit un ensemble de méthodes pour déposer des films minces par la condensation d'un matériau vaporisé sur diverses surfaces. La méthode de revêtement implique des processus purement physiques tels que l'évaporation à haute température sous vide ou le bombardement plasma plutôt que d'impliquer des réactions chimiques comme pour les revêtements CVD (Chemical Vapor Deposition : dépôt chimique en phase vapeur). Les différentes variantes de PVD incluent :

- Le dépôt par évaporation
- Le dépôt par évaporation sous faisceau d'électrons
- Le dépôt par pulvérisation illustré par la figure 1.7
- Le dépôt par arc cathodique
- Le dépôt par laser pulsé

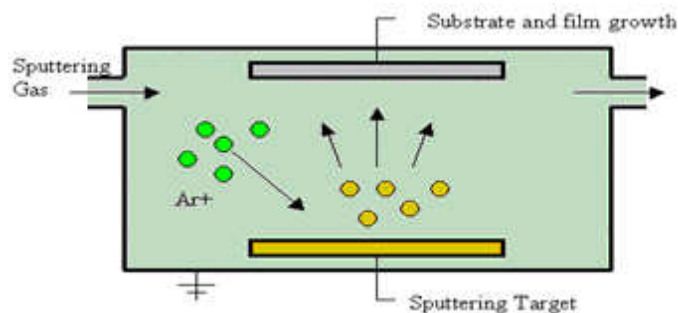


FIG. 1.7 – Principe de dépôt par pulvérisation

1.2. ETAPES DE FABRICATION

La méthode PVD plus spécifiquement utilisée pour le dépôt d'aluminium est la pulvérisation dont le principe est illustré sur la figure 1.7. Cela signifie que le revêtement est obtenu en éjectant un matériau d'une cible – donc d'une source – qui se dépose ensuite sur un substrat tel que le silicium de la plaquette. Le gaz de pulvérisation est généralement un gaz inerte comme l'argon. De nombreux paramètres sont ajustables dans cette technique comme la nature du gaz utilisé, sa pression, la tension employée, le matériau de la cible, etc. Ceci en fait une technique complexe, mais qui permet aux experts beaucoup de liberté quant au contrôle de la croissance et de la microstructure du film.

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

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

Les interconnexions des WL-CSP étudiés dans ce travail sont reliées par des pistes d'aluminium déposées par pulvérisation. Dans la partie concernant la caractérisation des matériaux par nano-indentation, les propriétés de l'aluminium déposé par pulvérisation et évaporation seront comparées.

1.2.2 Etapes de finition

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

- Procédé Front-End final : UBM¹
- Meulage arrière
- Relaxation des contraintes
- Billage (soudure de billes)
- Marquage laser
- Découpe
- Inspection visuelle à 100 % et test électrique
- Mise en bande et en cassette

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

La couche nommée UBM – sur la figure 1.8 – constitue une couche d'adhésion entre le plot de la plaquette en Al et la bille. Cette structure est en fait une superposition de couches métalliques dont chacune a un rôle précis. Le Ti favorise l'adhésion, le Ni est une barrière de diffusion, le Cu permet de saturer localement pour limiter la diffusion de Cu

¹UBM = Under Bump Metallization, empilement complexe de couches métalliques assurant plusieurs fonctions

1.2. ETAPES DE FABRICATION

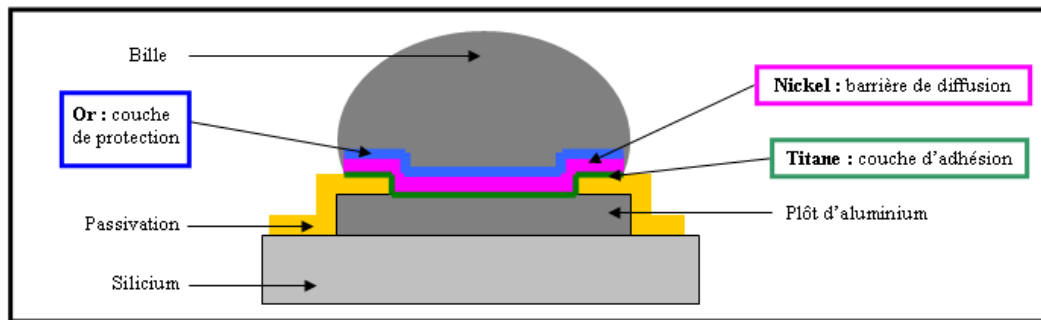


FIG. 1.8 – Schéma d'une interconnexion pour un IPD et position de l'UBM

de la bille et l'Au permet de protéger contre l'oxydation.

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

- Comme l'épaisseur de Si est plus faible, les contraintes liées aux différences de coefficients thermiques entre les couches déposées peuvent se relaxer et provoquent la courbure du wafer. On parle alors de warp ou de bow, selon l'orientation de la courbure.
- Des microfissures et une forte rugosité sont générées en face arrière, ces microfissures génèrent aussi des concentrations de contraintes locales et donc participent à la courbure de la plaquette.
- Enfin la plaquette est fixée sur un adhésif pour cette opération, le retrait de celui-ci peut également générer des contraintes et des déformations au niveau du silicium.

Le retrait de l'adhésif peut relâcher des contraintes, mais ce n'est pas lui qui génère ces contraintes. La courbure de la plaquette et les fissures sont un sujet important tant du côté de la diffusion que de la finition car plus le diamètre de la plaquette est important plus ce phénomène est amplifié. Cela entraîne des difficultés de manipulation et éventuellement une casse de celle-ci [27].

La relaxation des contraintes peut s'obtenir par voie chimique, mais elle est aussi faisable par voie mécanique. Des solutions acides attaquent le silicium pour diminuer la zone concernée par les fissurations de meulage.

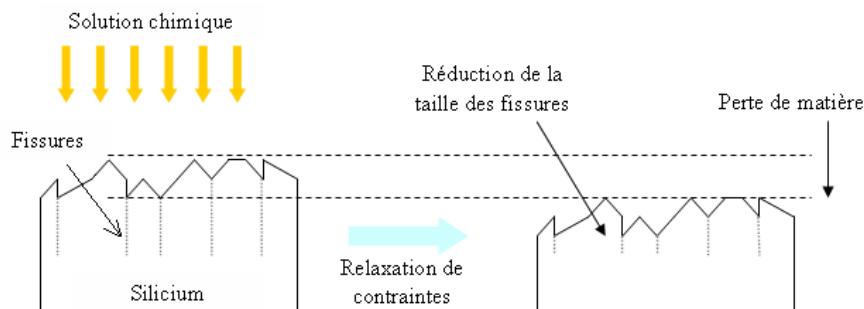


FIG. 1.9 – Principe de relaxation des contraintes par voie chimique

1.2. ETAPES DE FABRICATION

Après réduction des contraintes la rugosité est amplifiée et les arêtes du relief sont plus émoussées, comme l'illustre la figure 1.9. Au global les fissures dans le silicium sont moins profondes ce qui limite les concentrations de contraintes.

Le billage consiste à déposer les billes en SnAgCu sur chacun des plots UBM de chacun des composants de la plaquette. Plusieurs méthodes existent :

- La première méthode consiste à déposer les billes dans les intervalles – les ouvertures – d'un masque, après qu'elles ont subi un traitement plasma.
- Le billage par pâte à braser consiste à déposer une pâte contenant un alliage de type SnAgCu et du flux avant de déposer puis de refondre les billes.

Le marquage laser permet d'identifier le composant par un code ainsi que son orientation par un point dans un de ses coins. Avant de découper les composants, la plaquette est montée sur un support qui permet de rigidifier l'ensemble. L'étape de découpe est effectuée à l'aide d'une scie circulaire qui passe sur les chemins de découpe, entre les composants. Dans le cas d'un CSP (type BGA) la mise en boîtier se fait après découpe alors que pour un WL-CSP le billage est réalisé avant (*cf.* figure 1.10).

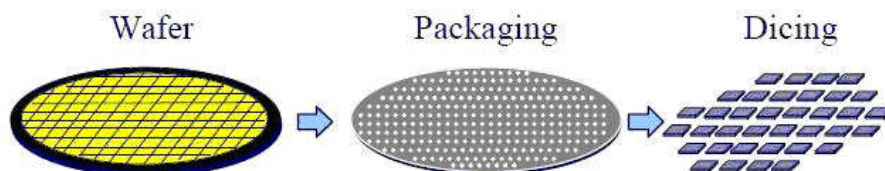


FIG. 1.10 – Principe de relaxation des contraintes par voie chimique

Suite à la découpe, les WL-CSP sont inspectés visuellement par une machine pour détecter de nombreux types de défauts : défauts de billage, écailles lors de la découpe, etc. Après cela les puces sont prises une par une pour être placées dans les poches d'une bobine.

1.2.3 Assemblage sur circuit-imprimé

Il s'agit d'une étape particulière car le circuit imprimé n'est pas fabriqué par STMicroelectronics et l'assemblage est une étape réalisée en aval (généralement par les clients). En revanche on s'y intéresse car le circuit imprimé et l'assemblage sont deux points critiques de la fiabilité du board-level drop-test (BLDT, nommé par la suite « essai de chute ») et probablement de la variabilité des résultats des tests mécaniques. Pour cette raison cette étape doit être décrite. C'est également pour cette raison que la partie concernant la caractérisation des matériaux inclut des essais sur plusieurs types de circuits imprimés.

Schématiquement l'assemblage d'un WL-CSP sur un circuit imprimé consiste à déposer le composant sur les plots de cuivre correspondant à son empreinte. Ensuite l'ensemble est chauffé jusqu'à atteindre la fusion des billes. Dans la pratique de nombreux paramètres sont à prendre en compte et peuvent créer de la variabilité :

- Le positionnement du composant est effectué à l'aide de points de repères de façon à ce que chaque bille soit en face du plot de cuivre correspondant.
- Une finition permet de préserver les plots de Cu du circuit imprimé de l'oxydation, celle peut-être :

- a) OSP²
- b) Ni(P)-Au
- c) Ni(P)-Ag
- Une couche de résine appelée vernis épargne peut recouvrir ou non les bords des plots de cuivre, cela peut influencer la forme finale de la bille.
- Des thermocouples sont positionnés sur le circuit imprimé et sur le composant (pour la mise au point du profil de refusion), la courbe de chauffe et de refroidissement doit suivre des spécifications précises.
- L'assemblage peut être par flux ou par pâte à braser. Dans le 2nd cas il y a ajout de matière sous forme de pâte, cette matière est un mélange entre du flux et de l'alliage de brasure, pas nécessairement le même que celui de la bille.

Les plots de cuivre du circuit imprimé peuvent être reliés directement à une piste en surface afin d'effectuer un branchement autre, ils sont dits *novia*. Les plots peuvent aussi être percés et traverser plusieurs couches du circuit imprimé en profondeur (un circuit imprimé de test comporte généralement plusieurs couches de conducteur), on parle alors de *via*³.

Les contrôles sont principalement visuels, aux rayons X ainsi que mécaniques avec le cisaillement de la puce par un outil. Les contrôles aux rayons X ont pour but de détecter d'éventuelles bulles (aussi appelés « vides ») emprisonnées dans la soudure au cours de l'assemblage, ou alors des « ponts », lorsque deux billes se sont liées en court-circuit.

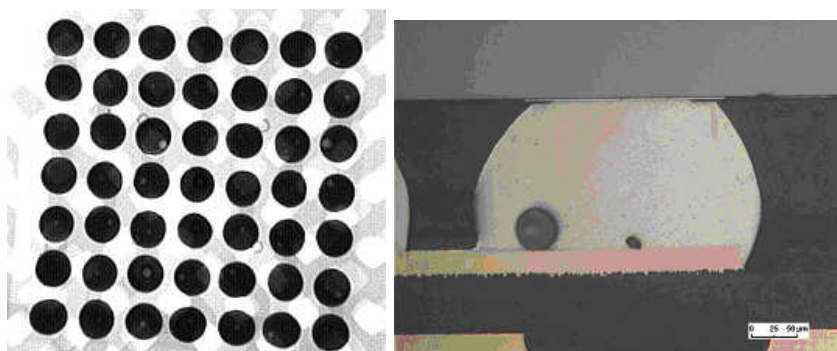


FIG. 1.11 – a) Exemple d'image aux rayons X – b) Microsection montrant une bulle

La figure 1.11 montre plusieurs billes avec des bulles, on cherche généralement à minimiser leur nombre.

1.3 Etat de l'art

L'étude de la tenue mécanique des composants CSP et WL-CSP est un sujet relativement récent puisque cela a débuté dans les années 1990. La prédiction de la fiabilité mécanique, au niveau du circuit imprimé, pour les composants électroniques est complexe pour plusieurs raisons :

²OSP = Organic Solder Preservative

³Voir également la définition dans le glossaire

1.3. ETAT DE L'ART

- Tous les paramètres des tests ne sont pas parfaitement connus
- Les propriétés des matériaux utilisés sont également peu connues
- Des simplifications doivent être faites au niveau de la simulation
- Il faut rechercher un modèle de fatigue adapté aux sollicitations des essais de chute et de flexion utilisés pour caractériser la tenue mécanique des composants

Les techniques mises en œuvre pour parvenir à cette prédiction sont pluridisciplinaires. Pour cette raison les articles publiés traitent généralement plusieurs thématiques en même temps : la chute, la flexion, la caractérisation des matériaux, l'étude de paramètres de dépôts ou de finition, la simulation numérique et la modélisation des matériaux, les statistiques, etc. En conséquence les paragraphes ci-dessous sont classés d'une façon qui peut être considérée comme subjective. Toutefois l'approche vise à apporter une vision globale de l'avancement des recherches sur prédiction de la fiabilité mécanique des WL-CSP :

- Les deux premières parties portent sur les observations relatives aux tests de chute et de flexion (mode de défaillances, mesures sur le circuit imprimé, résultats sur les boîtiers, etc.)
- La 3ème partie est orientée sur les techniques de simulation pour ces deux tests (type de résolution d'équation, méthode de maillage, choix des éléments, comportements matériaux retenus, etc.)
- La 4ème partie présente un point clairement identifié du test de chute : l'alliage des interconnexions, celui-ci changeant d'un métal contenant du plomb vers un métal sans plomb.

1.3.1 Essais de chute

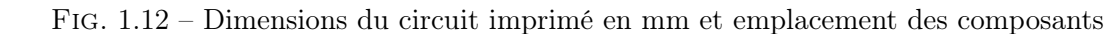
1.3.1.1 Introduction à l'essai : norme JEDEC

La méthode du test de chute telle qu'elle est définie par la norme JESD22-B111 a pour objectif d'évaluer et de comparer les performances à la chute de composants électroniques. Ces composants équipent des appareils portables eux-mêmes susceptibles de chuter. Le test reproduit les conditions de vie du produit dans un environnement accéléré, dans lequel une flexion excessive du circuit imprimé produit une panne de composant. La norme permet de standardiser le circuit imprimé de test ainsi que la méthodologie pour fournir une évaluation des performances en chute en reproduisant le mode de défaillance normalement observé.

La norme spécifie les points suivants :

- Constitution (empilement de couches) et propriétés mécaniques du circuit imprimé
- Diamètre des plots de cuivre et ouverture du masque de brasure
- Position et répartition des composants sur le circuit imprimé (*cf.* figure 1.12)
- Méthode d'assemblage sur circuit imprimé
- Taille de l'échantillon statistique recommandée
- Procédure de test :
 - Equipements et leurs paramètres
 - Critères de ruptures et analyses de défaillances
- Eléments qui doivent être présents dans le rapport de test

D'un point de vue pratique, le circuit imprimé est monté sur un « véhicule de test » avec les composants orientés vers le sol. Ce circuit imprimé est fixé au niveau de ses vis, en



l'huile le long des guides, chauffer les mécanismes, etc.

Un accéléromètre est fixé entre la masse d'entraînement et le circuit imprimé (*cf.* figure 1.13) pour la calibration du pic d'accélération, puis enlevé pour le test. Une calibration est effectuée avant et après l'essai. Celle-ci permet de « régler » l'amplitude et la durée du pic qui doivent être répétables avec leurs Cpk supérieurs à 1.33⁴ sur un échantillon de 20 signaux. La norme JEDEC définit plusieurs couples de valeurs pour l'amplitude et la durée du pic d'accélération, on retiendra en particulier la condition B couramment utilisée pour la qualification de WL-CSP : 1500 G appliqués pendant 0.5 ms (*cf.* figure 1.14).

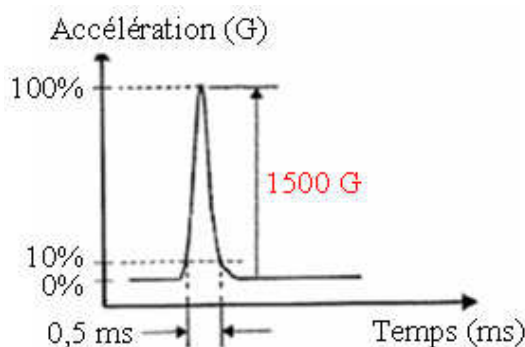


FIG. 1.14 – Condition B de la norme JEDEC

La norme prévoit deux méthodes pour enregistrer les temps à la rupture :

- Le détecteur d'événements (ED) est un appareil qui détecte le franchissement d'un seuil de résistance électrique sur des durées très courtes, de l'ordre de la microseconde. Le temps d'apparition du 1er pic est enregistré pour chaque composant et est considéré comme son temps à la rupture
- L'enregistreur de données (DA) mesure en continu la résistance électrique des chaînes électriques. La durée minimale du signal enregistré dépend de la fréquence d'échantillonnage de l'appareil. Pour cette raison, le temps à rupture est défini comme le premier pic franchissant le seuil de résistance suivi par 3 autres pics de confirmation dans les 5 chutes suivantes

Le seuil de résistance électrique est défini par le standard international comme étant une augmentation de 20 % de la valeur initiale de résistance du réseau de la chaîne électrique ou 1000 Ω , la valeur la plus élevée étant retenue.

Ce test présente quelques inconvénients pratiques, notamment les fils électriques se coupent au niveau du circuit imprimé sous l'effet répété des impulsions d'accélération. Il faut donc s'assurer que le pic enregistré est lié au composant et non au fil qui le connecte.

1.3.1.2 Aspects mécaniques de l'essai de chute

Le processus global de la chute entraîne un certain nombre de transformations d'énergie [12]. En 1er lieu le « véhicule de test » tombe librement d'une certaine hauteur et son

⁴Cette valeur permet d'assurer que moins de 40ppm des amplitudes et des durées mesurées sont en-dehors des spécifications

1.3. ETAT DE L'ART

énergie potentielle est convertie en énergie cinétique. Ensuite, celui-ci rencontre la surface de contact et crée une impulsion caractérisée par son amplitude et sa largeur (durée). C'est ce pic qui est défini par le standard JEDEC. Enfin, les forces de l'impact sont transmises à travers les vis et colonnettes au circuit imprimé, aux interconnexions ainsi qu'aux composants. La force d'inertie provoque la flexion et l'oscillation du circuit imprimé ce qui provoque des contraintes au niveau des interconnexions. L'équation qui relie la hauteur de chute H , la gravité g et la vitesse juste avant impact V_b est la suivante :

$$V_b = \sqrt{2gh}$$

D'après la théorie, la vitesse après l'impact V_a est comprise entre 0 (pas de rebond) et $-V_b$ (rebond total). Si on suppose que V_a est une fraction de V_b ($V_a = cV_b$) alors il vient :

$$\begin{cases} -mcV_b - mV_b = -\int_0^T mG(t)dt \\ V_b = \frac{1}{1+c} \int_0^T G(t)dt \end{cases} \quad (1.1)$$

c est le coefficient de restitution et sa valeur est comprise entre 0 (impact parfaitement plastique) et 1 (impact parfaitement élastique). $G(t)$ est l'accélération au temps t , T est la durée du pulse et m est la masse.

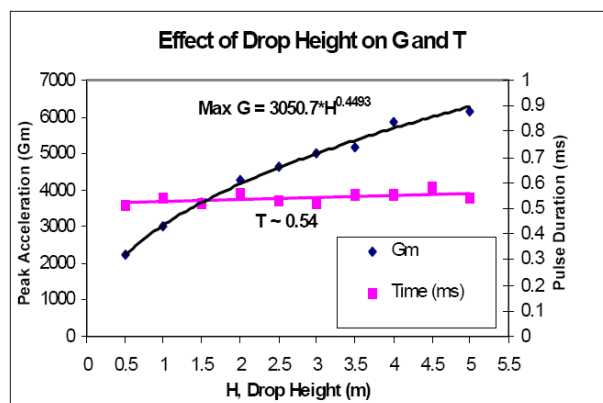


FIG. 1.15 – Influence de la hauteur de chute sur le pic d'accélération [12]

Les propriétés de la surface de contact (une ou plusieurs couches d'un tapis) ainsi que la hauteur de chute permettent de « régler » la durée et l'amplitude de l'impulsion d'accélération. Un tapis « rigide » – avec un module d'Young E élevé – permet d'obtenir une grande amplitude et une faible durée alors qu'un tapis plus mou – avec un module d'Young E plus faible – permet d'obtenir une amplitude inférieure mais une durée plus grande. D'autre part, on constate que la hauteur de chute n'influence pas significativement la durée de l'impulsion d'accélération, comme l'illustre la figure 1.15. Notons également qu'après de nombreuses chutes les propriétés du tapis qui sert de surface de contact sont susceptibles de changer, ce qui explique parfois un mauvais résultat de calibration a posteriori.

Le traitement statistique recommandé par la norme consiste à utiliser une distribution de Weibull et/ou lognormale. Cet aspect sera décrit plus précisément dans la partie traitant des statistiques, toutefois la distribution de Weibull à 2 paramètres est la plus couramment

1.3. ETAT DE L'ART

Groupe	Nombre de composants dans le groupe	Position des composants	Côté A	Côté B
A	4	U1, U5, U11, U15	8	8
B	4	U2, U4, U12, U14	8	8
C	2	U6, U10	4	4
D	2	U7, U9	4	2
E*	2	U3, U13	4	2
F*	1	U8	4	2

TAB. 1.2 – Position des composants pour les circuits imprimés de test

utilisée. Le tableau 1.2 décrit la position des composants, la norme établit un certain nombre de groupes qui doivent être séparés pour le traitement statistique car ils ne subissent pas le même niveau de déformation. Les catégories E* et F* peuvent être regroupées dans la mesure où les niveaux de contraintes sont très proches, regrouper les autres catégories ne serait possible que si l'on prouve qu'ils subissent les mêmes niveaux de chargement. Le circuit imprimé est conçu avec deux faces symétriques, la face A contenant des *via* et la face B étant sans *via*. Le nombre de pièces indiquées pour chaque face (dans le tableau 1.2) correspond à la taille recommandée de l'échantillon statistique.

La flexion du circuit imprimé consécutive à la chute a été étudiée sous de nombreuses formes, en particulier les études se sont focalisées sur les mesures de déformation puisque les déformations longitudinales du circuit imprimé sont à relier directement aux niveaux de contraintes des interconnexions [2].

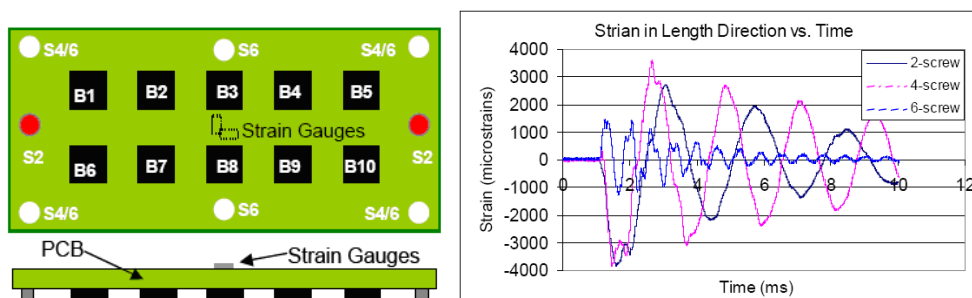


FIG. 1.16 – a) Position des vis et des jauges de déformation – b) Réponse en déformation du circuit imprimé dans la direction longitudinale – Dimensions du circuit imprimé : 100x48x1.6 mm [2]

Sur la figure 1.16, il y a quatre configurations possibles pour fixer le circuit imprimé par des vis :

- Par les trous S2, c'est la configuration à 2 vis
- Par les trous S4, c'est la configuration à 4 vis
- Par les trous S6, c'est la configuration à 6 vis

La réponse en déformation est donnée dans le sens longitudinal pour chacun des trois cas. On observe que le nombre de fixations modifie la réponse en déformations tant dans

la fréquence que dans l'amplitude. Plus il y a de fixations et plus la fréquence de vibration est élevée. L'amplitude des déformations dans le cas à 4 vis est comprise entre -0.4 % et 0.35 % et ces valeurs sont décroissantes sur 10 ms. De la même façon ces recherches ont montré que le serrage des vis influence de manière significative la déformation du circuit imprimé, ce qui explique l'emploi d'une clef dynamométrique.

A partir des mesures de déformations on peut calculer par transformée de Fourier les fréquences principales, puis les comparer avec celles des résultats de simulation.

Mode	Expérience (Hz)	Modélisation (Hz)	Différence (%)
1	470	472	0.43
2	911	919	0.88
3	1360	1287	5.37
4	2030	2051	1.03
5	2220	2169	2.3
6	2671	2665	3.66

TAB. 1.3 – Modes de vibrations d'un circuit imprimé de dimensions 100x48x1.6 mm [2]

Les données du tableau 1.3 permettent d'une part de valider un modèle numérique et d'autre part, de comprendre que la structure et le montage du circuit imprimé sont susceptibles d'influencer de manière significative la tenue des interconnexions lors de l'essai de chute.

1.3.1.3 Paramètres influents relevés dans la littérature

L'essai de chute est généralement lié à des simulations numériques pour lesquelles le premier niveau de validation porte sur la flexion et la déformation du circuit imprimé. La méthode probablement la plus simple et la plus couramment employée pour corréler ces données consiste à utiliser une caméra haute-vitesse comme l'ont fait *Zaal et Al.* [3]. Un exemple d'image obtenue par caméra rapide est donné sur la figure 1.17. Ces auteurs ont identifié trois causes de variabilité pour le test de chute :

- L'utilisation d'un « catcher » (équipement pour empêcher le rebond du véhicule de test)
- L'amplitude de l'impulsion d'accélération
- La largeur de l'impulsion d'accélération

Les paramètres expérimentaux sont précisés dans le tableau 1.4.

Les conditions de montage dans le test de chute représentent différents ensembles de colonnettes et différentes distances entre celles-ci génèrent des différences dans la géométrie du circuit imprimé. Le système anti-rebond est un dispositif qui empêche un rebond du véhicule de test après l'impact initial. Les propriétés des matériaux utilisées dans la modélisation sont précisées dans le tableau 1.5.

Les résultats issus des simulations et des mesures montrent que la fréquence de vibration du circuit imprimé varie entre 190 Hz et 335 Hz selon le fournisseur. D'un point de vue simulation, le modèle doit prendre en compte l'amortissement (ici amortissement de

1.3. ETAT DE L'ART

Paramètres	Options
Fabriquant du circuit imprimé	A/B/C
Produit monté	Aucun/CSP/HVQFN
Montage dans le test de chute	1/2
Système anti-rebond	Oui/Non
Largeur de l'impulsion	1 ms/0.5 ms
Amplitude de l'impulsion	700 g/1000 g/1500 g/2750 g

TAB. 1.4 – Variations expérimentales proposées par *Zaal et Al.* [3]

Propriétés	Circuit Imprimé	Silicium	Brasure
Module d'Young E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} (GPa)	16.0, 16.0, 3.2	169	42
Coefficient de Poisson	0.15	0.23	0.4
Module de cisaillement G_{xy} , G_{yz} , G_{zx} (GPa)	4.7, 4.7, 4.7		
Densité (Kg/m^3)	2400	2330	7440

TAB. 1.5 – Propriétés matériaux utilisées dans la simulation par *Zaal et Al.* [3]

Rayleigh pour le circuit imprimé en utilisant $\alpha = 70$ et $\beta = 2e - 5$).

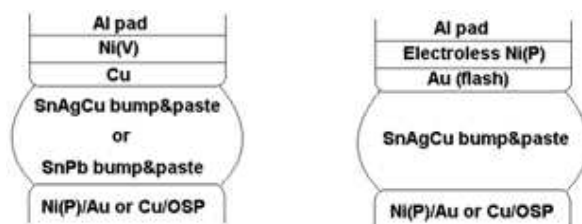
Les mesures présentées dans cet article doivent permettre d'améliorer la précision d'une prédiction de durée de vie. De plus, les auteurs suggèrent de poursuivre les simulations en utilisant une technique de modélisation globale/locale. La description de la réponse du circuit imprimé sera plus détaillée dans la partie propre au test de chute.

Indépendamment du matériau de la brasure, les études de fiabilité portent sur l'influence de la structure des WL-CSP. Ainsi, *Alajoki et Al.* [13] comparent les deux structures schématisées dans la figure 1.18. Sur cette figure, les métallisations entre l'aluminium et la bille sont différentes.

Des différences significatives ont été observées : les composants avec la métallisation la couche d'adhésion (Al)Ni(V)/Cu sont plus fiables que ceux avec la métallisation Ni(P)/Au et ce, indépendamment de la brasure de la pâte d'assemblage, de la finition du circuit



FIG. 1.17 – a) Le circuit imprimé se détache du fond noir - b) Déflexion du circuit imprimé lors de l'impact initial

FIG. 1.18 – Schéma des deux structures évaluées par *Alajoki et Al.* [13]

imprimé ou de sa structure. Ainsi, la métallisation sous la bille est le paramètre qui influence le plus la fiabilité de la structure parmi ceux étudiés.

Les fissures ont principalement lieu côté composant pour trois raisons :

- La contrainte normale est supérieure côté composant
- Les couches de réaction ont un comportement fragile
- Durcissement de la brasure lorsque la vitesse de déformation augmente

Les auteurs notent que le mécanisme de défaillance est différent de celui typiquement observé en cyclage thermique, pour lequel l'initiation et la propagation des fissures sont fortement influencées par la recristallisation de la brasure.

L'influence de la structure est également étudiée par *Nummila et Al.* [28] Par contre les auteurs ont choisi une autre orientation : le choix dans les empilements par opposition avec le choix dans les matériaux. Ainsi, les structures WL-CSP testées en essai de chute sont :

- Bille sur plot (BoP) : couche de métallisation, couche de passivation (à base de Silicium), couche d'adhésion, passivation (en polymère)
- BoP sans la dernière couche de passivation
- BoP avec une couche de passivation (à base d'oxyde de silicium), couche de métallisation, passivation polymère puis couche d'adhésion
- Brasure déportée sur cuivre : la bille est soudée à distance de la métallisation, sur une large métallisation de cuivre et passivée par une épaisse couche en polymère

Les résultats des tests de fiabilité révèlent des différences remarquables entre les différentes structures et matériaux. Le facteur le plus important semble être la passivation, mais aussi la métallisation sous la bille. La structure « brasure déportée sur cuivre » semble plus fiable que les structures BoP. On retrouve aussi dans cet article la conclusion selon laquelle une faible proportion d'argent (Ag) améliore la fiabilité du boîtier. En complément, l'ajout de nickel stabilise la croissance des composés intermétalliques ce qui réduit la concentration des contraintes dans cette couche. *Nummila et Al.* concluent que la fiabilité générale des WL-CSP au test de chute peut être améliorée de nombreuses manières. Beaucoup de combinaisons techniques existent, chacune devant être optimisée en fonction des besoins mécaniques mais aussi en fonction de la conception (design) qui permet d'assurer la fonction électrique. Au vu de la complexité, le test et l'optimisation seront probablement toujours requis dans le futur. Notons qu'au niveau de l'étude des structures sous la bille, aucun article n'étudie l'influence des diamètres des plots – et des ouvertures de passivation – sur la fiabilité mécanique des WL-CSP.

Frémont et Al. [29] évaluent l'influence de la conception du circuit imprimé sur la performance au test de chute. Ces paramètres sont :

- L'ouverture du verni épargne (SMD ou NSMD)
- Le passage des pistes
- La finition du circuit imprimé (ImAg⁵, ImSn⁶ et OSP)

Les auteurs trouvent un compromis entre la tenue mécanique et la tenue à un essai de cyclage thermique. Ce compromis est composé d'une finition ImSn ou ImAg, d'un assemblage par pâte à braser ainsi que d'un arrangement spécifique des pistes dit en "barbapapa".

Nishiuchi et Al. [14] développent une méthode utilisant la méthode éléments finis (FEM) pour estimer la fiabilité lors d'impacts de chutes. Les impacts répétés conduisent à une fissure initiale via la rupture ductile dans le corps de la soudure. Un test de traction à haute vitesse permet d'étudier les propriétés de la brasure lors de déformations rapides.

La déformation plastique équivalente est utilisée pour estimer la fatigue des brasures lors des chutes. La déformation de l'assemblage sur circuit imprimé est calculée par FEM en utilisant l'analyse dynamique modale. Les estimations correspondent aux résultats pour trois types de BGA avec différentes dispositions de billes. Cette méthode est utile pour la conception et l'organisation des billes en regard de la performance à ce test de fiabilité.

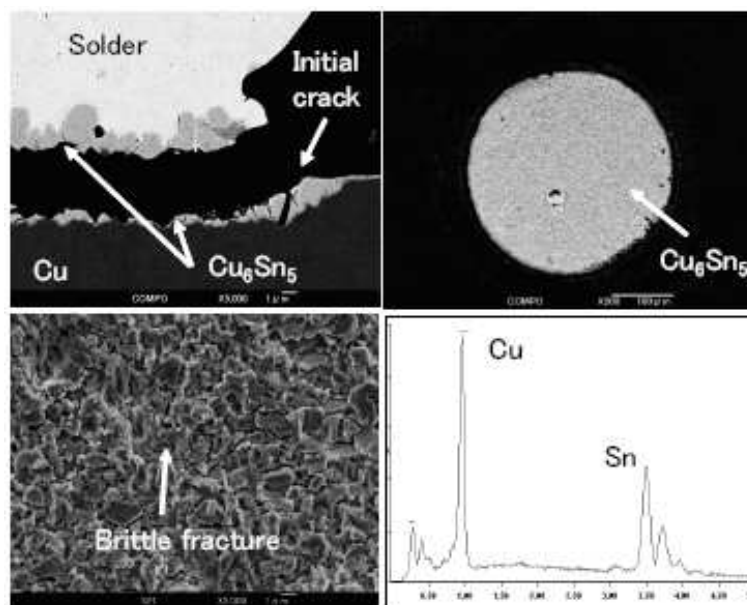


FIG. 1.19 – Images et analyses au microscope électronique à balayage d'une rupture d'un joint de soudure après le test de chute [14]

La figure 1.19 permet d'observer la rupture à l'interface entre la brasure et les intermétalliques. Ces derniers ont subi une rupture fragile et une analyse aux rayons X montre que le composé à la surface de la fissure est Cu_6Sn_5 . A partir de mesures pour caractériser l'alliage des billes et les intermétalliques, des calculs par FEM permettent de situer les

⁵ImAg : Immersion Silver

⁶ImSn : Immersion Tin

zones de plus forte contrainte dans les billes comme l'illustre la figure 1.20.

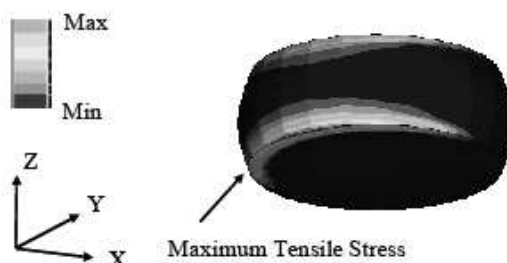


FIG. 1.20 – Méthode éléments finis par analyse dynamique modale - Observation du modèle local [14]

Par la suite, la méthode consiste à faire varier la déformation du circuit imprimé (en changeant la hauteur de chute) puis à tracer le taux de défaillance en fonction du nombre de chutes (analyse statistique de Weibull). L'étape suivante consiste à tracer le taux de défaillance en fonction de la déformation plastique équivalente maximale relevée dans la brasure. Enfin, on trace également ce type de graphique en fonction de l'organisation des billes. Les deux premiers graphiques mettent en équation de façon empirique les résultats qui sont validés par le 3ème graphique de la figure 1.21.

L'étude paramétrique sur l'influence de la répartition des billes (*cf.* figure 1.21) est également effectuée dans le cadre de l'exploitation de la simulation numérique développée pour les WL-CSP de STMicroelectronics.

1.3.2 Essais de flexion

1.3.2.1 Essais de flexion 3-Points

L'essai de fiabilité en flexion sera plus largement décrit dans la partie concernant la flexion 4-points. Cette partie a pour objectif de présenter les expériences qui ont eu lieu avant d'aboutir à l'essai standardisé mis en place ainsi que les principaux résultats. Au départ de nombreux industriels effectuaient des essais de flexion 3-points. Ce type de chargement produit un niveau de contrainte qui évolue linéairement le long du circuit imprimé. En conséquence les composants reçoivent plusieurs niveaux de contrainte selon leur position sur le circuit imprimé. Les principaux auteurs ayant effectué ces essais sont : *Shetty et Al.* [30], *Ho et Al.* [31] et *Wu et Al.* [32].

La flexion 4-points est utile pour tester une grande taille d'échantillon avec le même moment de flexion. D'après *Kim et Al.* [15] le moment de flexion est constant dans la zone du circuit imprimé comprise entre les deux appuis de flexion. Ces auteurs montrent que l'alliage de billes $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ améliore la fiabilité par rapport à l'alliage Sn_{63}Pb . Leur système électrique peut acquérir des données en temps réel pour détecter les défauts des composants, cela permet d'observer précisément la propagation puis l'alternance ouverture/fermeture des fissures comme le montre la figure 1.22. Par ailleurs, ils effectuent les tests à plusieurs niveaux de force et établissent une loi d'accélération pour la fiabilité.

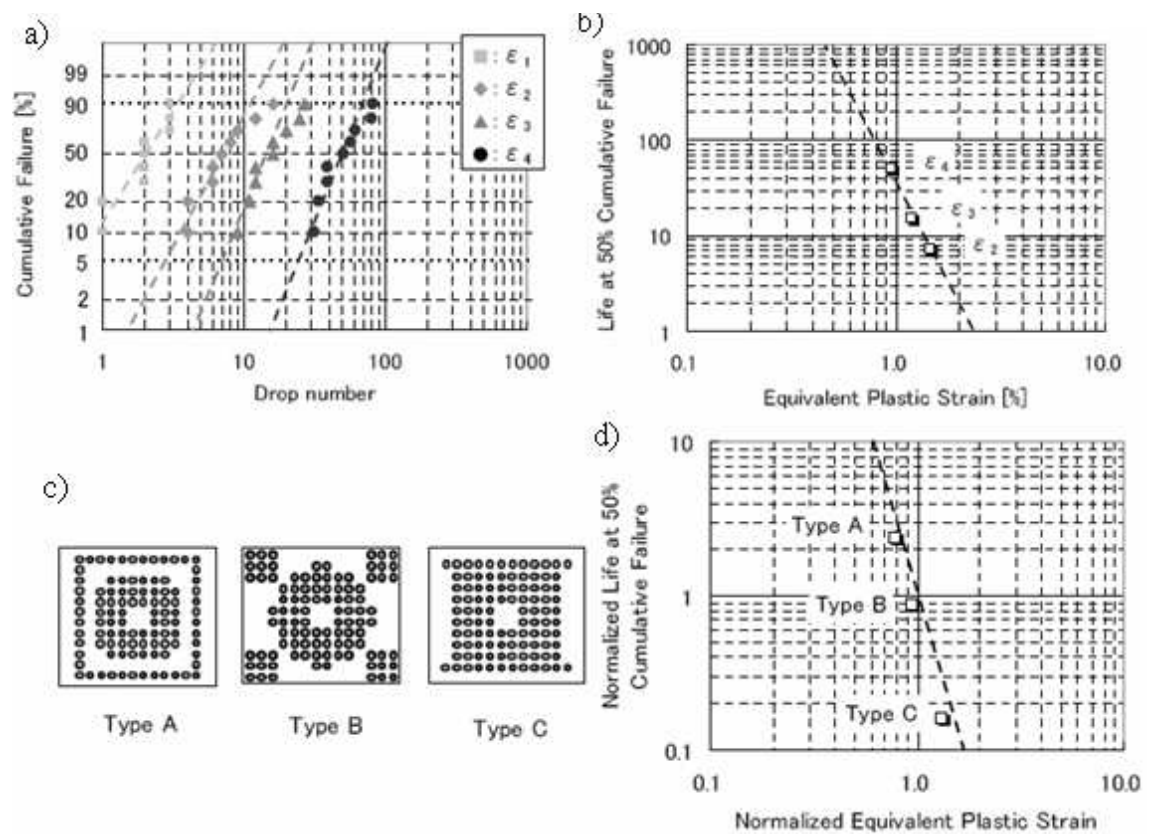


FIG. 1.21 – a) Distribution lognormale des défauts en fonction du nombre de chutes - b) Durée de vie en fonction de la déformation plastique équivalente – c) Représentation schématique de la distribution des billes en fonction des cas étudiés – d) Durée de vie normalisée en fonction de la déformation plastique normalisée pour trois cas [14]

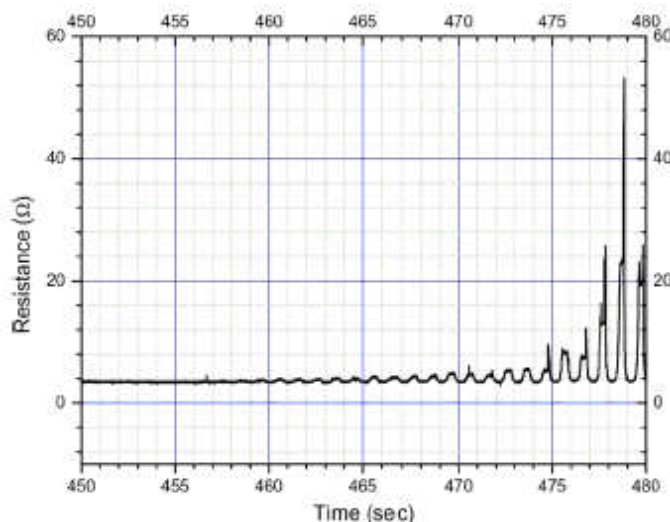


FIG. 1.22 – Agrandissement de la résistance électrique d'un composant au moment de la défaillance [15]

Un banc de flexion 8-points est utilisé par *Mercado et Al.* [33] pour étudier la fiabilité des BGA. Les statistiques sont tracées selon une loi lognormale, et les résultats montrent que la fréquence n'influence pas les résultats dans une gamme qui s'étend de 1 Hz à 5 Hz. Ce banc de test leur permet également de tracer une courbe de type S-N avec, en abscisse l'énergie de déformation calculée par la méthode des éléments finis et, en ordonnées le nombre de cycles à 60 % de probabilité de rupture. La variation du niveau de contrainte est obtenue en faisant varier l'amplitude du déplacement des appuis de 2 à 3 mm.

Chen et Al. [34] font l'essai de flexion 4-points dans une enceinte contrôlée en température. L'élévation de température de 25 °C jusqu'à 120 °C produit une baisse de la durée de vie des FCBGA selon une loi en puissance. Il apparaît également que la température ne modifie pas le mécanisme de défaillance. Par ailleurs ces auteurs mesurent la déformation longitudinale à l'aide d'une jauge sur le circuit imprimé, près du composant. La gamme de déformations évaluée s'étend de 148.10^{-6} à 667.10^{-6} .

Lai et Al. [16] ont testé la fiabilité de WL-CSP sur un circuit imprimé spécifique et concluent que la fréquence n'a pas d'influence significative sur le résultat du test. Les essais couvrent les fréquences de 1, 2 et 4 Hz à chaque amplitude : 1, 2 et 3 mm. Ajoutons que les analyses de défaillances montrent que les billes cassent préférentiellement sur les rangées extérieures, perpendiculairement à la longueur du circuit imprimé. La fissure se propage au niveau des intermétalliques comme l'illustre la figure 1.23.

Le test de flexion est envisagé par certains auteurs pour reproduire le mode de rupture observé lors du test de chute. *Seah et Al.* [35] utilisent un banc de flexion 8-points dont l'axe est entraîné par un moteur et un système d'arbre à came. Cet appareil leur permet de solliciter le circuit imprimé jusqu'à 250 Hz et de tester différents alliages pour les billes et plusieurs finitions des plots de cuivre sur le circuit imprimé. Ils mesurent également la déformation à l'aide d'une jauge, les valeurs s'étendent alors de 0.18 % à 0.32 %. Les expériences permettent de déplacer le mode de rupture des intermétalliques vers la brasure.

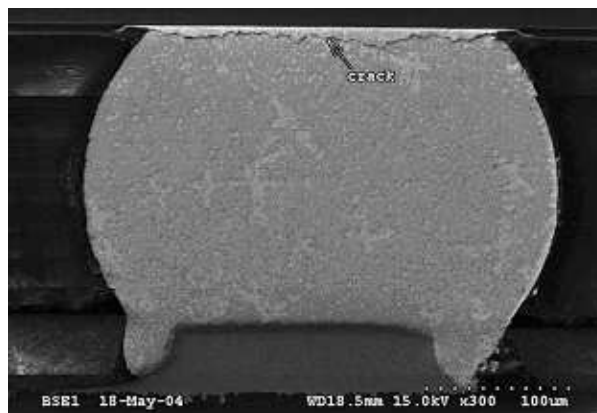


FIG. 1.23 – Localisation d'une fissure dans une interconnexion observée par *Lai et Al.* [16]

Les auteurs concluent sur le besoin d'établir une règle d'endommagement pour faire le lien entre les deux tests de fiabilité.

1.3.2.2 Norme JEDEC JESD22-B113

Le circuit imprimé subit diverses conditions de chargement durant son assemblage et son utilisation. La flexion répétée du circuit imprimé (flexion cyclique) durant différentes opérations d'assemblage, de test et d'utilisation effective peuvent provoquer des défauts électriques. Ces défauts peuvent se situer dans les pistes du circuit imprimé, les interconnexions ou dans le composant. Bien que le nombre de cycles de flexion soit faible durant les opérations d'assemblage, l'amplitude de la flexion peut être élevée. D'un autre côté, l'utilisation des conditions de mise en service comme les appuis répétés sur les touches d'un clavier de téléphone, bien que de faibles amplitudes, peuvent produire un grand nombre de flexions durant le cycle de vie du produit. L'intérêt de la méthode présentée est de proposer un test au niveau du circuit imprimé pour comparer les performances des composants. Cette norme fait référence aux spécifications du standard JESD22-B111 en ce qui concerne les pré-requis pour l'assemblage et le type de circuit imprimé. En complément elle délivre un certain nombre de spécifications pour l'appareil qui effectue le test :

- L'appareil doit permettre une flexion répétée de 1 Hz à 3 Hz pendant plus de $2 \cdot 10^5$ cycles, la précision du déplacement doit être $\pm 5\%$ du déplacement maximum
- Un équipement pour observer et mesurer les déformations avec un taux d'échantillonnage d'au moins 10 fois la fréquence de flexion avec enregistrement simultané sur tous les canaux
- Un équipement permettant le suivi de résistances électriques capable de détecter des défauts électriques selon les critères définis ci-après. Le taux d'échantillonnage de cet équipement doit être d'au moins 10 fois la fréquence de flexion avec enregistrement simultané sur tous les canaux

En raison du grand nombre de cycles durant ce test, le circuit imprimé peut se déplacer (dans le plan) sur les appuis. Il est recommandé de limiter ce mouvement à 1 mm dans chacune des directions à partir du centre.

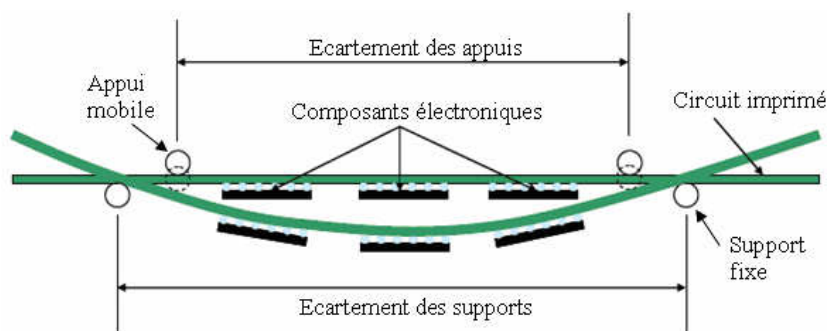


FIG. 1.24 – Schéma de flexion 4-Points

Paramètre	Recommandé	Optionnel
Ecartement des supports (mm)	110	N/A
Ecartement des appuis (mm)	75	N/A
Distance minimale entre appui et composant le plus proche (mm)	10	N/A
Rayon minimum des appuis (mm)	3	N/A
Déplacement vertical des appuis de chargement (mm)	2	Jusqu'à 4 mm
Profil de chargement	Sinusoïdal	Triangulaire
Fréquence (Hz)	1	Jusqu'à 3

TAB. 1.6 – Paramètres recommandés et optionnels pour le test de flexion 4-Points

La figure 1.24 schématise la mise en œuvre du test de flexion et le tableau 1.6 donne les valeurs applicables. Bien qu'il y ait un choix, les valeurs optionnelles ne doivent être utilisées que si un facteur d'accélération a déjà été établi. Par exemple, il faut démontrer que passer de 1 Hz à 3 Hz ne modifie pas les conclusions sur le mécanisme de défaillance ou sur le nombre de cycles à défaillance.

La norme recommande d'assembler 9 composants parmi les 15 possibles pour permettre un glissement correct des appuis sur la plaque. Ces composants sont organisés en une matrice de 3 lignes et 3 colonnes, au centre du circuit imprimé. La taille d'échantillon recommandée est de 36 pièces pour limiter le nombre de tests, cependant celle-ci peut-être réduite à 18 pour des comparaisons complémentaires telles que l'amplitude de déflexion, la fréquence ou une comparaison ViP vs NViP⁷. Bien que cette taille réduite n'apporte pas le même nombre de défauts, elle permet des comparaisons de durées de vie moyennes.

Le déplacement et la fréquence sont les principaux paramètres utilisés dans cette méthode, cependant une meilleure comparaison des performances des composants peut être effectuée en comparant les déformations et vitesses de déformation dans le plan. L'amplitude de la déformation et la vitesse de déformation sont directement reliées à la courbure et à la déformation des interconnexions. Pour cette raison, cette norme spécifie l'usage de

⁷NViP = NoVia in Pad, pas de trou traversant dans les plots du circuit imprimé

jauges de déformation pour chacun des lots. La caractérisation par jauges de déformations doit être faite sur au moins un circuit imprimé par lot avec les composants assemblés.

Le suivi de la résistance électrique des chaînes électriques simplifiées est nécessaire durant le test. La continuité électrique de tous les circuits doit être détectée soit par un détecteur d'événements soit par un enregistreur. Une défaillance a lieu si une valeur de résistance atteint soit $1000\ \Omega$, soit cinq fois la valeur de résistance initiale (la plus grande valeur étant retenue).

L'ED doit être capable de détecter une discontinuité électrique intermittente aussi brève que $1\ \mu s$. Si le moyen de mesure est un DA, alors sa fréquence d'échantillonnage doit être d'au moins 10 fois la fréquence de sollicitation. Par contre, pour limiter la taille du fichier, le DA peut être programmé pour enregistrer uniquement lorsque la résistance atteint une valeur seuil. Il est recommandé d'enregistrer au moins 100 événements pour s'assurer que le critère spécifié ci-après est satisfait.

Selon le système de suivi utilisé, la défaillance est définie comme suit :

- Détecteur d'événements : « le premier événement de discontinuité électrique avec un pic de résistance supérieur à la valeur seuil suivi par au moins 9 confirmations additionnelles parmi les 10 % de cycles qui suivent le 1er événement »
- Enregistreur : « le premier événement de discontinuité électrique supérieur à la valeur seuil suivi par au moins 9 confirmations additionnelles parmi les 10 % de cycles qui suivent le 1er événement »

Comme il s'agit d'une méthode de caractérisation, cette norme n'impose pas de critère de qualification. Néanmoins, pour limiter la durée du test, il est recommandé de poursuivre le test jusqu'à 200 000 cycles ou jusqu'à ce que 60 % des pièces de l'échantillon initial soient en défaut, selon ce qui arrive en premier. La durée de 200 000 cycles n'est pas une attente de fiabilité mais plutôt une recommandation pour obtenir suffisamment de pièces en défauts.

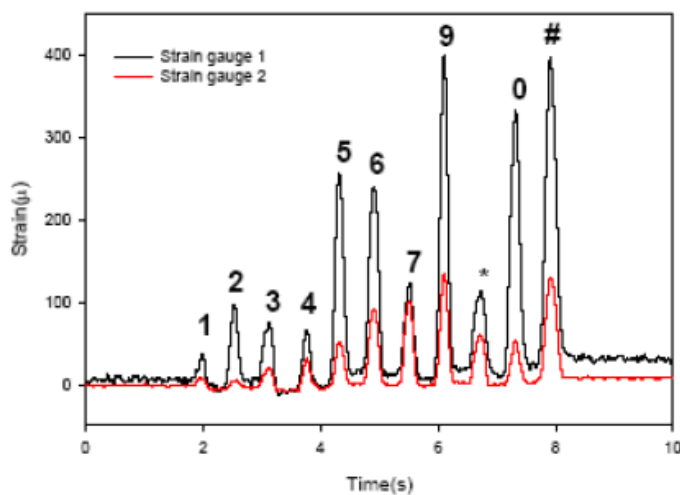


FIG. 1.25 – Déformations typiques engendrées par l'appui sur des touches de téléphone

La norme compare les conditions de test ci-dessus avec des mesures typiques de déformation. La figure 1.25 montre les déformations typiques que reçoit un circuit imprimé lorsque les touches d'un clavier de téléphone sont pressées. Ici un maximum de 0.04 % est

atteint avec une durée d'environ 0.2 seconde pour chaque touche.

1.3.2.3 Norme IPC/JEDEC-9702

Les normes IPC ont pour objectif général d'éliminer les incompréhensions entre clients et fournisseurs en facilitant l'interchangeabilité et l'amélioration des produits. Cette publication en particulier vise à caractériser la contrainte à la rupture des interconnexions de composants montés sur circuit imprimé. Il s'agit d'une mesure de la résistance à la rupture lors d'un chargement en flexion, celui-ci pouvant avoir lieu lors de l'assemblage du composant sur circuit imprimé et lors des opérations de test. Dans ces conditions le chargement n'est pas cyclique.

Description	Définition
Rayon des appuis et des supports	3 mm
Longueur des appuis et des supports	> largeur du circuit imprimé
Température ambiante	23 °C ± 2 °C

TAB. 1.7 – Paramètres requis pour la machine de test

L'échantillon de composants devrait être préférentiellement testé lot-à-lot pour évaluer la répétabilité. La taille de l'échantillon peut être de 23, 30, 45, etc., selon les distributions de fissures, la sensibilité et la précision requises. La machine de test doit permettre de contrôler la vitesse de déflexion. Celle-ci doit inclure des appuis de flexion 4-Points pour appliquer un moment de flexion théoriquement uniforme entre les appuis de chargement, leurs paramètres sont précisés dans le tableau 1.7.

Le déplacement des appuis (δ) et la vitesse de déplacement ($\dot{\delta}$) permis par une machine de test sont à peu près proportionnels à la déformation du circuit imprimé (ε) et à sa vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$), respectivement. La relation entre ces variables peut être déterminée empiriquement par un test mécanique représentatif sur carte ou assemblage. Les équations ci-dessous sont des relations simplifiées pour calculer le déplacement de l'assemblage par rapport aux valeurs globales de déformation et de vitesse de déformation du circuit imprimé. Celles-ci sont dérivées de la théorie classique des poutres et ne tiennent pas compte des effets liés aux boîtiers.

$$\delta = \frac{\varepsilon(L_S - L_L)(L_S + 2L_L)}{6t} \quad (1.2)$$

L_S est l'écart entre les supports, L_L est l'écart entre les appuis et t est l'épaisseur du circuit imprimé.

$$\dot{\delta} = \frac{\dot{\varepsilon}(L_S - L_L)(L_S + 2L_L)}{6t} \quad (1.3)$$

L'équipement pour mesurer les déformations doit avoir une fréquence d'échantillonnage d'au moins 500 Hz et une résolution de 16 bits est préférée.

Ce test produit une sollicitation monotone, par opposition à la sollicitation cyclique décrite dans la section précédente. Cela signifie que l'on va observer un défaut dans les

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

TAB. 1.8 – Paramètres du test en chargement monotone

composants du fait d'un dépassement de résistance mécanique, ce dépassement sera causé pour une déformation de circuit imprimé et une vitesse de déformation donnée, ces conditions sont spécifiées dans le tableau 1.8. Selon les équipements, le test peut se terminer sans observer de défaut dans tous les composants. Pour cette raison la norme fournit un ensemble de configurations (écartement des appuis, vitesses de déplacement de la traverse) qui prennent en compte les équations ci-dessus.

La norme recommande d'utiliser comme critère de défaillance électrique une augmentation de 20 % de la résistance de la chaîne électrique ; cependant une limite supérieure ou inférieure pourrait convenir selon l'équipement utilisé et le produit testé.

L'analyse de défaillance doit permettre d'identifier les lieux de ruptures, les modes et mécanismes de défaillance observés électriquement. Cette analyse doit permettre de valider que les défauts observés ou les augmentations de résistances électriques ne sont pas dues à des problèmes de câbles coupés, de circuit imprimé ou de l'appareil de test.

Précisons enfin que si le standard propose des techniques d'analyses (micro-sections, rayons X, microscopie acoustique, etc.) celui-ci ne précise pas le traitement statistique que doivent recevoir les échantillons étudiés.

1.3.2.4 Paramètres identifiés

Le standard international JESD22-B113 discuté précédemment est une ligne de conduite générale qui permet de comparer les performances des composants. Cependant, comme dans le cas du test de chute, un certain nombre d'industriels et de laboratoires utilisent des paramètres différents :

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

Les valeurs absolues de tenue au test ne peuvent pas être prises en compte, par contre les tendances observées restent intéressantes à relever.

Lai et Al [4] étudient l'influence de l'amplitude de la flexion ainsi que la fréquence employée sur la tenue au test de flexion.

Les circuits imprimés employés dans ces travaux (4 couches de FR-4, dimensions 120x50x1.6 mm³) ne correspondent pas au standard JEDEC, un seul composant est monté en son centre comme le montre la figure 1.26. Le composant est un WL-CSP, les dimensions du silicium sont : 6.9x6.45x0.3 mm³, la couche d'adhésion est en Al/Ni(V)/Cu et l'alliage de bille est en Sn₆₃Pb₃₇. Le pas entre deux centres de billes est de 500 μm et le diamètre des billes est

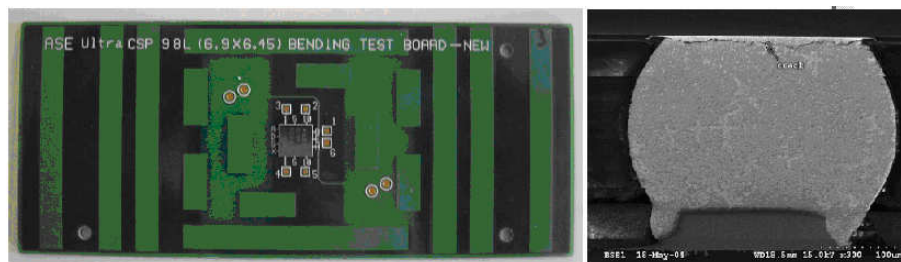


FIG. 1.26 – a) Circuit imprimé employé par les auteurs – b) Mode de défaillance observé [4]

de 300 μm . Les supports sont écartés de 80 mm et les appuis de 40 mm. Les défauts sont détectés par un détecteur d'événements (ED) et le seuil de défaillance est fixé à 500 Ω .

Condition de test	Durée de vie η	Paramètre de Weibull β
1 mm/1 Hz	30332	3.69
1 mm/2 Hz	33728	5.67
1 mm/4 Hz	35550	3.50
2 mm/1 Hz	3163	2.00
2 mm/2 Hz	3179	1.94
2 mm/4 Hz	2696	3.29
3 mm/1 Hz	741	1.94
3 mm/2 Hz	805	3.04
3 mm/4 Hz	942	3.22

TAB. 1.9 – Influence de l'amplitude de flexion et de la fréquence sur la durée de vie [4]

Les auteurs expliquent que globalement les durées de vie à hautes fréquences sont légèrement supérieures à celles à basses fréquences car la vitesse de déformation de la bille est plus élevée, sa résistance mécanique est donc supérieure. Du point de vue des analyses de défaillances, environ 85 % des pièces analysées présentent une fissure similaire à celle de la figure 1.26, côté composant. Ils observent environ 15 % des fissures côté circuit imprimé. Au niveau composant, les billes en défaut sont celles des rangées extérieures et des coins, les observations correspondent à ce qui a été décrit précédemment concernant la distance au point neutre (DNP) lors du test de chute. Il est intéressant de constater que le mécanisme de défaillance est le même entre 1 Hz et 4 Hz dans ces conditions. Cela devra être vérifié dans le cas d'un autre alliage mais permet d'envisager d'accélérer le test.

Le mode de sollicitation est également un paramètre important. En effet, *Wong et Al* [17] utilisent la flexion alternée (en 8-points) pour corréliser les mécanismes de défaillances entre les tests de chute et de flexion, ce test s'appelle le HSCBT pour High-Speed Cyclic Bend Test : test de flexion à haute vitesse.

Le système de fixation est présenté sur la figure 1.27, le mouvement est piloté par un moteur et un arbre à cames pour obtenir une fréquence de vibration de l'ordre de 275 Hz. Les conditions de test et les paramètres qui varient sont définis dans le tableau 1.10, avec

1.3. ETAT DE L'ART

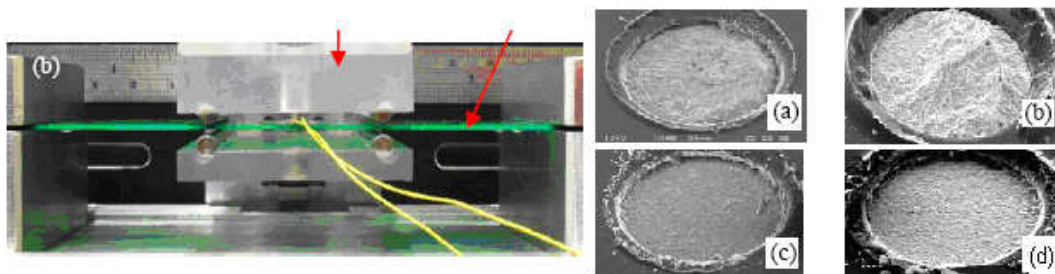


FIG. 1.27 – 1) Essai en flexion alternée – 2) 4 fractographies après essais : a) HSCBT sur SnPb b) Test de chute sur SnPb c) HSCBT sur SnAgCu d) Test de chute sur SnAgCu [17]

Conception	Description
Alliage de soudure	– SnPb₃₇ – SnAg_{3.5} – SnAg_{3.8}Cu_{0.7}
Finition des plots de cuivre	– Electroless Ni-P/Au (ENIG) – Organic surface preservative (OSP)
Conditions de test	Test de chute – Accélération en demi-sinus – Amplitude = 1000 G – Durée = 0.5 ms

TAB. 1.10 – Conditions et paramètres expérimentaux

pour objectif d'établir un lien entre le test de chute et celui de flexion rapide (HSCBT). Les fractographies présentées dans la figure 1.27 montrent que le mode de défaillance est comparable pour un alliage donné, entre le test de chute et celui de flexion rapide (HSCBT). A partir de ces résultats, les auteurs font varier l'amplitude de déformation et calculent par FEA⁸ la déformation plastique induite au niveau du joint de soudure. Cela permet d'observer une relation « contrainte en fonction du nombre de cycles » qui suit une loi en puissance. Les essais ne montrent pas de seuil en-dessous duquel il n'y a pas de défaut, ce qui permet de conclure que l'endommagement est lié à une accumulation de contraintes et non à une contrainte trop élevée. Contrairement aux auteurs précédents, *Wong et Al* montrent que l'augmentation de la fréquence diminue la durée de vie des composants. Cela peut probablement être lié à la différence de modes de défaillances entre les deux travaux, le 1er mode étant dans la soudure et le 2ème étant dans l'empilement sous la bille.

⁸FEA = Finite Element Analysis

1.3. ETAT DE L'ART

Le standard JEDEC IPC-9702 est plus rarement cité pour évaluer la tenue des composants. *Nakamura et Al* [18] utilisent cette méthode pour évaluer la tenue de BGA car, même si les résultats en cisaillement de billes sont satisfaisants, des produits utilisant un revêtement ENIG peuvent avoir périodiquement des défauts. Les auteurs évaluent par la méthode du chargement monotone (test selon la norme IPC-9702) la tenue mécanique de BGA avec plusieurs types de plots : ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) ou SOC (Solder Over Copper : brasure sur cuivre), ceux-ci étant combinés à plusieurs alliages de billes : Sn_{63}Pb , $\text{Sn}_{63}\text{PbCu}_{0.25}$ et $\text{SnAg}_{3}\text{Cu}_{0.5}$.

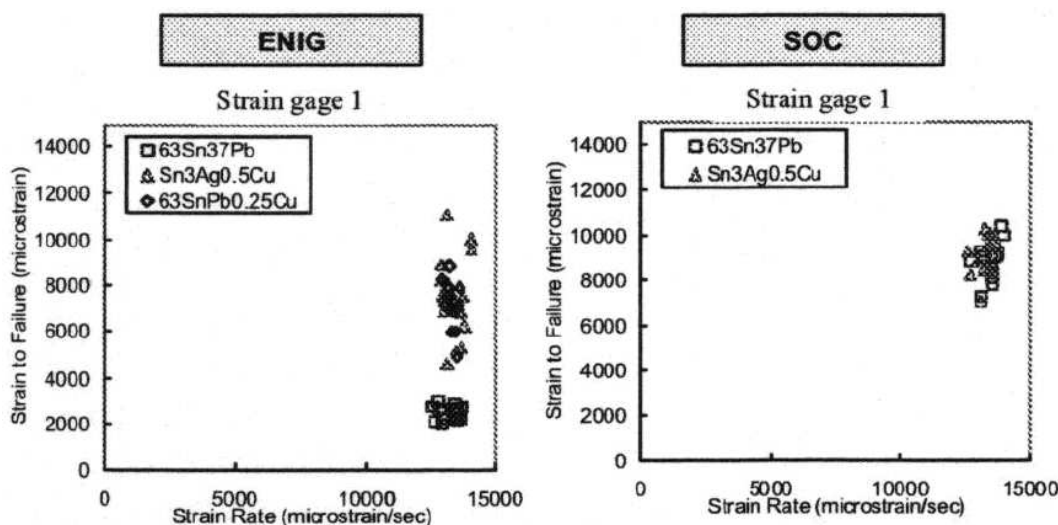


FIG. 1.28 – Comparaison des performances de BGA par le test IPC-9702 [18]

Le traitement des informations proposé par *Nakamura et Al* utilise des représentations graphiques différentes de celles utilisées en analyse de durée de vie. Par exemple, ils comparent pour chacune des trois jauges – et pour une vitesse de déformation relativement constante – la déformation nécessaire pour obtenir la rupture d'un composant (*cf.* figure 1.28). Ensuite, les performances des alliages et des plots (ENIG ou SOC) sont classées en fonction de la force appliquée sur le circuit imprimé au moment de la rupture électrique. Suite aux analyses de défaillances, des histogrammes permettent d'établir la proportion de chacun des modes de défaillances, selon que la fissure ait eu lieu côté circuit imprimé ou côté composant. Ce dernier type de test permet des sollicitations rapides, de l'ordre de $10000 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, et le résultat est presque instantané au regard des 200000 cycles à 1 Hz de la norme JESD22-B113. Il ne constitue pas un test de fatigue et ne permet donc pas de reproduire les conditions de service du produit fini. De plus, l'exploitation est moins simple car les résultats sont sous forme graphique plutôt que sous formes de moyennes.

A la frontière entre le test de chute (sollicitation rapide du circuit imprimé) et du test de flexion (sollicitation en flexion 4-points du circuit imprimé), Motorola et Advanced Micro Devices [19] effectuent un test de flexion 4-points pour lequel la sollicitation est rapide. La hauteur de chute de la sphère en acier permet de contrôler la déformation du circuit imprimé ; les auteurs tracent ainsi des distributions de Weibull pour lesquelles l'axe horizontal (du temps) est gradué en niveaux de déformation. La défaillance est obtenue au

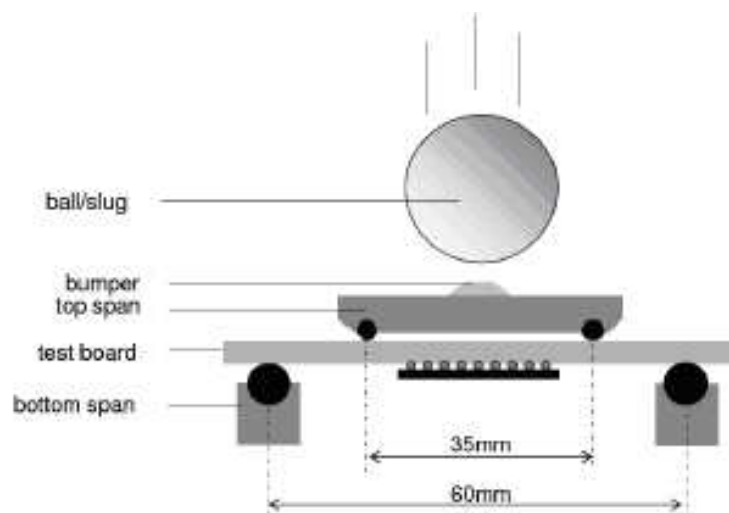


FIG. 1.29 – Méthode de test utilisée par Motorola et Advanced Micro Devices [19]

premier cycle, il ne s'agit donc pas à proprement parler d'un test de fatigue, toutefois il est aussi utilisé dans le cadre de composants pour téléphones portables, en référence à la norme JESD22-B111. Les conclusions concernant l'importance de la couche d'adhésion et de la teneur en argent (Ag) des billes de brasure sont comparables à celles vues précédemment. Il semble également que le meulage en face arrière des composants puisse causer des défauts prématurément.

1.3.3 Simulations

La simulation est une étape essentielle pour améliorer la fiabilité des WL-CSP en amont, c'est-à-dire dans la phase de développement du produit. Cette partie présente donc des méthodes employées pour modéliser la structure, les matériaux et les conditions de test. Une attention particulière est portée aux propriétés des matériaux, celles-ci étant très diverses selon les centres de recherches ou les entreprises. De plus les modèles de comportements des matériaux sont particulièrement difficiles à établir puis à exploiter dans un calcul numérique. Les analyses et tests de fiabilité sur le circuit imprimé requièrent la caractérisation dynamique des propriétés à hautes vitesses de déformation de la brasure. Lors du test de chute, le durcissement dynamique multiplie la limite élastique par rapport à la valeur nominale obtenue lors d'un test de traction quasi-statique. *Pang et Al.* [5] étudient l'influence de la vitesse de déformation de l'alliage des billes sur la simulation du test de chute. Les composants testés sont trois sortes de CSP.

L'augmentation de la contrainte dynamique dans le joint de soudure peut provoquer une déformation cyclique et conduire à une rupture par fatigue avec peu de cycles. D'autre part, la contrainte dans les intermétalliques lors de l'impact peut conduire à la rupture fragile du joint de soudure.

Les tests d'impact ont été réalisés avec une machine dite « Split Hopkinson Pressure bar » (SHPB) pour étudier la réponse dynamique des matériaux de brasure et la rupture

à l'impact des joints de soudure. Les simulations FEM comparent les résultats entre deux caractéristiques du matériau de brasure :

- Un comportement élastique
- La prise en compte de la dépendance à la vitesse de déformation et de la déformation plastique

Le comportement des intermétalliques a été pris en compte lors des simulations. Deux compositions de brasures ont été testées :

- $\text{Pb}_{36}\text{Sn}_{62}\text{Ag}_2$
- $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$

Deux finitions sur les plots de cuivre sont également évaluées : ENIG et OSP. Pour la modélisation par éléments finis trois méthodes sont couramment utilisées :

- Modélisation complète de la chute
- Hybridation Essais/Modèle avec le déplacement en entrée (Input-D Model)
- Modèle avec l'accélération en entrée (Input-G Model)

La géométrie modélisée est un quart de circuit imprimé avec le composant en son centre. L'accélération est appliquée sur ses bords externes, tandis que les bords internes reçoivent les conditions aux limites propres aux symétries. La bille la plus fragile, en coin, est maillée plus finement que les autres. *Pang et Al.* [5] utilisent la méthode Input-G pour modéliser l'essai de chute.

Matériaux	E (GPa)	σ_Y (MPa)	Module tgt (MPa)	ν	Densité (kg/m ³)
Brasure	41.8	35.1	127	0.35	7500
Circuit imprimé	20 (x,y)	-	-	0.11	1900
Substrat	26 (x,y)	-	-	0.11	2000
Plot de Cu	155.2	120	1000	0.34	8900
Silicium	131	-	-	0.278	2330
Résine	16	-	-	0.24	1970

TAB. 1.11 – Propriétés des matériaux utilisés par *Pang et Al.* [5] – E est le module d'Young, σ_Y la limite élastique et ν le coefficient de Poisson

L'effet de la vitesse de déformation n'apparaît pas dans le tableau 1.11 mais est effectivement pris en compte. Les auteurs montrent graphiquement une augmentation sensible de la contrainte à mesure que la vitesse de déformation augmente, bien que les valeurs numériques ne soient pas mentionnées. L'effet d'amortissement est important dans le comportement élastique du circuit imprimé bien que sa détermination expérimentale soit difficile. La calibration optimale du facteur d'amortissement a donc été effectuée par simulation numérique et donne pour résultat 0.02. Cette valeur a été obtenue en comparant l'accélération du centre du circuit déterminée par simulation (*cf.* figure 1.30) avec celle mesurée lors des essais de chute.

Le logiciel Ansys permet d'afficher les contraintes principales classées par ordre croissant : la 1ère est la plus élevée, le 2ème est une valeur intermédiaire et la 3ème est la plus basse. La comparaison de la première contrainte principale en fonction du modèle de comportement matériau utilisé donne les résultats suivants :

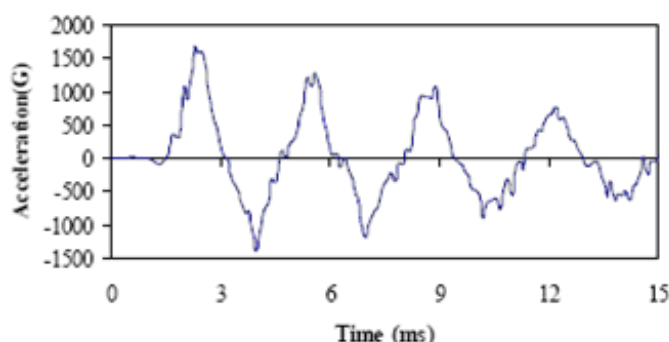


FIG. 1.30 – Accélération du nœud central du circuit imprimé à partir de la simulation [5]

- Pour le modèle élastique : 150 MPa
- Pour le modèle élasto-plastique (dépendant de la vitesse de déformation) : 100 MPa

Les simulations montrent que les intermétalliques ont une influence significative lorsqu'ils sont utilisés avec le modèle élasto-plastique (avec prise en compte de la vitesse de déformation). En effet, la déformation plastique est plus élevée sans intermétalliques que avec ceux-ci. On constate que les contraintes au sens de Von Mises sont plus élevées d'environ 15 % lorsque les intermétalliques ne sont pas pris en compte. Les calculs montrent également qu'un modèle purement élastique peut conduire à surestimer la contrainte de Von Mises dans la brasure. Les auteurs montrent aussi que la prise en compte des intermétalliques améliore la précision du calcul des déformations plastiques et des contraintes de Von Mises.

Lall et Al. [6] modélisent les interconnexions en brasures sans aucune hypothèse de symétrie géométrique ou de chargement. Le problème met en jeu plusieurs échelles, de la dynamique transitoire macroscopique des assemblages électroniques à l'histoire microstructurale des connecteurs. L'approche proposée ici permet la prédiction des modes symétriques et antisymétriques, qui peuvent être prépondérants lors du test de chute. Le comportement dynamique transitoire de l'assemblage lors d'une chute libre ou selon la norme JEDEC a été établi en mesurant des vitesses de déformations et de déplacements élevées. Les prédictions du modèle ont été corrélées avec les mesures expérimentales.

Composants	Masse réelle (g)	Masse simulée (g)
Circuit imprimé	28.15	28.25
CSP	0.140	0.142
Masse	31.8	31.8

TAB. 1.12 – Comparaison des masses dans la modélisation de *Lall et Al.* [6]

Ces auteurs testent plusieurs techniques de modélisation explicite pour modéliser le test de chute. L'article concentre les efforts sur la modélisation à plusieurs échelles. Les techniques étudiées sont :

- Poutres de Timoshenko avec des éléments coques conventionnels pour modéliser les interconnexions

- Poutres de Timoshenko avec des éléments coques continus pour modéliser les interconnexions
- Sous-modélisation explicite (ce qui regroupe les interconnexions, une partie du composant et une partie du circuit imprimé)

Les résultats sont corrélés avec des mesures par caméra à haute vitesse. Il semble qu'aucun modèle ne soit meilleur, l'erreur entre la mesure et la simulation dépend du lieu d'observation.

Zhao et Al. [20] recherchent l'influence de paramètres de finition sur la fiabilité de composants BGA. Cette étude s'intéresse aux phénomènes mécaniques liés au test de chute selon la norme JEDEC à travers la simulation numérique. Il apparaît que le circuit imprimé joue un rôle important dans la performance lors de cet essai. C'est pourquoi une comparaison entre un circuit imprimé JEDEC avec un puis deux composants est présentée. La configuration du circuit imprimé à deux composants est présentée sur la figure 1.31.

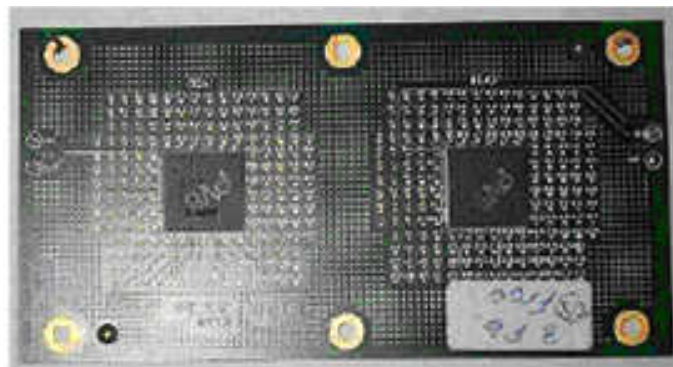


FIG. 1.31 – Configuration d'un circuit « alternatif » avec deux composants assemblés [20]

Le calcul est effectué avec un chargement dit « Input-G » et avec trois méthodes pour la résolution des équations :

- Explicite
- Implicite
- Modale dynamique

Les auteurs déconseillent la méthode explicite qui prend beaucoup de temps mais permet une précision élevée. La méthode implicite permet un temps de calcul moyen pour une bonne précision des résultats. La méthode modale dynamique est rapide mais la précision dépend de la superposition des modes. Les conclusions de l'article sont les suivantes :

- Pour les tests JEDEC, la localisation du composant est dépendante du niveau de chargement du boîtier ce qui rend l'analyse statistique plus complexe
- La configuration du circuit imprimé a un impact significatif sur la fiabilité des joints de brasures, donc il faudrait spécifier plus d'informations que l'accélération et la durée du pulse
- Les billes « sacrificielles » pour le test de cyclage thermique peuvent ne pas fournir une protection adéquate lors du test de chute
- L'épaisseur du boîtier et la disposition des billes ont l'impact le plus important sur

la fiabilité de la structure ainsi conçue.

Un modèle géométriquement très détaillé est proposé par *Tee et Al.* [7] dans le cadre d'une structure RDL (ReDistribution Layer). Leur modèle intègre suffisamment de données pour être utilisé pour le test de chute et celui de cyclage thermique. Le modèle prend en compte des détails tels que les pistes de cuivre du circuit imprimé, les intermétalliques et la métallisation sous les billes. Les micro-sections sont effectuées « en L » pour vérifier la correspondance avec les zones fortement contraintes en simulation. La micro-section « en L » consiste à observer deux plans coïncidents de la bille, perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la puce. Cela permet aux auteurs de proposer un modèle de sollicitation à l'échelle de la bille. Ce modèle montre l'interaction entre les différentes couches sur la sollicitation qui conduit à la défaillance (rupture mécanique). On comprend dès lors que la simulation numérique, au-delà de la prédiction du nombre de cycles de fatigue (tenue au test de chute) permet de déterminer les paramètres critiques pour l'amélioration de la fiabilité des WL-CSP. Avant d'atteindre ce niveau de détails, *Tong-Yan Tee* et *Jing-En Luan* notamment ont publié un travail avec une méthode générale pour la prédiction de la fiabilité des WL-CSP qu'ils ont appliqué à plusieurs boîtiers. Un résumé de ces articles et proposé ci-dessous. Un quart de la géométrie est représenté en raison des symétries : circuit imprimé positionné horizontalement et composants vers le bas. Dans le cas précis du QFN il y a 16 puces mais une seule au centre du circuit imprimé est modélisée afin de réduire le temps de calcul. L'équation régissant ce système dynamique linéaire à un degré de liberté peut être exprimée ainsi :

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1.4)$$

Où M est la masse, C le coefficient d'amortissement et K la constante de rigidité du système. La méthode de résolution d'équations d'ANSYS/LS-Dyna est utilisée pour la simulation en dynamique. Comparée à la méthode implicite, la méthode explicite est conditionnellement stable mais plus pratique pour le test de chute (car le temps d'impact est très court, environ 1 ms). Le pas de temps critique nécessaire pour obtenir une solution stable (condition de Courant) est :

$$\Delta t = l\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (1.5)$$

Où l est la taille du plus petit élément, ρ la masse volumique et E le module d'Young. Normalement un facteur de 0.9 est appliqué au pas de temps critique pour assurer la stabilité de la solution. Pour ce modèle la taille des éléments varie beaucoup pour différents matériaux. Le pas de temps minimum est généralement de l'ordre de 10^{-9} s. La technique d'augmentation de la densité peut être appliquée pour réduire le temps de calcul comme le montre le tableau 1.13. Il s'agit en fait d'augmenter la masse volumique des éléments qui ont le plus petit pas de temps. En général la masse additionnelle est négligeable comparée à la masse totale (moins de 10^{-5} %) ce qui n'affecte pas la distribution d'accélération.

La technique d'augmentation de la densité est acceptable tant que la masse modifiée n'est pas dans le matériau de brasure. Afin d'économiser du temps de calcul, une vitesse « proche de l'impact » est généralement utilisée comme condition initiale pour l'objet qui subit la chute. D'après la cinématique, la vitesse théorique à l'impact en chute libre peut

1.3. ETAT DE L'ART

Facteur d'augmentation	Pas de temps min (ns)	Temps de résolution (H)	Contrainte dans la brasure (MPa)	% Diff.
1	2	10	25.11	-
2	4	7	24.25	-3.4
4	8	5	24.18	-3.7
10	20	1	26.36	5.0

TAB. 1.13 – Résultats de l'effet d'augmentation de la densité [7]

être reliée à la hauteur par :

$$V_t = \sqrt{2gH} \quad (1.6)$$

Ainsi, dans le cas du QFN⁹, pour une hauteur de 1.5 m la vitesse d'impact théorique est de 5425 mm/s. Les propriétés de base requises en dynamique élastique linéaire sont :

- Le module d'Young E ,
- La masse volumique ρ ,
- Le coefficient de Poisson ν .

Celles-ci sont exprimées dans le tableau 1.14.

Matériau	Module d'Young (MPa)	ν	Densité
Puce	131000	0.3	2.33
Substrat	5000	0.3	2.2
Résine	25506	0.3	1.97
Plot de cuivre	117000	0.3	8.94
Circuit imprimé	16850	0.11	1.82
Bloc d'Al	70000	0.33	2.7
Vis en acier	200000	0.3	7.8
Brasure eutectique	34000	0.363	8.41
Masque de brasure	5000	0.3	1.15

TAB. 1.14 – Propriétés des matériaux utilisés pour la simulation de la chute d'un QFN

Dans la simulation présentée ici même les vis sont modélisées. Au niveau du maillage, dans le cas du QFN, il y a un total de 8543 éléments et de 9156 nœuds. La surface de contact est définie entre l'objet qui subit la chute et la surface rigide sur laquelle a lieu l'impact. Ces simulations permettent de conclure que la position des puces est critique vis-à-vis de la résistance au test de chute. Plus elles sont proches du centre et plus le risque de rupture est élevé. Dans le cas du boîtier BGA les tests de flexion et de TCT ont été analysés expérimentalement et numériquement. Les résultats de la simulation sont corrélés qualitativement avec les essais, l'interface de rupture et le joint de soudure critique.

⁹QFN (Quad Flat No leads) : boîtier de type CSP montable sur circuit imprimé qui ne contient pas de fil pour assurer les connexions

Encore une fois la position du boîtier sur le circuit imprimé est importante pour les tests de chutes et de flexion mais pas pour le test thermique. Les composants situés au centre du circuit imprimé risquent de céder plus tôt que les autres et la résine de renfort est moins efficace à mesure que l'on se rapproche du centre. Lors du test de chute, le chargement peut être imposé selon plusieurs méthodes, *Yeh et Al.* [36] en font une synthèse appuyée par les démonstrations mathématiques correspondantes. La première méthode citée est baptisée « chute libre » et consiste à simuler le véhicule de test et la surface de contact. La deuxième méthode appelée « Input-G » est utilisée notamment par *Tee et Al.* et développée ci-dessous. La 3ème méthode décrite, nommée « support excitation scheme » (modèle de sollicitation du support) est moins répandue. Celle-ci a été développée par *Yeh et Lai* [21] en suivant une méthodologie appliquée en génie civil.

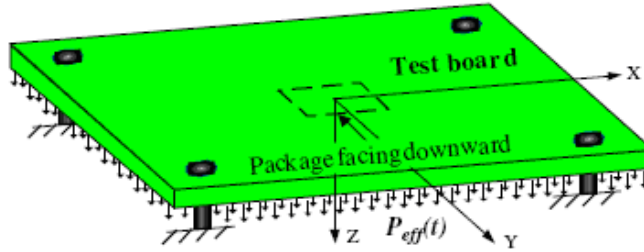


FIG. 1.32 – Schéma de la méthode dite du « support excitation scheme » [21]

La méthode du « support excitation scheme » est basée sur un système de coordonnées locales dont l'origine est située sur le plan de l'accéléromètre. De la même manière que pour l'« Input-G », seul le circuit de test doit être modélisé. Les équations du mouvement et les conditions initiales sont les suivantes :

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} &= P_{eff}(t) \\ U_{\Omega}(0) &= 0, \dot{U}_{\Omega}(0) = 0 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Le chargement effectif du support peut être écrit $P_{eff}(t) = -[M]\{I_Z\}G(t)$, où $\{I_Z\}$ représente un vecteur identité particulier dont tous les éléments sont zéro sauf celui le long de la direction de chute qui est unitaire. Le « support excitation scheme » est équivalent à la méthode « Input-G » à ceci près que les forces résultantes de l'impact sont traduites en forces dépendantes du temps sur les corps. Les méthodes d'intégration temporelle sont valides à la fois en explicite et en implicite pour cette modélisation. Sur la figure 1.32 les quatre vis sont encastrées tandis que les efforts sont répartis sur l'ensemble du PCB.

La quatrième méthode discutée par les auteurs s'appelle « superposition modale scheme », celle-ci consiste à évaluer la réponse spectrale d'une structure ainsi que les champs mécaniques. Cette technique est très efficace d'un point de vue numérique, comparativement aux schémas d'intégration numériques implicite et explicite. Les modes correspondants aux fréquences de vibration du véhicule de test sont calculés analytiquement ou numériquement. Les réponses structurales sont obtenues par superposition modale. Cependant la superposition modale n'est valide que quand la structure travaille dans son domaine linéaire

élastique.

1.3.4 Alliages avec et sans plomb

Tanaka et Al. [22] améliorent la fiabilité mécanique des BGA en diminuant la quantité d'argent (Ag) et en introduisant une faible quantité de nickel (Ni) dans les alliages des brasures. Ainsi, la fiabilité au test de chute avec du $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ (LF 35) est deux fois meilleure que celle avec du $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ (LF 45). Ceci tient au fait que les alliages avec moins d'argent ont une dureté plus faible. Différentes fissures ont aussi été détectées :

- Les fissures dans le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ sont principalement dans la brasure
- Les fissures dans le $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ étaient près de l'interface brasure/électrode pour tous ceux testés en chute

Les observations montrent que le nickel est concentré principalement aux interfaces et forme des composés tels que le $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$. Cet article présente plusieurs morphologies d'intermétalliques et plusieurs localisations de fissures. La croissance des intermétalliques en Cu_6Sn_5 est causée par la contrainte de compression sur ce même composé. Ces différences de morphologies sont montrées dans la figure 1.33. La fissuration du $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ dans les intermétalliques est due à la différence de contrainte entre le Cu_6Sn_5 (en compression) et le Cu_3Sn (en traction). Cela signifie que le nickel s'est substitué au cuivre dans le Cu_6Sn_5 et, comme le rayon atomique de l'atome de nickel est plus petit, il y eu relaxation de la structure. La différence de contrainte entre $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$ et Cu_3Sn s'explique par les substitutions de nickel qui augmentent la résistance au choc dans les BGA avec des billes en $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$.

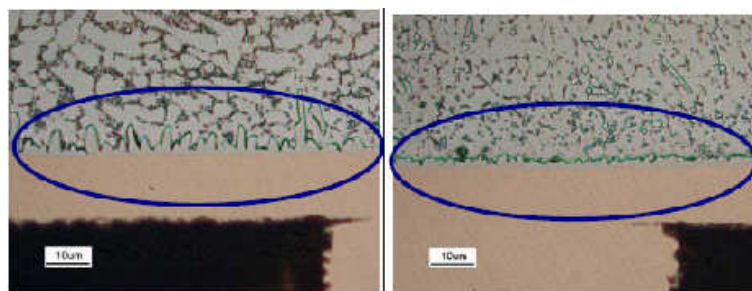


FIG. 1.33 – Observation des intermétalliques – A gauche $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ et à droite $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ [22]

On constate sur la figure 1.34 à gauche que le $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ fissure dans le voisinage des intermétalliques alors que le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ à droite fissure dans la brasure, cette différence est imputable à la présence de nickel dans le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$. Les résultats du test de chute montrent que le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ résiste à plus de 90 chutes sur un substrat Cu/OSP et à environ 45 chutes sur un substrat NiSub. Le $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$ supporte environ 20 chutes sur l'un ou l'autre des substrats. Les principaux enseignements sont :

- Le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ ($\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$), auquel a été ajouté un faible taux de nickel présente une dureté inférieure après refusion comparativement au $\text{SnAg}_3\text{Cu}_{0.5}$. De plus, la dureté du $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$ change peu avant et après refusion sur Cu-OSP
- Le nickel existe principalement dans le Cu_6Sn_5 et non dans le Cu_3Sn

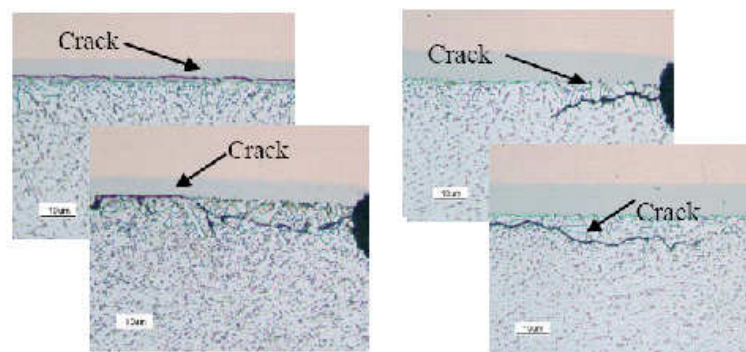


FIG. 1.34 – Observation des fissurations après le test de chute [22]

Lempinen et Al. [8] étudient les joints de soudure des assemblages de circuits imprimés qui doivent supporter des contraintes et des déformations mécaniques en fonctionnement. La fiabilité des joints de soudure à l'étain et sans-plomb a été évaluée par des essais en flexion cyclique. L'originalité de l'essai réside dans le fait que la flexion est appliquée en un point, au centre du circuit imprimé. Les pâtes à braser de différents fournisseurs ont été utilisées. La performance de chaque diode est contrôlée continuellement en mesurant le signal électrique appliqué au cours du temps. Les joints de soudure sont considérés robustes car aucune défaillance n'est apparue après 500 cycles avec une déflexion de 10 mm. Toutefois, un taux de défaillance de 2.08 % à 2.78 % a été mesuré après les derniers essais. Les durées de vie de différents joints de soudure sans et avec plomb sont comparées par analyse de Weibull. Le circuit imprimé testé contient 3 rangées de 24 composants chacune et plusieurs dimensions de plots ont été testées.

Cycles	Composants	Déflexion (mm)	Temps de cycles (s)	Temps de palier
500	0603, 0805, 1206	10	5	0.5
300	0603, 0805, 1206	35	4.2	0.5

TAB. 1.15 – Paramètres utilisés lors du test de flexion cyclique [8]

La fiabilité des brasures est modélisée en utilisant la distribution de Weibull à 2 paramètres. Les résultats sont résumés dans le tableau 1.16.

A partir de ces résultats, les auteurs concluent que la fiabilité mécanique des différentes brasures sans et avec plomb ne montrent pas de différence significative en se basant sur leurs durées de vie. Cependant ils montrent que lorsque la distance par rapport au point de flexion augmente, la tenue en fatigue augmente. Une méthode d'homogénéisation est développée par *Hirata et Al.* [9]. La relation entre les trous traversant (vias) et les contraintes dans les brasures de CSP ont été examinées en utilisant la méthode d'homogénéisation avec la méthode des éléments finis appliquée au test de chute. Au lieu de modéliser tous les vias, une valeur équivalente est utilisée pour le motif périodique des trous dans le développement du modèle du substrat. Les résultats de la simulation indiquent que les propriétés du matériau équivalent concernant le via ont un impact important sur l'augmentation de la contrainte au niveau des brasures.

Ordre d'apparition des défauts	Alliages de brasure			
	SnPb	SnPbAg	SnAgCu	SnCuNi
1er	135	116	153	123
2ème	154	161	183	276
3ème	158	170	186	-
4ème	165	-	192	-
5ème	184	-	245	-
6ème	238	-	253	-
7ème	-	-	293	-
8ème	-	-	-	-
Nombre total	216	144	288	72
Taux de défaillance (%)	2.78	2.08	2.43	2.78

TAB. 1.16 – Résultats du test de flexion pour analyse de Weibull – Nombre de cycles à la rupture

Méthode multi-échelle conventionnelle

On postule qu'une macrostructure possède une microstructure périodique. Le calcul n'est pas réalisable sur la macrostructure en raison du nombre de nœuds dans le système. En général on prend le module du matériau le plus volumineux ou une loi composite pour modéliser la structure. La méthode « du zoom » consiste à mailler le modèle micro finement et mailler le modèle macro plus largement. Avec le logiciel Ansys, cette méthode est aussi appelée « sous-modélisation ». Les deux étapes sont les suivantes :

- On applique le chargement au modèle à l'échelle macroscopique (pressions, déplacements. . .)
- Puis on applique la même déformation au modèle à l'échelle microscopique

C'est pourquoi on parle aussi de simulation en deux étapes. Comme il faut une méthode d'interpolation linéaire pour les nœuds rajoutés, la précision est mauvaise. La méthode d'homogénéisation a déjà été utilisée dans la simulation du test de chute sur des circuits imprimés.

Si L représente l'échelle macroscopique et l l'échelle micro, alors le rapport est : $\mu = \frac{l}{L}$. L'aspect le plus remarquable des équations qui en découlent c'est qu'elles ne dépendent pas de μ et donc pas de l'échelle.

On dessine une cellule élémentaire que l'on homogénéise et on calcule la matrice de rigidité équivalente. L'inconvénient de cette méthode est que la distribution de contrainte dans le modèle microscopique ne peut pas être simulée avec beaucoup de précision. Afin de résoudre ces problèmes les modifications suivantes ont été apportées à la simulation :

- Au lieu d'utiliser le modèle complet du via, un matériau équivalent utilisant la méthode d'homogénéisation puis divisé en mailles grossières est créé,
- Utilisation de la méthode implicite qui évite d'être limité par la condition de Courant,
- Le maillage est optimisé.

Les propriétés des matériaux utilisés figurent dans le tableau 1.17.

1.3. ETAT DE L'ART

	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Densité
Puce	173.0	0.28	2.0
Cuivre	131.5	0.34	8.8
Circuit imprimé	20.0	0.18	2.4
Brasure	41.6	0.41	8.3

TAB. 1.17 – Propriétés matériaux utilisées par *Hirata et Al.* [9]

La méthode de Taguchi est appliquée par *Lai et Al.* [10] pour obtenir la conception optimale en améliorant la fiabilité des WL-CSP dans la condition B du test de chute selon la norme JEDEC. Celle-ci recommande un pic d'accélération qui a la forme d'une demi-sinusoïde avec une amplitude de 1500 G et une durée de 0.5 ms. La matrice d'expériences est conçue pour l'optimisation de trois facteurs : composition de l'alliage de brasure, épaisseur du silicium et des couches de passivation polyimide. La technique de sous-modélisation permet de travailler avec des caractéristiques dépendantes de l'histoire du matériau, ce qui inclut la réponse élasto-plastique des joints de soudure et la non-linéarité structurale lors de la chute. Les effets de ces facteurs sur la fiabilité du WL-CSP sont comparés et classés. Les propriétés des matériaux sont divisées en deux groupes, ceux auxquels on attribue des propriétés élastiques et la brasure pour laquelle on donne une courbe contrainte/déformation. Seules les propriétés de cette deuxième catégorie sont explicitées ici.

Composition	σ_1	σ_2	σ_3
SnAg ₁ Cu _{0.5}	32.49	78.00	99.32
SnAg _{2.6} Cu _{0.6}	52.49	125.69	146.41
SnAg ₄ Cu _{0.5}	55.13	133.18	168.98

TAB. 1.18 – Propriétés des alliages utilisés pour la simulation par *Lai et Al.* [10]

Deux couches de la structure sont composées de polyimide, une est déposée directement sur le silicium, et l'autre sert de passivation (donc ouverte) sur la couche en aluminium. Dans le tableau 1.18, les contraintes correspondent aux déformations suivantes (le coefficient de Poisson est supposé de 0.3 et la densité de 7.44) :

- $\varepsilon_1 = 0.14 \%$
- $\varepsilon_2 = 0.4 \%$
- $\varepsilon_3 = 100 \%$

Cette simulation est couplée avec la méthode de Taguchi afin de faire ressortir les points suivants :

- Que ce soit pour la rupture des intermétalliques ou de l'alliage, la composition de la brasure est le facteur le plus important pour la fiabilité au test de chute, dans le cas particulier du WL-CSP,
- En considérant la rupture des intermétalliques comme le mode principal de rupture des joints sans-plomb, la fiabilité peut être améliorée en adoptant des alliages avec peu d'argent (Ag) comme le SnAg₁Cu_{0.5}, en augmentant l'épaisseur de la 1ère couche de polyimide (sur le silicium) mais en diminuant celle de la couche 2ème couche de

1.4. RÉSUMÉ DE LA PREMIÈRE PARTIE

polyimide qui recouvre le plot en aluminium.

L'influence de trois alliages sur la fiabilité des WL-CSP – pour le cyclage thermique et le test de chute – a été évaluée par *Chen et Al.* [11], ce sont : $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$, $\text{SnAg}_2\text{Cu}_{0.5}$ et $\text{SnAg}_{2.6}\text{Cu}_{0.6}$. Ils utilisent comme critère le nombre de cycles pour obtenir le premier défaut. La taille du boîtier est de 8x8x0.775 mm.

Alliage	$\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$	$\text{SnAg}_2\text{Cu}_{0.5}$	$\text{SnAg}_{2.6}\text{Cu}_{0.6}$
Nombre de chutes pour obtenir le 1er défaut	67	30	28

TAB. 1.19 – Influence de la composition de la brasure sur la tenue mécanique des WL-CSP, *Chen et Al.* [11]

A partir du tableau 1.19 les auteurs concluent que la performance au test de chute est inversement proportionnelle à la quantité d'argent (Ag). Les défauts ont été observés en utilisant la technique dite de « dye and pry » qui consiste à enlever la puce du support sur lequel elle est fixée (celle-ci sera plus détaillée dans le Chapitre 2). Les fissures se sont propagées à l'interface entre la couche d'adhésion et la brasure, les trois alliages présentant le même mode de défaillance. L'ensemble des travaux sur les alliages permet de dégager une tendance claire quant à l'utilisation de billes en SnAgCu même si les proportions des éléments d'additions peuvent varier. Toutefois un certain nombre de recherches se poursuivent pour continuer à optimiser l'usage des billes d'interconnexions. Ainsi une partie sera consacrée par la suite à évaluer l'influence de l'ajout de 500 ppm de nickel dans ces billes. De la même façon *Liu et Al.* [37] étudient le système SnAgCu-Ti et SnAgCu-Mn pour le comparer aux alliages connus tels que le $\text{SnAg}_{1.0}\text{Cu}_{0.5}$ sur le test de chute de BGA. L'effet de cet alliage sur la fiabilité est pris en compte pour différentes finitions : OSP, ENIG et NiPdAu.

Cet article conclut sur une amélioration substantielle de la tenue mécanique des CSP au test de chute bien que la dispersion des résultats semble augmenter. Le manganèse produit un effet similaire au titane et les explications apportées sont :

- Accroissement de la taille des grains et des dendrites, ce qui augmente la dureté de l'alliage
- Inclusions de titane dans la couche d'intermétalliques
- Réduction de l'épaisseur des intermétalliques

Les mesures de fluage montrent que l'ajout de titane ne compromet pas la tenue en cyclage thermique.

1.4 Résumé de la première partie

Les WL-CSP sont des composants électroniques avec des interconnexions réalisées par des billes de brasure. Ces composants sont assemblés, soudés sur des circuits imprimés pour être testés mécaniquement. Les deux essais mécaniques normalisés sont l'essai de chute et celui de flexion. Dans les deux cas, une sollicitation répétée aboutit à une rupture en fatigue au niveau de l'interconnexion. Dans les articles étudiés, les recherches sont concentrées sur :

1.4. RÉSUMÉ DE LA PREMIÈRE PARTIE

- Le comportement du circuit imprimé (déplacement, déformation, etc.).
- La caractérisation mécanique des matériaux qui constituent les interconnexions.
- La modélisation des contraintes dans les interconnexions.

La caractérisation des interconnexions est focalisée sur deux éléments : les composés intermétalliques et l'alliage de brasure. Concernant l'essai de chute, le comportement de la brasure est modélisé soit en élastique linéaire, soit avec un comportement élasto-plastique isotrope, ou encore avec un comportement dépendant de la vitesse de déformation. La sollicitation appliquée au circuit imprimé est également modélisée de plusieurs façons bien que la méthode dite Input-G semble être la plus répandue. L'essai de flexion est moins largement étudié que le précédent, des résultats sont présentés sur des composants BGA. L'influence des paramètres de test tels que la fréquence et l'amplitude de la sollicitation sont également étudiés.

La prédiction de la fiabilité des composants électroniques repose donc sur une approche pluridisciplinaire qui regroupe :

- Les procédés industriels de fabrication pour chacun des éléments.
- La réalisation expérimentale des essais de fiabilité et leur interprétation, notamment par l'étude statistique.
- La caractérisation mécanique des matériaux mis en jeux.
- La modélisation du comportement des matériaux et des conditions expérimentales de manière à simplifier et à simuler à l'aide de la FEM¹⁰ les essais de fiabilité.
- L'étude des modèles de fatigue pour relier les paramètres de sortie de la simulation à un nombre de cycles de l'essai de fiabilité.

Dans les chapitres qui suivent un certain nombre de points ne sont pas totalement résolus. En effet, des outils tels que la nanoindentation offrent un champ d'étude très large. Le choix a donc été d'apporter un avancement sur chacun de ces points tout en précisant à chaque étape quels pourraient être les axes d'investigation futurs.

¹⁰FEM : Finite Element Methode ou Méthode des Eléments Finis

1.4. RÉSUMÉ DE LA PREMIÈRE PARTIE

Deuxième partie

Essais mécaniques

Chapitre 2

Les essais mécaniques

Dans un cadre industriel, les essais mécaniques servent un objectif précis : évaluer les performances d'un nouveau boîtier, le qualifier par rapport à des contraintes données. Les produits sont complexes et peuvent contenir de nombreuses fonctionnalités, ce qui se concrétise par un certain nombre de niveaux de métallisations et de diélectriques. Il faut simplifier un produit tout en gardant un comportement représentatif du résultat final pour pouvoir le caractériser. Cette version simplifiée est ensuite testée selon plusieurs méthodes. Ensuite, l'échantillon de composants testés est analysé avec des outils statistiques et avec des outils d'observation. La mise en place pratique de l'essai de chute a été présentée dans l'état de l'art ainsi que des paramètres connus pour être significatifs. Cette partie présente la mise en place de l'essai de flexion et plusieurs sortes d'observations sont décrites.

2.1 Essais de chute

Les essais de fiabilité sont généralement exploités sous forme statistique pour en extraire des éléments de comparaisons quantifiables. Dans un premier temps cette partie présente des résultats sur les essais mécaniques de chute et de flexion. Ensuite, une partie discute des fonctions statistiques utilisées, en se basant sur les résultats des tests.

2.1.1 Résultats des essais de chute

Les essais de chute présentés ici visent deux objectifs :

- Evaluer l'impact de paramètres qui ne se trouvent pas dans l'état de l'art.
- Poser les bases nécessaires à une corrélation avec la modélisation qui sera présentée par la suite.

2.1.1.1 Observation des ruptures dans les composants

La réussite de la prédiction de durée de vie des WL-CSP et leur optimisation repose principalement sur la compréhension des mécanismes à l'origine de la défaillance. C'est pourquoi les observations liées aux résultats du test de chute sont décrites. Par exemple, on cherche à retrouver les concentrations de contrainte là où les fissures sont localisées. La

2.1. ESSAIS DE CHUTE

résistance de composants au test de chute a été évaluée en interne. Concernant les WL-CSP, on parle de technologie à partir du moment où un matériau change dans la structure de l'interconnexion. La structure est constituée de l'empilement de matériaux déposés sur le silicium.

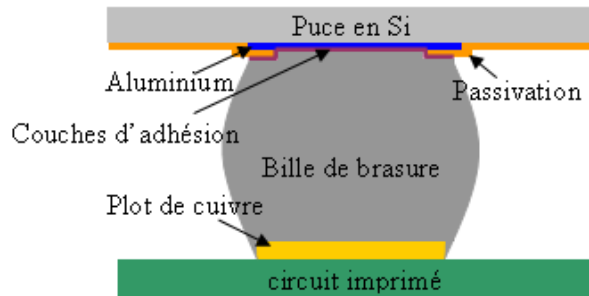


FIG. 2.1 – Schéma d'une interconnexion dans les WL-CSP étudiés

La figure 2.1 représente la structure de l'interconnexion, cette structure est composée d'un plot d'aluminium, d'une passivation et de la couche d'adhésion. Le composant testé est un composant avec 25 billes disposées en une matrice carrée de 5 lignes et 5 colonnes (5x5) avec un pas de 500 μm . Les billes sont composées de l'alliage sans plomb $\text{SnAg}_{1.0}\text{Cu}_{0.5}$.

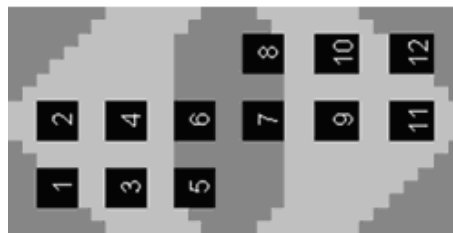


FIG. 2.2 – Exemple de positionnement des composants sur un circuit imprimé

Sur un circuit imprimé le critère couramment utilisé repose uniquement sur la défaillance des puces centrales. Dans l'exemple du schéma de la figure 2.2 les lois statistiques – distributions de Weibull – ne portent que sur les composants centraux (n°5, 6, 7 et 8 sur le schéma). Ceci a été établi en considérant que dans cette zone, les 4 composants subissent le même niveau de contrainte et le même type de sollicitation. De fait, statistiquement ce sont ces composants qui cassent en premier. La norme prévoit de retrouver cet état de fait dans la configuration JEDEC pour laquelle les puces centrales sont au nombre de 3 et alignées sur la largeur du PCB. Pourtant, au contraire du standard interne, de récentes études tendent à montrer que le standard international génère plus de contraintes au niveau des composants situés près des 4 coins, près des vis [14]. Cette contradiction apparente peut être attribuée à plusieurs causes :

- Les dimensions du standard JEDEC sont très différentes du standard interne (la surface du circuit imprimé JEDEC est environ deux fois plus grande)
- La disposition des composants est également différente (plus de composants dans le cas de la norme internationale), ce qui influence la quantité et la répartition de cuivre dans la conception du circuit imprimé

2.1. ESSAIS DE CHUTE

- Les conditions de sollicitations – durée de l’impulsion d’accélération – sont différentes (0.5 ms de pulse au lieu de 1 ms)

Ces observations permettent de localiser les composants qui, les premiers, ont des défaillances. A présent on observe les parties qui cassent à l’intérieur du produit.

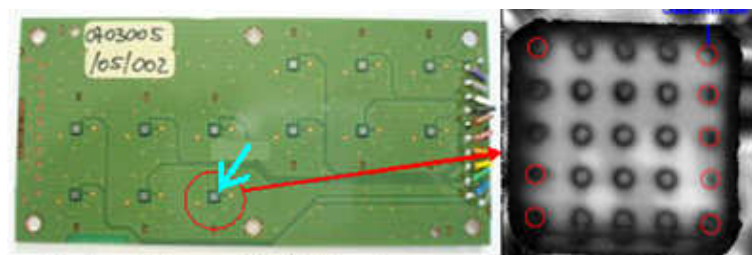


FIG. 2.3 – Localisation des défaillances dans un WL-CSP par microscopie acoustique (SAM)

La figure 2.3 montre un résultat typique d’analyse de défaillance après un test de chute. La puce indiquée est observée par microscopie acoustique (SAM). Les billes de brasure apparaissent en noir et le silicium en gris. Une délamination se manifeste par l’éclaircissement des billes comme c’est le cas pour celles entourées d’un cercle rouge. Ce type d’analyse est complexe mais permet de localiser précisément les endroits auxquels il faut effectuer une micro-section. La rupture est dite « par bande » : les connections sont affectées par rangées (colonnes ici) et l’extérieur casse avant les rangées internes. L’observation d’un grand nombre d’essais, arrêtés lorsque le 1er composant d’un circuit imprimé casse, montre que les billes des 4 coins sont les premières à subir une délamination ou une fissuration.

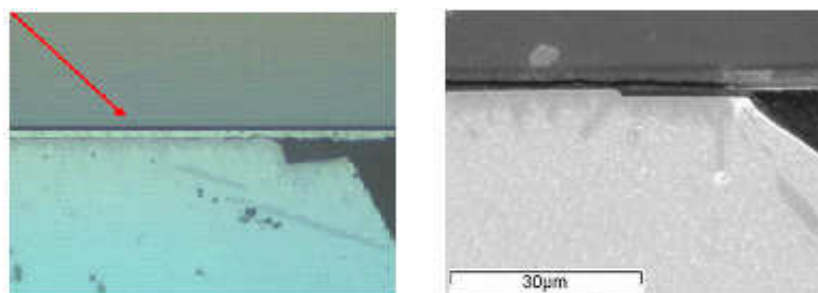


FIG. 2.4 – a) Fissure dans la passivation, délamination entre aluminium et couche d’adhésion b) Fissure dans la passivation puis dans l’aluminium

Sur la figure 2.4a) on observe un exemple typique de rupture dans la bille. Il apparaît une fissure totale dans la passivation puis entre le plot d’aluminium et la couche d’adhésion. En général la même observation peut être effectuée sur l’autre extrémité de la bille. En effet, la défaillance électrique n’est détectée que lorsque la fissure s’est propagée de part en part de la structure. La figure 2.4b) montre un exemple de propagation de la fissure typique lorsque l’aluminium utilisé possède un niveau de pureté élevé.

Ce type d’analyse ne permet pas de présumer du lieu d’initiation ni du sens de propagation de la fissure, d’autres analyses sont proposées par la suite. Nous avons donc vu que

2.1. ESSAIS DE CHUTE

les défaillances se manifestaient sur les puces centrales du circuit imprimé. A l'intérieur des composants la contrainte est répartie « par bandes ». La modélisation montrera que l'intensité des contraintes est homogène sur une rangée et décroissante des rangées extérieures vers les rangées intérieures. Enfin, la micro-section montre que les défauts observés sont généralement de deux types : fissuration – dans la passivation, l'aluminium – et délamination à l'interface entre deux matériaux. Des analyses plus ponctuelles sont effectuées avec un FIB (pour Focused Ion Beam : Faisceau d'ions focalisés). Cet appareil permet de découper la matière à une échelle microscopique.

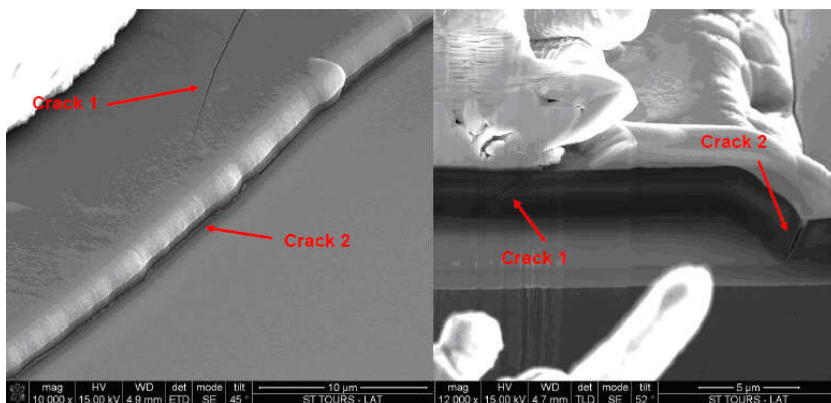


FIG. 2.5 – Exemple d'observation avec un FIB

Sur la figure 2.5, le crack 2 peut être observé avant tout test thermique ou mécanique. Il s'agit d'une fissuration liée aux contraintes générées lors de la fusion de la bille d'étain sur le plot de métallisations. Le crack 1 de la même figure (à droite) est plus probablement généré suite à des contraintes de test. Ce type d'observation qui combine microscope électronique à balayage (MEB ou SEM) et micro-section permet de mettre en avant l'influence de problèmes tels que les contraintes résiduelles sur la tenue mécanique de la structure.

2.1.2 Essai de relaxation des contraintes résiduelles

2.1.2.1 Principe et description de l'expérience

Lors de l'assemblage des boîtiers WL-CSP, les composants subissent deux refusions :

- Une première pour que la bille de SnAgCu adhère sur la couche d'adhésion côté composant
- Une deuxième pour souder le composant au circuit imprimé

Après chaque refusion, la différence de dilatation thermique entre les différents constituants de l'assemblage génère des contraintes résiduelles une fois l'opération terminée. En supposant que la deuxième montée en température annule les effets de la première refusion, on va évaluer l'influence de ce processus sur la tenue mécanique des WL-CSP. Les manipulations consistent à recuire dans un four les composants assemblés sur circuits imprimés à des températures inférieures ou proches de 0.6 fois la température de fusion de l'alliage (qui est de 220 °C). Dans un cadre industriel il n'est pas envisageable de stocker pendant de longues durées les pièces, le choix s'est donc porté sur les durées et températures suivantes :

2.1. ESSAIS DE CHUTE

- Pas de recuit pour constituer un échantillon de référence appelé « standard »
- Mise en étuve avec flux d'azote à 75 °C pendant 1 heure
- Mise en étuve avec flux d'azote à 75 °C pendant 2 heures
- Mise en étuve avec flux d'azote à 125 °C pendant 2 heures

Les Flip-Chips sont des 5x5 pitch 500 à 25 billes avec la technologie que l'on appellera C, du même lot, assemblés par le laboratoire du PE&D. Ensuite, deux tests ont été effectués : des essais de cisaillement de la puce et des tests de chute.

2.1.2.2 Résultats de cisaillement de la puce et des tests de chute

Dans une première approche on considère que les contraintes induites par le cisaillement de la puce sont proches de celles induites par le test de chute – la composante en cisaillement des billes serait prédominante – mais comme la vitesse de sollicitation est très différente, les résultats sont notablement différents. Comme le test de chute utilise les quatre puces centrales des circuits imprimés (n°5, 6, 7 et 8 sur la figure 2.2), les composants pour les cisaillements de la puce sont les huit extérieures (n°1 à 4 et 9 à 12 sur la figure 2.2).

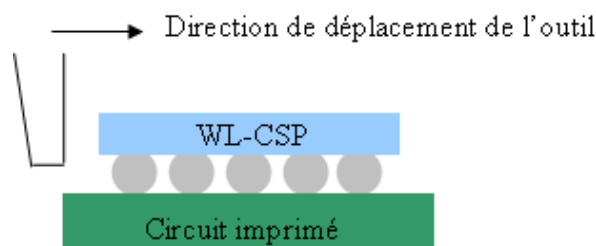


FIG. 2.6 – Schéma de l'essai de cisaillement

L'essai de cisaillement consiste à amener un outil contre le silicium de la puce comme le montre la figure 2.6. Ensuite, on mesure la force qui permet de détacher le composant du circuit imprimé.

Essais de cisaillement de la puce

Paramètres :

- Vitesse de test = 700 $\mu\text{m/s}$
- Force = 100 N
- Hauteur de cisaillement = 150 μm
- Trajet supplémentaire = 500 μm

Les résultats des forces - en N - mesurées sont présentés dans le tableau 2.7. Huit WL-CSP sont testés sur trois circuits imprimés pour chaque condition de mise en étuve.

Observations après cisaillement de la puce : De manière générale, le silicium craque complètement et il n'est plus possible d'observer les plots. Plus rarement le composant se détache, son intégrité est préservée et les billes de soudures restent côté circuit imprimé comme le montrent les figures 2.8, 2.9 et 2.10.

Essais de chute

Les résultats statistiques sont présentés sur la figure 2.11.

Dans la suite on considère que les 4 composants centraux du circuit imprimé reçoivent

2.1. ESSAIS DE CHUTE

Numéro du WL-CSP	Echantillons témoins			Recuit à 75°C 1h	Recuit à 75°C 2h			Recuit à 125°C 2h		
	1	2	3		1	2	3	1	2	3
1	81.15	83.98	82.11	91.23	78.79	73.70	73.69	82.53	74.45	75.85
2	83.34	83.38	86.51	87.14	87.09	77.37	81.92	77.62	77.02	70.40
3	83.43	88.55	90.41	91.37	91.26	87.13	76.80	84.52	80.11	78.21
4	89.32	90.34	84.70	101.18	90.98	81.83	69.12	84.63	83.82	83.08
5	82.12	86.59	83.35	62.42	76.84	81.87	79.38	84.26	81.15	88.14
6	75.2	87.17	86.31	75.71	76.05	78.89	84.43	85.85	73.99	72.32
7	78.9	89.65	81.80	75.79	91.67	74.30	78.20	83.73	80.90	66.73
8	76.32	87.18	83.22	71.35	81.16	82.74	75.50	83.61	78.68	78.53
Moyenne	81.22	87.11	84.80	82.02	84.23	79.73	77.38	83.34	78.77	76.66

FIG. 2.7 – Résultats de cisaillement après mise en étuve

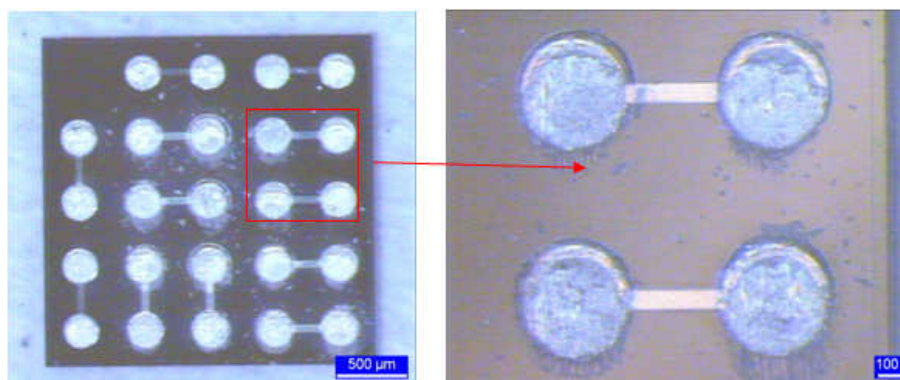


FIG. 2.8 – Observation de l'échantillon témoin après cisaillement de la puce côté composant

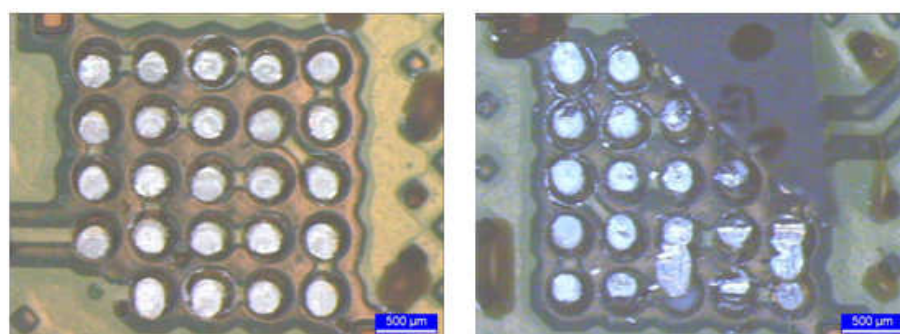


FIG. 2.9 – Observations typiques après cisaillement de la puce côté circuit imprimé

la même sollicitation, pour chacun des 4 types d'échantillon, le composant n°5 d'un des circuits imprimés parmi les 3 lots est analysé et le résultat est présenté par la suite.

2.1. ESSAIS DE CHUTE

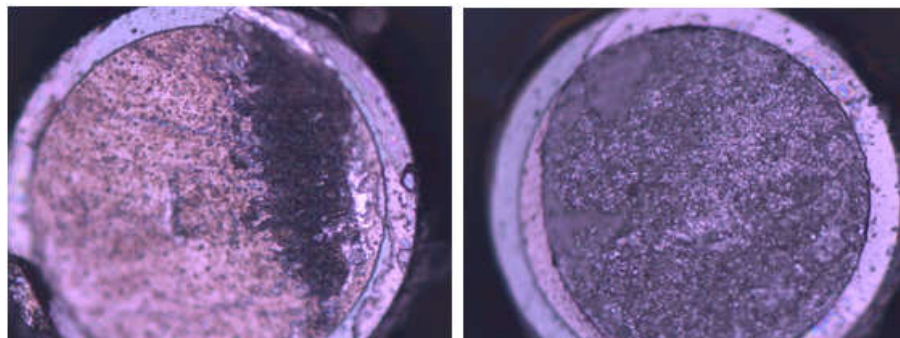


FIG. 2.10 – Observations typiques côté composant

Les rayons X ne montrent rien d'anormal. La comparaison des images obtenues par microscopie acoustique (SAM) pour les 4 essais est effectuée sur la figure 2.12.

La synthèse des observations sur les pièces défectueuses est présentée dans le tableau 2.1, le lot témoin (« standard » dans le tableau) est comparé avec l'essai de mise en étuve à 75 °C durant 2 heures. La figure 2.13 permet de comparer ce tableau avec la structure du produit. En effet, les microsections sont généralement effectuées sur une rangée de billes, quatre apparaissent comme sur la figure 2.13 car une bille de coin est manquante, ces billes sont numérotées de 1 à 4.

Essais	Modes de propagation
Standard	– Bille 1 : fissure partielle dans la passivation, à gauche et à droite – Bille 2 : fissure totale, passivation => Al => interface oxyde/Al => Al => passivation – Bille 3 : fissure partielle, à droite passivation et à gauche interface passivation/Al => passivation – Bille 4 : fissure totale, passivation => Al => Interface Ox/Al => Al => passivation
75 °C 2 h	– Bille 1 : fissure partielle, à droite passivation => interface Al/passivation, à gauche passivation – Bille 2 : fissure totale, passivation => Al/Oxyde => IMC/Al => Al/passivation => Al/IMC => passivation – Bille 3 : fissure totale, passivation => Al/Oxyde => Al/IMC => passivation – Bille 4 : fissure totale, passivation => Oxyde/Al => passivation

TAB. 2.1 – Synthèse des observations sur les pièces défectueuses

L'analyse dite de « Dye and Pry » (littéralement : teinture et levier) permet d'observer les faciès de rupture et rentre dans un cadre plus général pour améliorer la compréhension



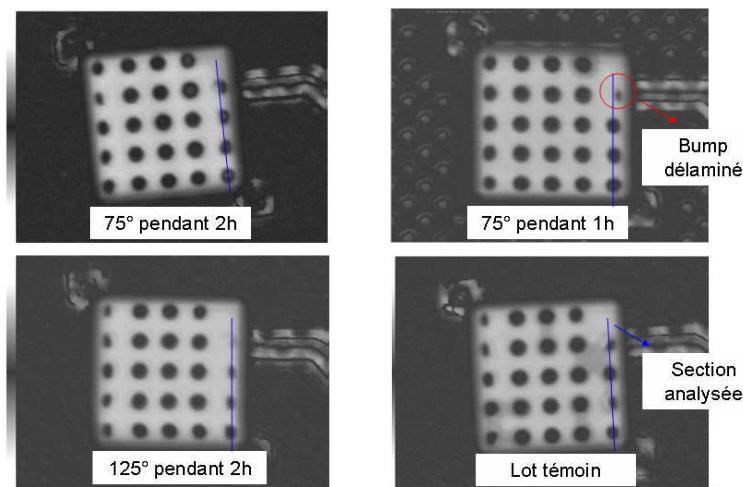


FIG. 2.12 – Comparaison des imageries SAM pour les 4 échantillons

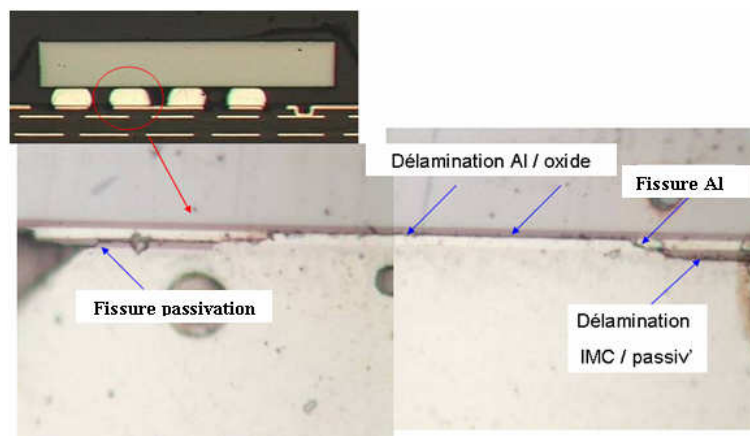


FIG. 2.13 – Structure du produit - Cas de l'échantillon témoin

du test de chute. Cette observation se déroule en deux étapes :

- Injection d'une teinture tant que le composant est encore soudé sur le circuit imprimé
- Retrait du composant par un système de levier, ce qui permet de faire la distinction entre les fissures liées au retrait du composant et celles liées à l'essai mécanique de fatigue

On peut voir le résultat sur la figure 2.14.

2.1.2.3 Observation au microscope électronique à balayage

Suite aux observations des faciès de rupture par « Dye and Pry » sur l'échantillon témoin, l'imagerie électronique permet de déterminer la nature des couches supérieures, de manière à faire le lien avec les micro-sections.

La figure 2.15 montre une vue générale du composant. Les deux plots encadrés sont ceux

2.1. ESSAIS DE CHUTE

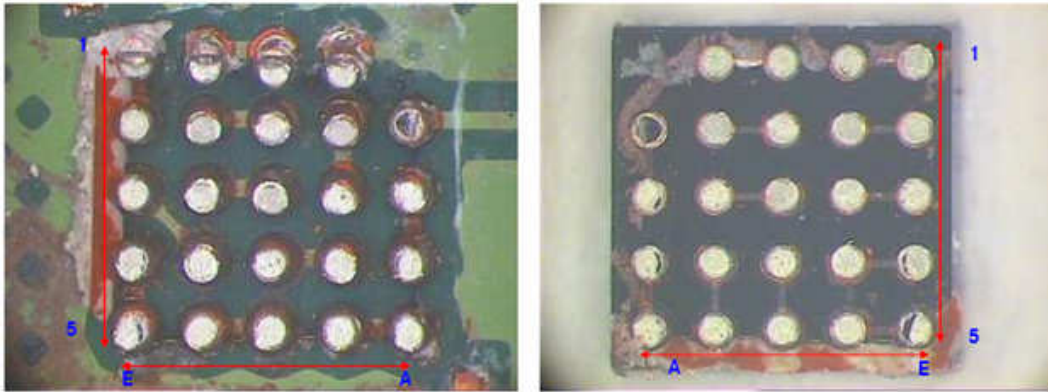


FIG. 2.14 – Observation après « Dye and Pry » – a) Côté circuit imprimé – b) Côté composant – Entre les deux : plan de symétrie

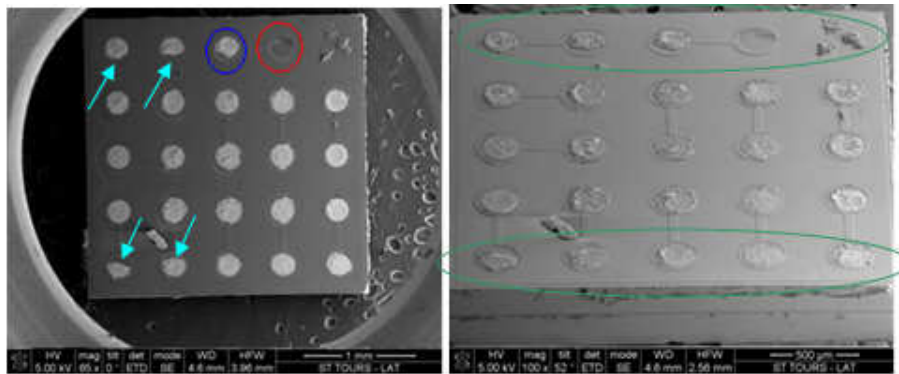


FIG. 2.15 – a) Vue de face du WL-CSP – b) Composant orienté à 52° (tilt)

observés dans la suite de ce document. On suppose que celui entouré en rouge est la cause de la défaillance électrique de la chaîne électrique compte-tenu de son aspect particulier. Le plot entouré en bleu constitue un cas typique dans la mesure où il appartient aux bandes les plus affectées par le test de chute. Ces bandes sont entourées en vert dans la figure 2.15. Les flèches indiquent des amorces de fissures, elles sont orientées vers l'intérieur. Cette localisation correspond au maximum de la contrainte normale, en simulation, lorsque le circuit imprimé fléchit vers le bas.

Remarque : L'échelle des images non-penchées (tiltées) est applicable dans tout le plan. L'échelle des images inclinées est applicable en horizontal mais pas en vertical.

Observation du plot entouré en rouge

La vue générale de la figure 2.16 présente une grande surface lisse et, à son bord supérieur, une surface plus perturbée. La tache noire, sur la droite correspond à des résidus carbonés de la technique d'analyse précédente. Les flèches bleues pointent une zone d'intérêt car on observe des stries.

Sur la figure 2.17 on observe des stries circulaires qui montrent un phénomène de fatigue. Sur les plus grandes longueurs on compte environ 30 stries alors que le composant a subi

2.1. ESSAIS DE CHUTE

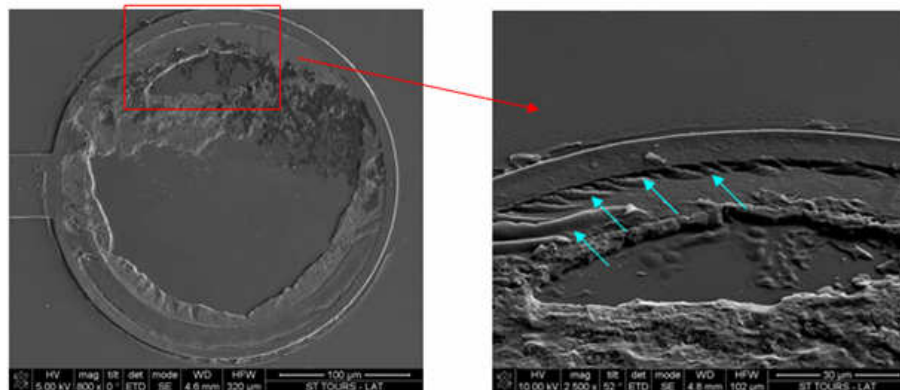


FIG. 2.16 – a) Vue générale de la structure sous la bille après essai de chute – b) Zoom sur une zone d'intérêt

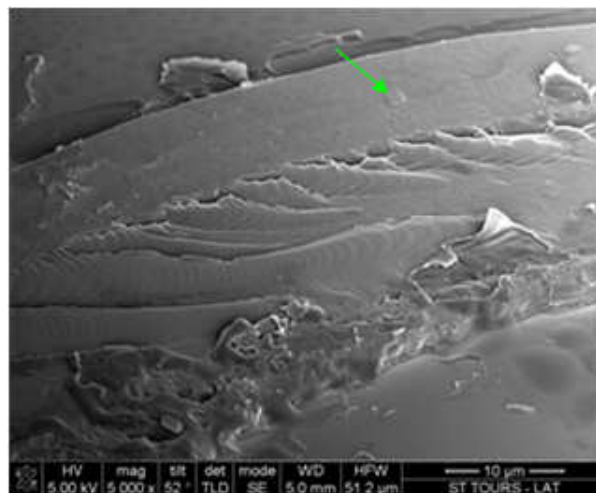


FIG. 2.17 – Agrandissement sur la zone présentant des stries

275 chutes (composant 7 du circuit imprimé T2). Sur la zone pointée par la flèche verte, on aperçoit les grains d'aluminium. La différence entre le nombre de chutes et le nombre de stries peut être interprété de deux manières :

- Soit le temps d'initiation dans les matériaux est grand et le temps de propagation requiert peu de cycles
- Soit, une fois ces stries formées, la rupture des autres matériaux ou des interfaces (délamination) requiert un plus grand nombre de cycles

Des mesures de la résistance électrique des composants sont effectuées sur l'essai de flexion, celles-ci pourront apporter d'autres éléments de réponse.

Observation du plot entouré en bleu

L'agrandissement sur la figure 2.18 montre plusieurs points à analyser. Les flèches bleues pointent une fissure qui fait le tour du plot. L'origine de cette fissure ne peut pas être connue compte-tenu de l'arrachement qu'a subi la bille correspondante. Le rectangle rouge cerne

2.1. ESSAIS DE CHUTE

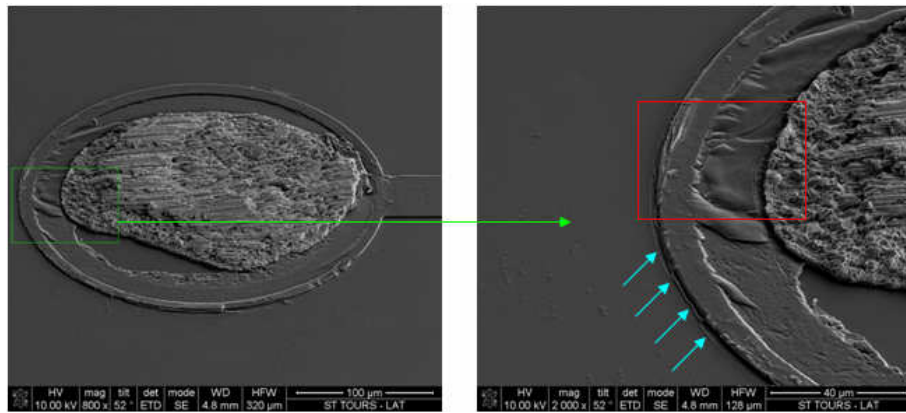


FIG. 2.18 – a) Vue générale de la structure sous la bille après essai de chute – b) Zoom sur une zone d'intérêt

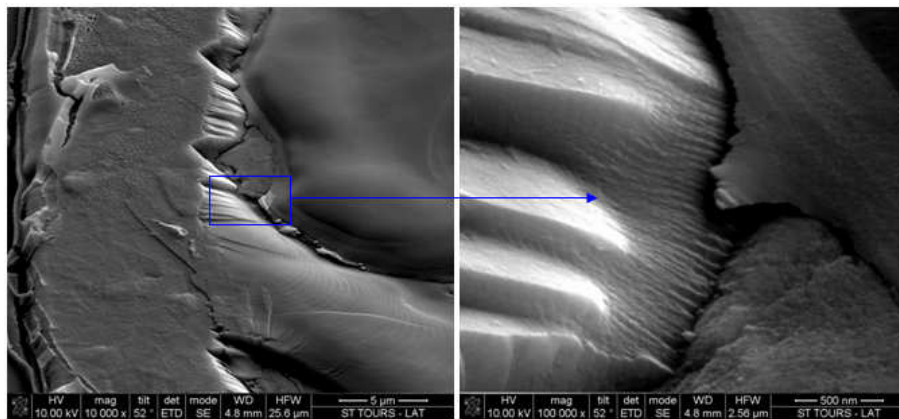


FIG. 2.19 – Agrandissements de la zone d'intérêt

une zone sur laquelle des stries sont observées.

Observation du plot entouré en bleu

Sur la figure 2.19 comme sur la précédente, on observe des stries en arc de cercle sur le bord intérieur du plot. Par certains endroits ces arcs sont larges et espacés, par d'autres endroits ils sont plus resserrés et étroits.

Analyses chimiques

Les 4 spectres de la figure 2.20, sur le plot entouré en rouge, donnent les résultats suivants :

- En jaune, spectre 4 => Présence d'aluminium et d'oxygène
- En rouge, spectre 3 => Présence de silicium et d'oxygène
- En vert, spectre 2 => Présence de silicium et d'oxygène
- En bleu, spectre 1 => Présence de silicium et d'oxygène

Les points 1 et 2 détectent uniquement la passivation (oxyde). Le faisceau d'électron du point 2 n'a pas suffisamment d'énergie pour traverser la couche et atteindre la piste

2.1. ESSAIS DE CHUTE

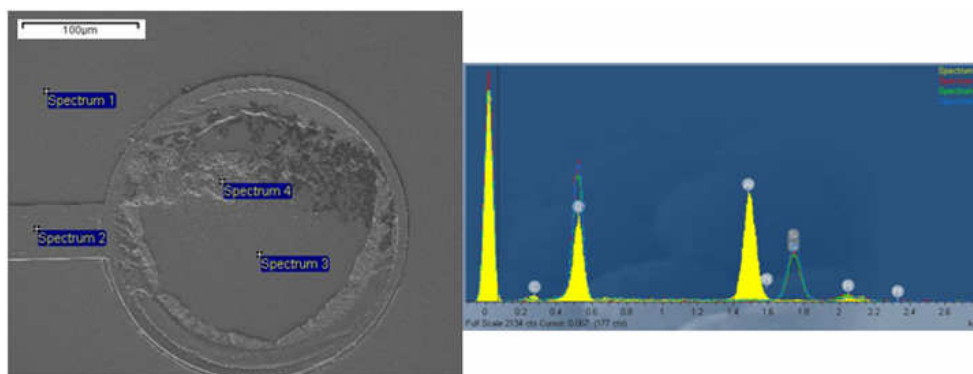


FIG. 2.20 – a) Localisation des 4 points – b) Résultats des analyses chimiques

d'aluminium. Le point 3 détecte un oxyde qui se trouve directement sur le silicium. Le point 4 détecte une forte présence d'aluminium, probablement oxydé.

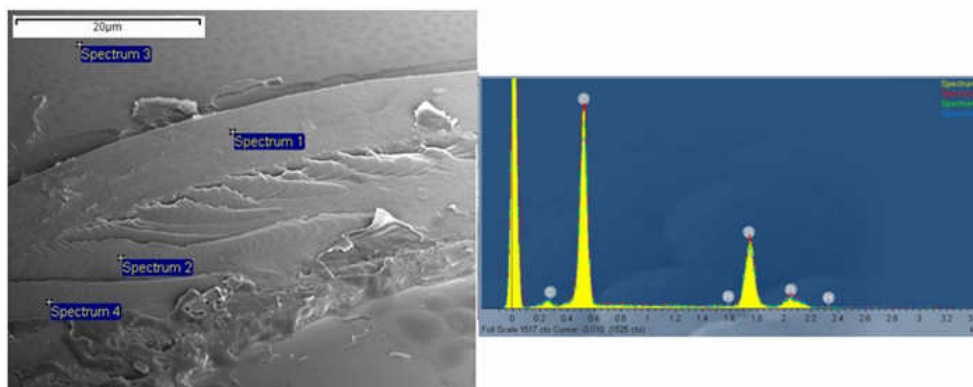


FIG. 2.21 – a) Localisation des 4 points – b) Résultats des analyses chimiques

Sur toutes les zones pointées par la figure 2.21, sur le plot entouré en rouge, on détecte la présence de silicium et d'oxygène.

Les zones 1 et 2 indiquées sur la figure 2.22 (sur le plot entouré en bleu de la figure 2.22) détectent la présence d'aluminium. Le troisième point, absent du spectre, détecte de l'étain (Sn).

Les observations MEB permettent de mettre en évidence des stries de fatigue sur la passivation. Les analyses chimiques sur les faciès de rupture permettent de suivre précisément le chemin de la fissure, tandis que les microsections n'apportent qu'une vision partielle. Les fissures dans l'aluminium prennent une forme en arc de cercle dépendante de la position du composant sur le circuit imprimé.

2.1.2.4 Cisaillement du composant après essai de chute

Après le test de chute on cisaille les 4 composants centraux, les valeurs des forces de cisaillement mesurées sont indiquées dans le tableau 2.2.

2.1. ESSAIS DE CHUTE

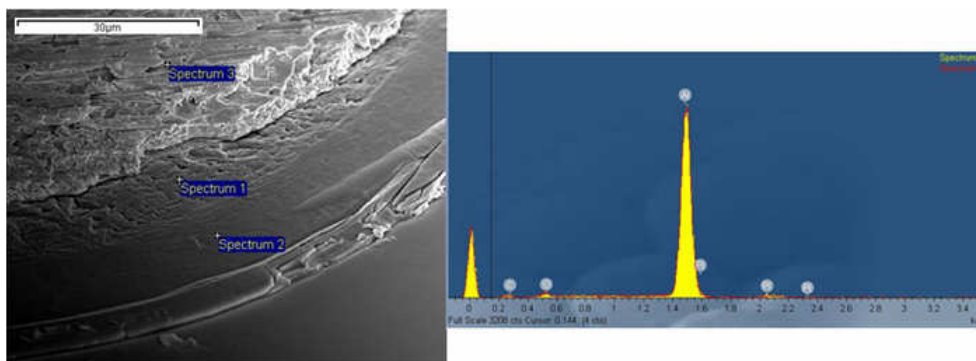


FIG. 2.22 – a) Localisation des 3 points – b) Résultats des analyses chimiques

Numéro CSP	Echantillons témoins	Recuit à 75 °C 1 h	Recuit à 75 °C 2 h	Recuit à 125 °C 2 h
1	63	63	64	53
2	58	73	62	61
3	56	61	59	56
4	46	59	59	63
5	70	70	54	56
6	69	60	52	53
7	67	69	59	57
8	70	68	62	53
Moyenne	57	65	59	57

TAB. 2.2 – Force de cisaillement – en N - après test de chute

On remarque que les valeurs sont inférieures d'environ 25 % à celles avant le test de chute, ce qui montre une fragilisation des composants. A présent on observe les faciès de rupture après cisaillement des puces sur la figure 2.23.

Les faciès de la figure 2.23 sont différents de ceux de la figure 2.14 par la présence de surfaces lisses au niveau des rangées extérieures de billes. Ces observations rejoignent bien celles faites par « Dye and Pry » ainsi que les observations MEB précédentes.

2.1.2.5 Conclusion

Les mesures de cisaillement ne montrent pas de réelle modification apportée par la mise en étuve. Les résultats statistiques de chute aboutissent à la même conclusion (*i.e.* le recuit n'a pas eu d'influence significative) compte-tenu de l'incertitude par rapport à la taille de l'échantillon statistique. Sur les diagrammes de Weibull, un seul lot passe la limite des 100 chutes à 5 % de défaillance : celui recuit à 75 °C pendant 1 heure. L'observation par micro-section montre principalement des amorces, le seul crack total ressemble à ceux des autres lots. Concernant les techniques d'observations, les faciès de rupture pour un composant détaché par cisaillement est différent du faciès d'un composant ayant subi le test de chute

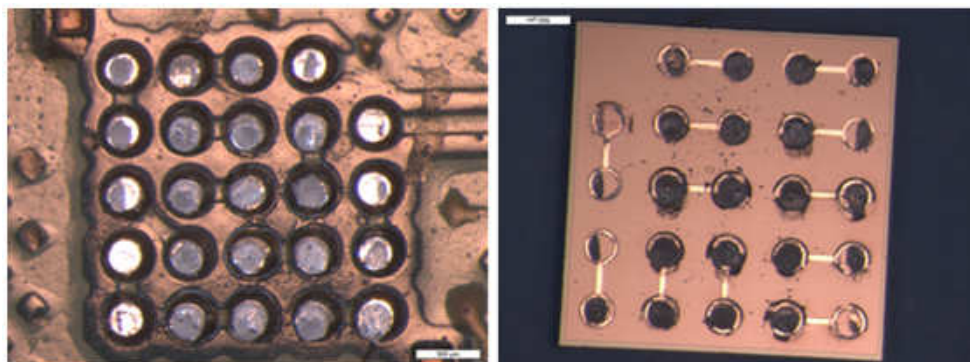


FIG. 2.23 – Faciès de rupture côté board (à gauche) et côté composant (à droite) d'un échantillon témoin

puis observé par « Dye and Pry » :

- Ductile en cisaillement et fragile avec stries de fatigue lors du test de chute
- Côté composant, en cisaillement, on voit surtout la couche d'intermétalliques

Parmi les billes de l'essai standard, une bille ne présente pas de fissure dans la passivation mais une amorce d'un côté dans l'aluminium, la passivation ne fissure pas systématiquement après refusion ou report. D'autre part, les images MEB montrent des stries que l'on peut interpréter comme de la fatigue sur la passivation. Cette dernière observation est originale par rapport à ce qui a été publié précédemment. Des mesures de la résistance électriques des composants lors de l'essai de flexion seront exploitées pour essayer de mieux comprendre l'origine de ces observations. La différence de formes entre les stries d'aspect « droit » et celles d'aspect circulaire n'est pas expliquée. Les conclusions pourraient impacter le modèle de fatigue – par exemple en se basant sur la mécanique de la rupture – comme cela est expliqué en conclusion de ce chapitre. Cependant on choisit de poursuivre l'étude générale par les essais de flexion. Enfin, le cisaillement après le test de chute montre les mêmes résultats que le « Dye and Pry » même si les faciès sont plus « propres » – notamment côté circuit imprimé – avec cette dernière technique.

2.2 Essai de flexion

A présent on s'intéresse à un autre essai de type « board-level » : le test de flexion. Celui-ci est novateur [38] car l'influence des différents paramètres est mal connue, tant du point de vue des paramètres d'essai qu'au niveau des résultats sur des composants de types WL-CSP. En effet, cet essai est actuellement peu employé, c'est pour cette raison qu'un banc de test est spécifiquement développé.

2.2.1 Conception du banc de test

La conception de ce banc de test s'appuie sur l'étude des deux normes des sections précédentes. Cette partie décrit les choix technologiques qui ont conduit à la réalisation, ceux-ci étant fréquemment décrits dans la littérature scientifique car ils peuvent avoir

une influence sur le test proprement dit. Par exemple, un détecteur d'événements et un enregistreur ne détecteront pas toujours exactement un défaut au même nombre de cycles. C'est probablement pour cette raison que certains auteurs citent les marques d'appareils qu'ils utilisent. L'objectif global dans la conception est de réaliser un banc de test aussi flexible que possible pour permettre plusieurs axes de recherche.

2.2.1.1 Machines d'essai

Il existe trois grandes technologies pour les machines de tests :

- Servo-hydraulique
- Vis-à-billes
- Moteur linéaire

Cette dernière solution étant retenue, seule celle-ci sera détaillée. Cette technologie présente l'avantage d'être sans entretien, sans frottement et donc sans usure. La gamme de forces accessible s'étend de 1 N à quelques kilo-Newton, la gamme de fréquence s'étend du statique jusqu'à environ 200 Hz selon les courbes de charges de l'appareil. Cette technologie est *a priori* idéale car sans frottement, avec un entretien minimum et assure une bonne flexibilité dans les tests. La limite basse en déplacement dépend généralement du capteur associé, celle-ci peut atteindre 1 μm .

La machine utilisée est équipée d'un boîtier électronique qui comprend plusieurs voies. Celles-ci permettent de synchroniser les signaux issus des capteurs de force et de déplacement et de les transférer vers un affichage (ordinateur). Ce boîtier permet à l'utilisateur d'ajouter ses propres capteurs comme décrit dans une partie suivante. Ces capteurs peuvent être utilisés pour la mesure de grandeurs – par exemple pour une déformation – mais aussi pour réaliser un pilotage par rétroaction.

2.2.1.2 Partie mécanique

Les supports et appuis répondent à un cahier des charges précis :

- Les appuis doivent être légers pour garder une large gamme de fréquences au niveau de la machine
- Les appuis et support ne doivent pas s'user ou s'oxyder
- Ils doivent être réglables et modulaires

La partie mécanique doit correspondre aux besoins des normes décrites précédemment. La solution présentée sur la figure 2.24 a été choisie pour répondre à l'ensemble de ces besoins.

Les items numérotés de la figure 2.24 correspondent aux points suivants :

1. Dispositif de fixation avec la machine de test
2. Fixations amovibles pour permettre des tests de flexions 8-points (flexion alternée) ou 4-points
3. « Lumière » pour un réglage fin de la position des appuis
4. Rainure permettant le guidage et le positionnement des appuis

Le choix des matériaux est :

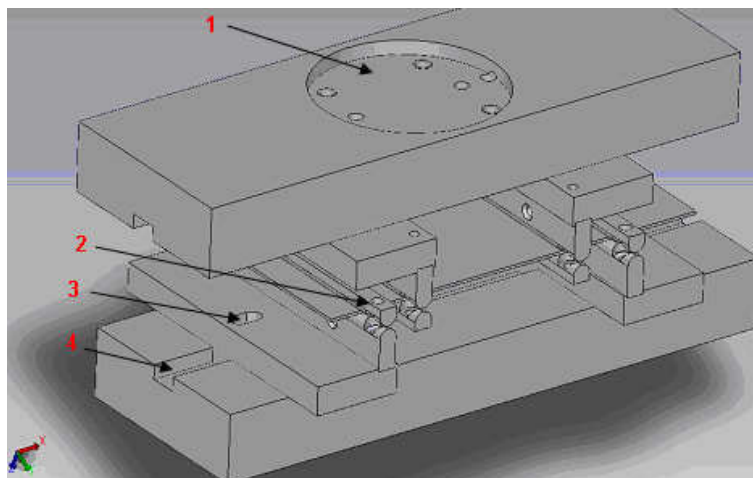


FIG. 2.24 – Design des appuis fabriqués pour être montés sur la machine de test de flexion

- Acier doux pour les parties en contact avec le circuit imprimé, ce qui assure une bonne résistance mécanique et une bonne tenue à la fatigue,
- Aluminium AU4G (selon la norme NF A 02-104, également appelé duraluminium) pour les autres parties, ce qui permet d'alléger la structure.

A cela doit également s'ajouter la pose d'un dispositif pour limiter le mouvement « dans le plan » du circuit imprimé, si un tel mouvement est détecté, c'est pourquoi des perçages supplémentaires ont été prévus.

2.2.1.3 Partie électrique

Cette partie présente la réalisation de l'interface entre le boîtier électronique de la machine de fatigue et les différents capteurs. Cette partie permet de comprendre les résultats présentés par la suite ainsi que le principe général pour détecter les défauts. Le boîtier de la machine Böse est constitué de 8 voies analogiques ainsi que d'autres numériques. Trois de ces voies sont utilisées par les capteurs de la machine selon le même principe que celui décrit ci-dessous. Ces trois capteurs sont :

- Capteur de déplacement LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
- Capteur de force
- Capteur pour les efforts de torsion

La torsion n'étant pas utilisée, cette troisième voie peut-être utilisée à d'autres fins. Pour chacune des voies le boîtier Böse comprend les éléments suivants :

- Bornes + et - pour alimenter un circuit
- Entrée et sortie pour la lecture d'un signal analogique (échantillonné à 5 kHz)
- 2 connexions pour une résistance qui règle le gain d'amplification du signal des entrées et sorties du point précédent
- 3 connexions pour un potentiomètre d'offset
- Un sélecteur pour trois niveau d'alimentation : +2.5/-2.5 V, +5/-5 V, +10/-10 V
- Une masse commune à l'ensemble des voies

2.2. ESSAI DE FLEXION

La nature des capteurs utilisés (jauges de déformation et chaînes électriques) conduit au calcul d'un circuit en pont de Wheatstone.

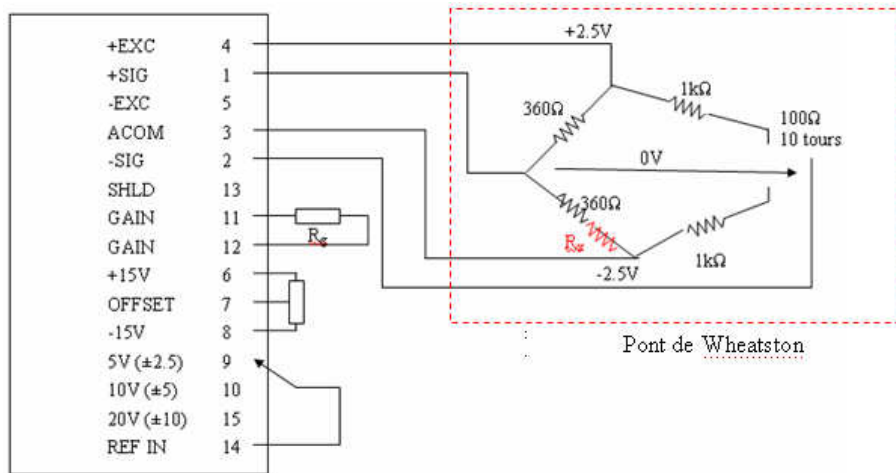


FIG. 2.25 – Schéma de câblage du pont de Wheatstone au boîtier Böse

Sur la figure 2.25 la partie gauche correspond au schéma électrique du boîtier qui permet de créer une interface entre la machine et l'ordinateur. La partie de droite montre les éléments électriques connectés à ce boîtier. La résistance rouge R_x correspond dans cet exemple à une chaîne électrique, un potentiomètre de $100\ \Omega$ a été inséré pour permettre un réglage fin des $0\ \text{V}$ à l'état initial. Lorsque la résistance électrique d'un composant change, alors le pont est déséquilibré et on mesure une valeur de tension différente de $0\ \text{V}$. Ce type de montage permet une lecture en tension de faibles variations de résistance électrique, un schéma très proche de celui-ci est utilisé pour la mesure des déformations. En effet, une jauge de déformation est constituée d'un fil électrique dont la résistance varie linéairement en fonction de sa longueur. La jauge est donc collée sur la surface à étudier puis, la mesure de sa résistance électrique permet de calculer la déformation effective recherchée. Les valeurs utilisées, tant pour l'amplification que pour le pont, dérivent de calculs pour exploiter la pleine échelle du signal. Par ailleurs, la résistance de $360\ \Omega$ en série avec le composant permet de limiter la puissance et donc la chauffe de celui-ci. Ce montage est réalisé autant de fois qu'il y a de voies à mesurer. La fonction ainsi créée correspond à l'enregistreur (DA) décrit dans la partie présentant le test de chute, par opposition à la solution alternative du détecteur d'événements (ED).

2.2.1.4 Méthodes d'analyses

Chaque essai de fiabilité est analysé pour comprendre le mécanisme de défaillance. Ces analyses ont donc pour but de caractériser la population observée lors de l'analyse statistique. D'un point de vue scientifique, le fait d'observer plusieurs populations peut conduire à une distribution différente, par exemple une Weibull à 5 paramètres. En revanche il n'y a pas de spécification particulière venant de la norme JEDEC concernant la méthode. Les analyses présentées dans cette partie reprennent donc en partie celles déjà utilisées pour

2.2. ESSAI DE FLEXION

étudier le test de chute. La procédure consiste généralement à détecter les « anomalies » par une image aux rayons X. Celle-ci permet par exemple de détecter :

- Les « bridges », c'est-à-dire les courts-circuits causés par un contact entre deux billes
- Les « voids », c'est-à-dire les bulles restées emprisonnées dans les soudures
- Certains problèmes relatifs au circuit imprimé (délamination, etc.)

Le SAM (Microscopie Acoustique à Balayage) est employé pour détecter les rangées de billes délaminées. Cette technique permet de connaître les rangées de billes à étudier. La technique repose sur le même principe qu'une échographie, une onde acoustique est émise puis réfléchiée par le matériau. L'onde est détectée plus tôt si elle rencontre un obstacle tel qu'une délamination et plus tard si elle traverse toute la structure du WL-CSP. La précision de la technique ne permet pas une observation très détaillée, elle est souvent utilisée pour déterminer la rangée qui sera observée par micro-section.

La micro-section consiste à enrober le composant dans de la résine puis à polir la face à observer jusqu'à être à la « mi-épaisseur » des billes. Le test de chute génère généralement des fissures le long de rangées de billes, le plan de microsection est donc choisi de manière à découvrir un maximum de billes fissurées. Certains auteurs [7] conscients des limites de ce type d'observation utilisent des micro-sections en L – les conclusions de celles-ci étant déjà présentées dans l'état de l'art – qui permettent d'observer une fissure selon deux plans comme le montre la figure 2.26. Ces deux plans coïncident avec une bille et permettent d'obtenir une meilleure représentation du faciès de rupture. Ainsi, ces microsections en L ont le même objectif que les observations par microscopie électronique à balayage présentées précédemment.

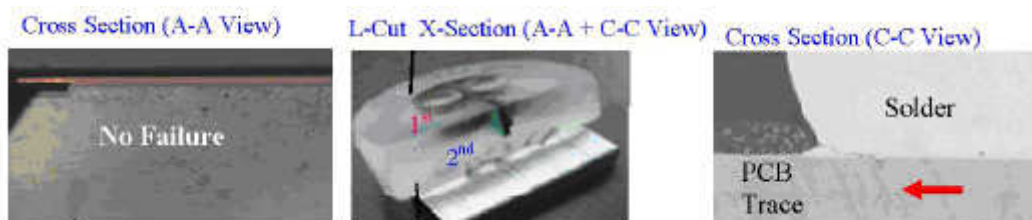


FIG. 2.26 – Méthode pour la microsection en L [7]

2.2.2 Essais de flexion : présentation des résultats

Les résultats sont obtenus en testant un minimum de 25 composants pour obtenir une taille d'échantillon acceptable. Dans un premier temps on présente le résultat sous forme d'une distribution de Weibull. Cette distribution est une représentation qui permet de faire ressortir les défauts dits « de jeunesse » et les défauts dits « d'usure » d'une population. Une distribution est ainsi caractérisée par la durée de vie de la population à 63.2 % de taux de défaillance (paramètre η) ainsi que la pente (paramètre β) qui permet d'interpréter les défauts intrinsèques ou extrinsèques par exemple. Les composants sont des WL-CSP en chaînes électriques simplifiées dont la structure des interconnexions correspond à l'empilement suivant :

- Un plot d'aluminium de 1.5 μm d'épaisseur

2.2. ESSAI DE FLEXION

- Une passivation de $3\text{ }\mu\text{m}$ en USG (Undoped Silicate Glass)
- Une couche d'adhésion d'environ $1.5\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur
- Une bille de brasure de $300\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre avant refusion

Les billes sont disposées sur le composant selon une matrice de 5 lignes et 5 colonnes avec une bille de coins manquante (soit 24 interconnexions au total). Les billes sont séparées par un pas de $500\text{ }\mu\text{m}$. L'alliage qui les constitue est en $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$.

Le circuit imprimé respecte la norme JEDEC et la finition sur les plots de cuivre est en OSP. Ce type de circuit imprimé contient deux faces : une novia et une via-in-pad (i.e. avec des trous traversant), on choisit de monter les composants sur la face sans via. Seuls les 9 composants (3 lignes et 3 colonnes) au centre du circuit imprimé sont assemblés de manière à laisser de la place aux appuis et aux supports. L'assemblage a été réalisé avec la technique de la pâte à braser et les circuits imprimés ont été placés dans une étuve à 125°C sous N_2 pendant 24 heures pour éviter des problèmes liés à l'humidité.

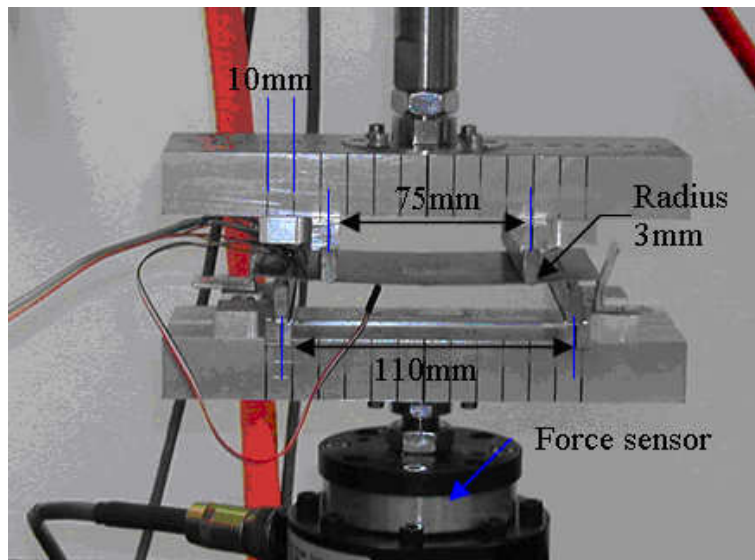


FIG. 2.27 – Système de chargement, position de la jauge de déformation et de la nappe de fils électriques pour le suivi des résistances des chaînes électriques

Les paramètres de test utilisés sont ceux de la norme JEDEC, illustrés sur la figure 2.27 : écartement des appuis de 75 mm , écartement des supports de 110 mm , rayons des appuis et supports de 3 mm , déplacement vertical des appuis de 2 mm et fréquence de 1 Hz (signal sinusoïdal). Les composants font face au sol comme pour le test de chute. D'un point de vue pratique, la position des points de connexion du circuit imprimé avec la nappe de fils du circuit imprimé coïncide avec un support métallique, ce qui est susceptible de parasiter les signaux électriques. En conséquence, on recouvre cette zone du circuit imprimé avec une fine bande isolante. D'autre part, la moindre imperfection dans la planéité ou dans la coaxialité des actionneurs entraîne un déplacement permanent du circuit imprimé après un « grand » nombre de cycles (ici, « grand » désigne de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de cycles).

Dans un premier temps on s'intéresse à plusieurs observations :

2.2. ESSAI DE FLEXION

- La précision avec laquelle le déplacement est appliqué
- L'évolution de la force résultante constatée
- Les signaux électriques, à la fois des composants et de la jauge de déformation

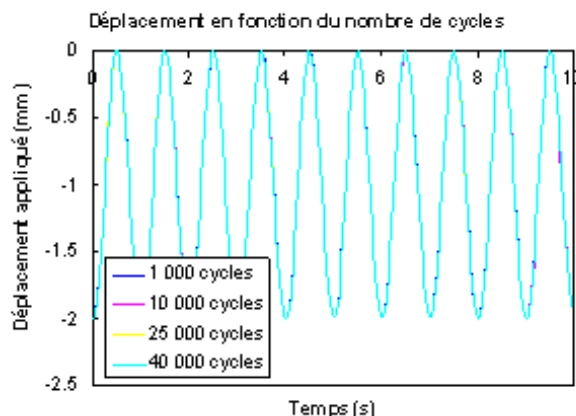


FIG. 2.28 – Répétabilité du déplacement des appuis de chargement en fonction du nombre de cycles (les quatre couleurs sont superposées)

Sur la figure 2.28 on observe l'enregistrement du capteur de déplacement. Les valeurs négatives correspondent à un déplacement vers le bas. Comme expliqué précédemment le signal analogique est discrétisé (échantillonné) pour diminuer la taille des fichiers, ce qui explique le « facettage » des courbes. Ces figures permettent d'observer qu'il n'y a aucune dérive dans l'application du déplacement.

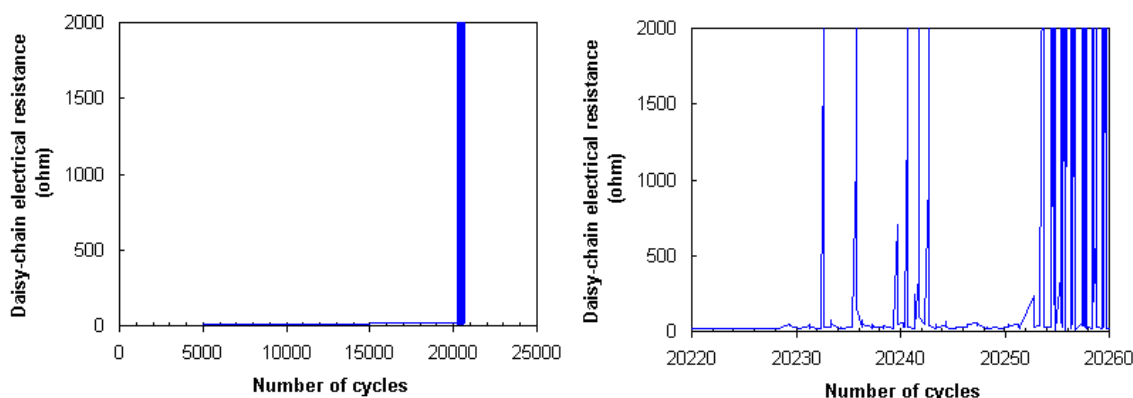


FIG. 2.29 – Observation de la variation de la résistance d'une chaîne électrique simplifiée

D'autre part, lorsqu'il n'y a pas de pré-charge appliquée sur les appuis, alors la force maximale atteint environ 50 N. Cette valeur atteint 60 N avec une pré-charge d'environ 1 N et 70 N avec une pré-charge d'environ 4 N. Des mesures concernant ce paramètre de pré-charge sont discutées par la suite. A l'état initial, la résistance d'une chaîne électrique simplifiée vaut environ 2Ω . Lorsque la fissure se propage dans l'interconnexion, la résistance électrique augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur infinie. Sur la figure 2.29

2.2. ESSAI DE FLEXION

à gauche, on observe les oscillations de la résistance électrique au cours de l'essai. Dans cet exemple le premier pic a lieu entre 24500 et 25000 cycles, il est effectivement confirmé par d'autres pics. Les oscillations qui suivent sont liées à l'ouverture et la fermeture de la fissure au cours de l'essai. Sur la même figure, à droite, on observe plus précisément le moment d'apparition des pics électriques. Cette phase n'est pas détectable précisément car, pour limiter la taille des fichiers on limite le seuil d'enregistrement sur l'axe des ordonnées. Le premier pic de résistance est relevé pour chacun des composants du circuit imprimé. Ensuite plusieurs circuits imprimés sont testés afin d'obtenir une taille d'échantillon suffisante pour tracer les distributions statistiques.

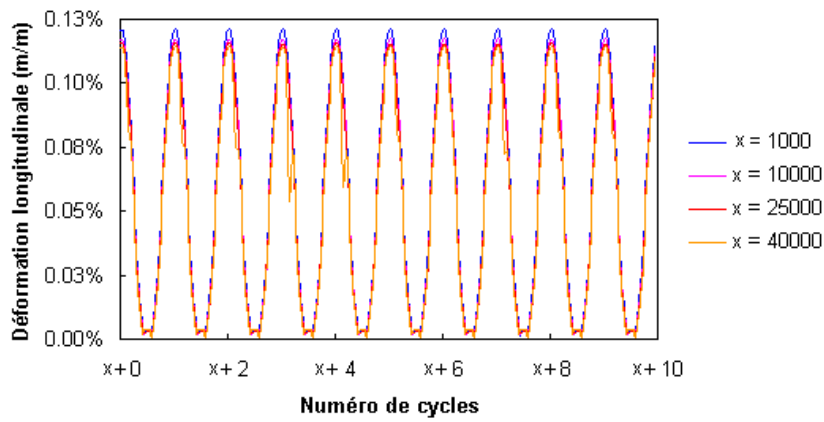


FIG. 2.30 – Evolution de la déformation en fonction du numéro de cycle

La figure 2.30 montre le signal d'une jauge de déformation placée au centre du circuit imprimé, dans le sens longitudinal. L'enregistrement dure 10 secondes à partir du nombre de cycles spécifiés dans la légende. Ce graphique montre une évolution de la déformation au cours de l'essai. On note également une dégradation du signal de la jauge vers 40000 cycles, cette dégradation indique probablement une fatigue de la jauge elle-même ou de la colle qui sert à la fixer.

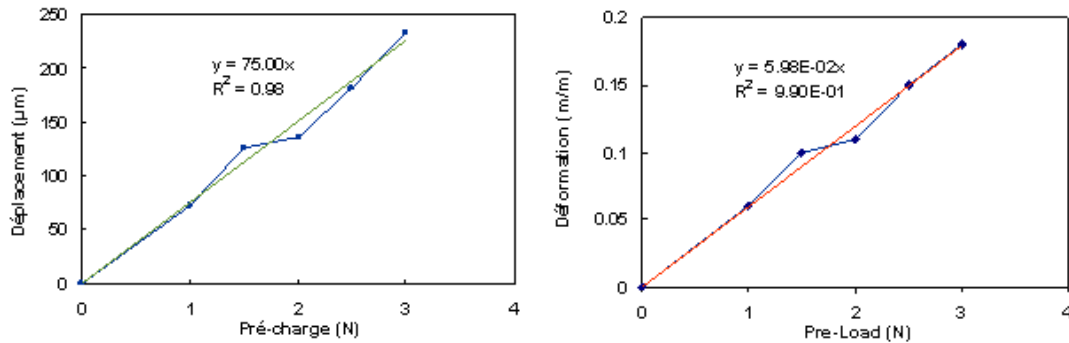


FIG. 2.31 – a) Mesure du déplacement (précision de $\pm 1\mu\text{m}$) b) Mesure de la déformation en fonction de la pré-charge

2.2. ESSAI DE FLEXION

La norme ne précise pas de pré-charge pour l'essai de flexion, toutefois celle-ci semble nécessaire pour assurer le contact entre les appuis de chargement et le circuit imprimé. La pré-charge ne doit pas influencer les résultats de fiabilité c'est pourquoi on effectue des mesures de déplacement et de déformation en fonction de celle-ci. La mesure de déplacement est effectuée avec appareil de type « Pepitas », il s'agit d'un palpeur que l'on place au centre du circuit imprimé. La course de l'appareil est faible mais sa précision est de l'ordre du micromètre. La déformation est mesurée simultanément par la jauge disposée au centre du circuit imprimé, côté composant, avec le système décrit précédemment. Les graphiques de la figure 2.31 montrent que les mesures de déformations sont très précises et évoluent linéairement. De la même façon, le déplacement maximal du circuit imprimé évolue linéairement dans la gamme étudiée. D'un point de vue pratique la pré-charge est difficile à appliquer car le capteur de force est « bruyé » par l'extérieur ainsi que le moteur électrique de la machine de fatigue. Au final, plusieurs comparaisons statistiques sont faites de manière à choisir une valeur de pré-charge satisfaisante.

2.2.2.1 Distribution de Weibull

Cette partie présente l'analyse statistique menée sur les populations testées en flexion. La distribution statistique est celle de Weibull à 2 paramètres comme cela est spécifié par la norme JEDEC. Les premiers essais ont pour but de déterminer les paramètres de l'essai et de comprendre ce qui est susceptible d'influencer le résultat statistique :

- Etude de la répétabilité de l'essai
- Influence du système de détection (détecteur d'événements et enregistreur)
- Influence de la pré-charge
- Influence de la fréquence

Les représentations graphiques des distributions se trouvent en annexe avec les intervalles de confiance correspondants.

Population	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre η normalisé	LCB
1ère population	3.8	31993	0.85	10737
2ème population	4.1	30113	0.80	11518
3ème population	3.4	37761	1.00	10122
Tot. des 3 pop.	3.9	32882	0.87	-

TAB. 2.3 – Paramètres de Weibull de 3 distributions statistiques testées dans les mêmes conditions

Le tableau 2.3 présente les résultats des essais de répétabilité avec une pré-charge de 1 N et une fréquence de 1 Hz, le système de détection étant un enregistreur. Dans la 4^{me} colonne à gauche les valeurs sont rapportées à la valeur la plus élevée. La 5^{me} colonne à gauche donne le nombre de cycle correspondant à 5 % de défaillance sur l'intervalle de confiance (LCB = Lower Confidence Boundary).

Les essais de fatigue génèrent naturellement une forte dispersion à laquelle s'ajoute la dispersion du banc de test et de la fabrication industrielle de l'assemblage. On constate qu'il

2.2. ESSAI DE FLEXION

y a un écart de 15 % entre la durée de vie la plus faible et la durée de vie la plus élevée. L'outil statistique permet d'agréger les résultats des 3 populations comme s'il s'agissait d'une seule de 75 pièces. La durée de vie issue des données agrégées (total dans le tableau) donne une durée de vie de 32882 cycles et une pente – un facteur de forme – de 3.9. Ensuite on établit qu'un facteur expérimental influence significativement la distribution si son paramètre η est compris dans l'intervalle ainsi décrit ou non.

Pré-charge	Système de détection	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre η normalisé	LCB
4 N	Détecteur d'événements	5.6	18858	0.86	13117
4 N	Enregistreur	4.2	22021	1.00	-
1 N	Détecteur d'événements	4.9	21898	0.67	10005
1 N	Enregistreur	3.9	32882	1.00	10737

TAB. 2.4 – Influence du système de détection sur l'essai de flexion

Un autre système de détection a été utilisé sur ce test, les résultats sont indiqués dans le tableau 2.4. La valeur est normalisée pour chacune des deux pré-charges. A partir de ces informations deux conclusions apparaissent :

- Le système de détection n'est pas influent avec une pré-charge de 4 N
 - Le système de détection semble influencer le résultat avec une pré-charge de 1 N
- Par la suite il faut donc comparer les résultats avec le même système de détection.

Pré-charge	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre η normalisé	LCB
4 N	5.6	19812	0.85	13117
1 N	4.9	21898	0.94	10005
0 N	5.2	23304	1.00	10664

TAB. 2.5 – Influence de la pré-charge sur la tenue en flexion

Les essais du tableau 2.5 sont effectués à 1 Hz, la pré-charge varie de 0 N à 4 N et un détecteur d'événements (ED) est utilisé. On constate que la durée de vie varie au-delà des variations observées lors des essais de répétabilité avec une pré-charge de 4 N.

Fréquence	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre η normalisé	LCB
1 Hz	5.1	20682	1	10005
3 Hz	8.9	15812	0.77	10111

TAB. 2.6 – Influence de la fréquence sur la tenue en flexion

2.2. ESSAI DE FLEXION

Les essais du tableau 2.6 sont effectués avec une pré-charge de 1 N et un enregistreur (DA). On constate que la pente de l'essai à 3 Hz est significativement supérieure à ce qui a pu être observé jusqu'à présent, cela laisse supposer qu'un mode de défaillance particulier a pu se produire. Les modes de défaillance sont caractérisés par le chemin de propagation de la (ou des) fissure(s) observé par micro-section. Deux méthodes pour assembler les composants sur le circuit imprimé (*cf.* également les étapes de finition dans le premier chapitre) sont évaluées avec l'essai de flexion :

- La méthode par composé chimique, celui-ci étant appelé flux
- La méthode par pâte à braser

Les essais précédents ont été effectués avec un assemblage de type pâte à braser. Les résultats du tableau 2.7 sont effectués avec une pré-charge de 4 N, une fréquence de sollicitation de 1 Hz et un détecteur d'événements.

Méthode d'assemblage	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre η normalise	LCB
Flux	5.8	23269	1	12295
Pâte à braser	5.6	19812	0.85	13117

TAB. 2.7 – Influence de l'assemblage sur la tenue en flexion

Les représentations graphiques de ces essais se trouvent également en annexes. Le résultat du tableau 2.7 montre que dans les deux cas les mécanismes de défaillance sont identiques car les pentes β des distributions sont très proches. L'écart relatif entre les durées de vie est de 15 %, ce qui est à la limite de la variabilité de l'essai, déterminée précédemment. Il convient donc de conclure que le mode d'assemblage n'a pas d'influence significative sur la fiabilité des composants pour le cas étudié.

2.2.2.2 Observations par micro-section et microscopie acoustique

On analyse par micro-section les composants pour localiser la défaillance.



FIG. 2.32 – Micro-section au niveau d'une interconnexion

Sur la figure 2.32 la fissure est indiquée, on voit qu'elle est initiée dans la passivation (à gauche ou à droite). Ensuite celle-ci se propage à l'interface entre les intermétalliques et l'aluminium (Al pur), ou alors à l'interface entre l'oxyde SiO_2 et l'aluminium. Cette fissure ressort ensuite du côté opposé par la passivation ou à l'interface entre la passivation et les intermétalliques (à droite sur l'image). Cette description est très proche de celle qui a été faite lors du test de chute (tant que la métallisation est en Al pur), d'autant que

2.2. ESSAI DE FLEXION

l'on retrouve les mêmes phénomènes de bandes de délamination lors des observations par microscopie acoustique.

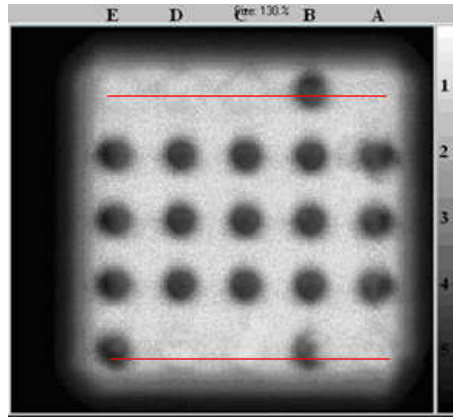


FIG. 2.33 – Observation par microscopie acoustique d'une chaîne électrique après essai de flexion

La figure 2.33 illustre l'effet de bande, les billes délaminées préférentiellement sont celles des deux rangées extérieures. Ces rangées sont perpendiculaires à la longueur du circuit imprimé. Une correspondance entre les essais de flexion et de chute est parfois recherchée, la correspondance des modes de dégradation entre les deux tests mécaniques discutés ici devrait faciliter une corrélation mais les conditions aux limites et les différences de fréquences de sollicitation nécessiteraient une étude plus approfondie (par exemple sur la fatigue des matériaux) pour aboutir à un tel résultat.

2.2.2.3 Conclusions sur les essais de flexion

Les essais de flexion ont permis de déterminer les points suivants :

- La durée de vie moyenne sur la taille d'échantillon considérée peut varier d'environ 25 %
- Le système de détection des défauts peut donner des résultats significativement différents selon que la pré-charge appliquée soit de 1 N ou de 4 N
- Les mesures de déplacement et de déformation au centre du circuit imprimé montrent qu'une pré-charge de l'ordre de 1 N génère une déformation « faible » par rapport à la déformation mesurée pendant l'essai
- Une pré-charge supérieure à 0 N est nécessaire pour garantir le contact des appuis sur le circuit imprimé
- Dans les conditions de l'étude, le mode d'assemblage ne semble pas influencer significativement la durée de vie des composants
- L'augmentation de la fréquence de sollicitation à 3 Hz diminue la durée de vie et, d'après le paramètre β , semble influencer le mécanisme de dégradation des interconnexions d'un point de vue statistique. Toutefois les observations des micro-sections ne montrent pas de différence par rapport à ce qui est décrit dans la section précédente
- Le chemin de propagation des fissures observées sur les interconnexions est semblable entre le test de chute et celui de flexion

2.3 Statistiques et fiabilité

Cette partie a pour objectif de détailler les aspects statistiques utilisés pour les deux essais mécaniques. La justification de l'utilisation d'une distribution de Weibull est présentée. Ensuite l'influence de chacun des 3 paramètres de ce modèle statistique sont étudiés. Enfin les modèles de fatigue sont commentés par rapport aux conclusions statistiques.

2.3.1 Introduction à la fiabilité

2.3.1.1 Définitions

La fiabilité est définie comme la probabilité qu'un appareil accomplisse une fonction donnée dans des conditions spécifiques et durant un laps de temps précis. Par exemple un fabricant de téléphone peut souhaiter que la fonctionnalité des composants qu'il achète lui soit garantie 10 ans dans les conditions de l'application (utilisation normale comme l'appui sur les touches du clavier) mais aussi dans des conditions qui dépassent l'usage habituel (chocs). Les conditions de fonctionnement sont les contraintes de fonctionnement dans lesquelles un appareil devra assurer sa fonction ainsi que les contraintes environnementales qu'il subit de l'extérieur. Celles-ci peuvent être : un courant électrique, une tension, une température, de l'humidité, des chocs mécaniques, etc. A partir de cela un défaut (ou une défaillance) est défini par le fait qu'un appareil cesse d'assurer sa fonction. Le défaut peut apparaître complet, graduel ou intermittent. Un mode de défaillance décrit les symptômes de cette défaillance, ceux-ci peuvent être physiques (délamination, fissure, excroissance, etc.) ou électriques (court-circuit, circuit ouvert, etc.). Un mécanisme de défaillance décrit le processus physique qui a permis la défaillance, par exemple celui-ci peut être de l'électromigration, de la fatigue thermique ou de la corrosion.

2.3.1.2 Courbe en baignoire

Il s'agit d'une distribution générale *idéale* qui décrit au mieux la plupart des comportements de fiabilité, de la plupart des composants et des systèmes.

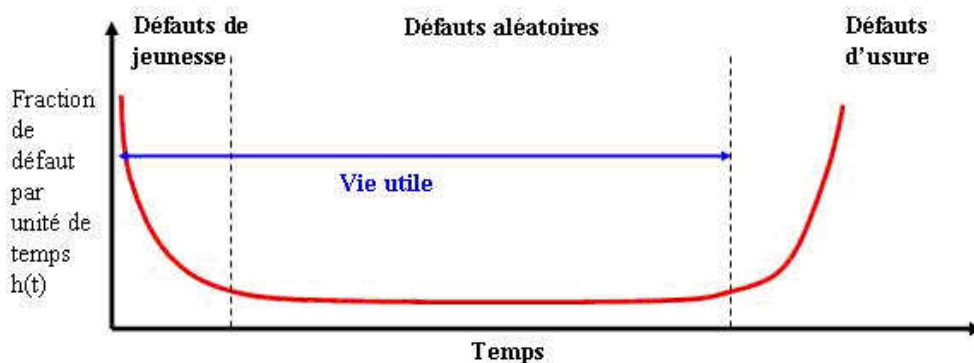


FIG. 2.34 – Courbe en baignoire avec les 3 comportements en fiabilité

Sur la figure 2.34 trois comportements apparaissent : les défauts de jeunesse, les défauts

aléatoires et les défauts d'usure. Les défauts de jeunesse résultent d'un défaut latent, généralement un défaut de fabrication, qui n'était pas apparent et qui est développé lorsque l'objet est placé sous contraintes. Le taux de défaillance est élevé à ce niveau et décroît dans le temps. Ce type de défaut peut être corrigé en améliorant les procédés de fabrication, on peut aussi mettre sous tension pendant un court laps de temps pour révéler les premiers défauts. Les défauts aléatoires apparaissent lorsque l'appareil – ou le composant – est sur-contraint. Cette sur-contrainte est due à des facteurs environnementaux accidentels, par exemple une erreur humaine. Dans ce régime le taux de défaillance est indépendant du temps. La 3ème partie de la courbe en baignoire est la période d'usure, à ce stade n'importe quel composant peut cesser de fonctionner même s'il était sans défaut, c'est son vieillissement naturel. Le taux de défaillance augmente progressivement au cours du temps. Les fonctions associées à ces trois parties de la courbe en baignoire sont détaillées en Annexe 6.

2.3.1.3 Méthodologie

Les essais de fiabilité sont mis en œuvre à deux périodes de la vie d'un produit :

- Durant la conception, ou s'il y a une modification dans le produit, on parle de qualification
- Durant la production en série, pour le suivi de la performance du processus de fabrication

La qualification permet d'apporter la preuve des performances du nouveau produit, à travers un plan de qualification. Le monitoring appliqué à la grande série est effectué par un contrôle en temps réel (RTC). Il s'agit d'une liste de tests faits en finition sur certains produits dans le but de détecter des dérives dans le procédé de fabrication. Les essais de fiabilité mécanique sont traités par des distributions de Weibull car celles-ci permettent de caractériser les trois phases de la courbe en baignoire. De plus, cela correspond au traitement requis lorsqu'il y a des compétitions entre plusieurs mécanismes de dégradation.

2.3.1.4 Description d'une chaîne électrique « Daisy-Chain »

La chaîne électrique est un composant simplifié largement utilisé dans les tests de fiabilité. Ce WL-CSP est plus simple qu'un produit classique dans le but de permettre de tester toutes les interconnexions, certaines interconnexions n'étant pas directement testables sur un vrai produit. Il doit aussi être représentatif du produit final en termes d'empilements des couches et de dimensions géométriques (notamment au niveau des billes). Pour cette raison les billes sont reliées par de simples pistes au lieu de composants électriques tels que résistances ou capacités. Pour ce type de composant on parle de réseau électrique simplifié car le circuit électrique doit parcourir l'ensemble des interconnexions.

Sur la figure 2.35 toutes les interconnexions sont reliées 2 à 2. Sur le schéma de gauche, les billes appartiennent au composant (les traits représentant les pistes) et sur le schéma du milieu les connexions de cuivre appartiennent au circuit imprimé. Dans la vue de profil (schéma de droite) le trait rouge symbolise le passage du courant électrique. On remarque que toutes les billes participent au circuit, aussi la défaillance d'une seule interconnexion conduit à la mise en défaut de tout le composant.

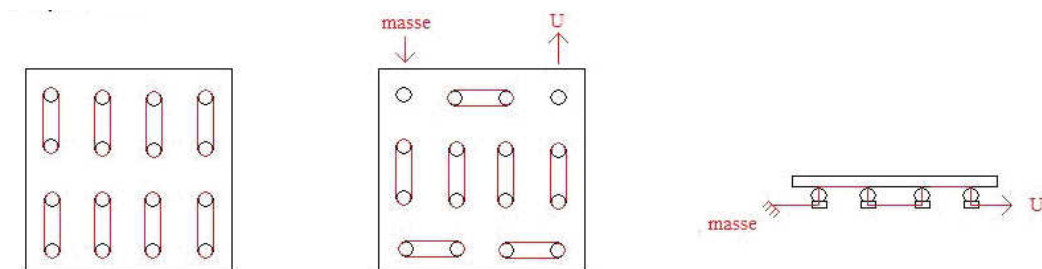


FIG. 2.35 – Exemple de chaîne électrique – a) Billes reliées par des pistes d'aluminium sur la puce – Au milieu, plot de cuivre sur le circuit imprimé – b) Vue en coupe du composant assemblé sur circuit imprimé, et représentation schématique du passage du courant électrique

2.3.2 Lien entre loi statistique et modèle de dégradation

Les lois statistiques sont empiriques et doivent s'appuyer sur une compréhension des phénomènes qu'elles décrivent. Pour cette raison *Weibull* [39] utilise cette fonction mathématique pour décrire 7 cas : limite élastique d'aciers Bofors, distribution de tailles de cendres volantes, etc. Ces exemples montrent que la distribution de Weibull est basée sur l'observation de propriétés physiques simples. Pour raisonner au niveau système sur un WL-CSP, on pourrait considérer qu'il faut connaître les caractéristiques η et β de chaque couche (passivation, métallisations) dans les conditions de contraintes du test de chute.

Justification pour l'utilisation du 3ème paramètre γ : Le troisième paramètre n'apparaît que dans certaines conditions, dépendantes des 2 autres paramètres et de la taille de l'échantillon. Cependant, le cumul de plusieurs essais du test de chute permet de faire apparaître une tendance sur ce point.

La conséquence de la courbure sur la figure 2.36 est qu'un nombre significatif de points sont en-dehors de l'intervalle de confiance. Le mode de défaillance typique observé est une fissure dans l'aluminium. Une autre justification pour utiliser la représentation à trois paramètres serait que cela permet d'augmenter significativement le coefficient de corrélation. Ceci dit, plus la formulation est complexe, plus le nombre de paramètres augmente et plus la corrélation devient élevée, c'est pourquoi une justification physique de la modélisation utilisée est toujours nécessaire.

Une justification de cet « effet seuil » (lié au troisième paramètre) pourrait être celle de la fatigue des matériaux sous chargement cyclique. En effet celle-ci s'effectue en 3 étapes : initiation, propagation et rupture brutale. En général les faciès de rupture sont typiques mais difficiles à obtenir dans ce cas précis puisque cette opération implique le retrait de la puce sans dégrader la surface à observer. On remarque également que le changement d'alliage pour le plot de métallisation sur la puce – remplacement de l'aluminium par l'alliage AlCu – fait disparaître la courbure.

Sur la figure 2.37 il n'y a pas de courbure apparente malgré la taille importante de l'échantillon statistique. Ceci suggère que le mécanisme de défaillance est différent or, on observe effectivement des fissures plus fréquentes au niveau des intermétalliques et des billes et moins fréquentes dans le plot de métallisation. En conséquence, soit le phénomène

2.3. STATISTIQUES ET FIABILITÉ

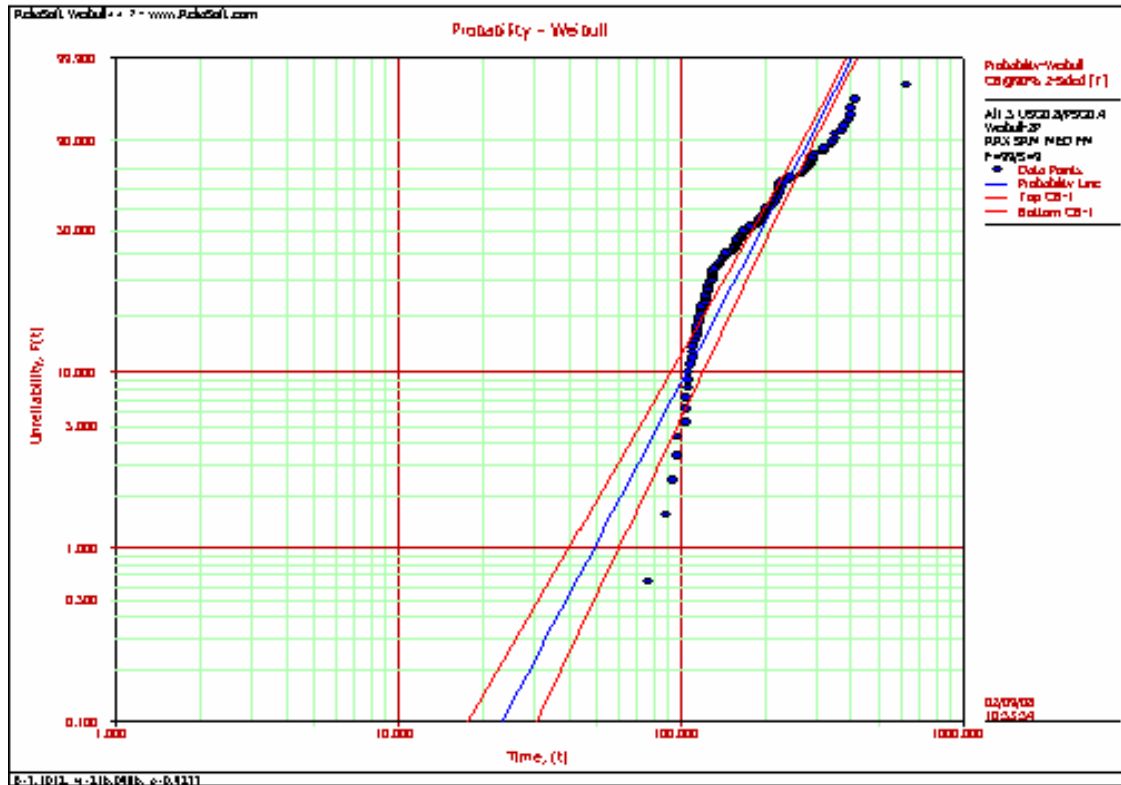


FIG. 2.36 – Exemple sur un IPAD 7x7 avec un pas de $400\ \mu\text{m}$ avec $1.5\ \mu\text{m}$ d'Al, $0.8/0.4\ \mu\text{m}$ de passivation USG/PSG et bille en $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ – l'agrégation de 99 points permet de faire apparaître un effet de courbure

physique est modifié (par exemple : changement de la localisation de la fissure), soit le temps d'amorçage est devenu négligeable devant le temps de propagation dans le phénomène de fatigue. *Nota* : Le logiciel Weibull++ comporte un module permettant de comparer les distributions deux à deux et dans le cas des trois distributions présentées sur la figure 2.37 celui-ci indique qu'il s'agit de la même population.

Discussion sur l'utilisation de la durée de vie (paramètre η) :

D'un point de vue industriel, les fabricants préfèrent utiliser un critère sur les faibles taux de défaillance (ces valeurs sont également présentées dans le cas du test de flexion). En effet, ceci permet d'avoir un grand nombre de produits qui passent une période donnée et donc de diminuer le nombre de retour clients relativement à une durée. Ce point de vue a déjà été étudié dans des cas de corrélation par le 1er défaut avec une taille d'échantillon fixe. L'étude sur la fiabilité de composants soumis au test de variation de puissance [40] a permis de comparer la prédiction avec la simulation numérique et : a) le 1er défaut b) la durée de vie à 63,2 %. Toutefois le nombre de résultats fournis dans le cas particulier du test de chute permet une autre méthode de comparaison : les mêmes essais sont répétés pour deux alliages différents, le $\text{SnAg}_{1.0}\text{Cu}_{0.5}$ et le $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{-Ni}_{500\text{ppm}}$. En traçant la durée de vie pour ces essais deux à deux on s'attend à une tendance claire. Si la tenue à 5 % de défaillance est fiable, alors la même tendance doit apparaître. En revanche, les

2.4. ETUDE SUR LA FATIGUE MÉCANIQUE

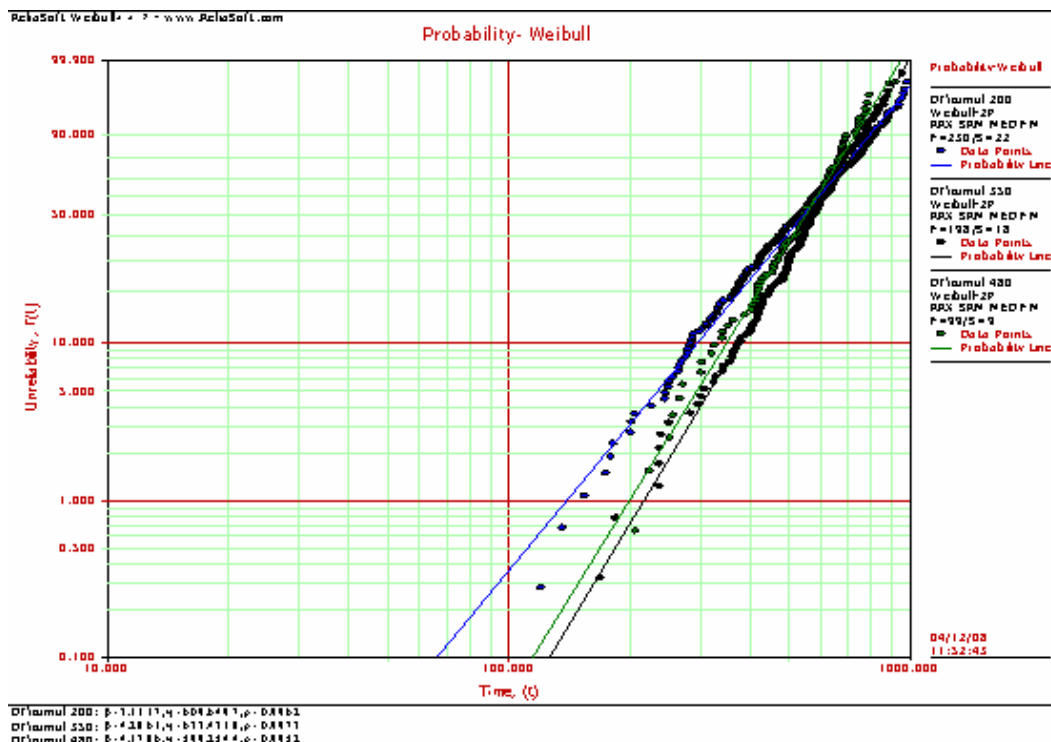


FIG. 2.37 – Cumul d’environ 200 pièces sur ces 3 statistiques – 200, 350 et 480 correspondent aux températures de déposition de l’AlCu

éléments dont on dispose (courbes de traction des alliages) ne permettent pas a priori de prévoir la forme que pourra prendre cette tendance : linéaire, exponentielle, etc.

La figure 2.38 permet de montrer une corrélation élevée – 80 % – sur la durée de vie η . En revanche celle-ci est de 50 % et 36 % pour la valeur à 5 % et le 1er défaut respectivement. On ne peut donc pas utiliser ces critères pour une corrélation ou une éventuelle étude de paramètres. Le fait que la tendance puisse être approchée par une droite sur ce domaine nous permet d’observer le coefficient directeur de celle-ci : la valeur de 1 montrerait que les deux alliages apportent les mêmes performances en test de chute.

2.4 Etude sur la fatigue mécanique

Les fissures observées lors de cycles répétés des tests de chute et de flexion correspondent à des phénomènes de fatigue. L’aspect mécanique de la fatigue a été développé historiquement pour résoudre des problèmes dans les applications ferroviaires (ruptures d’essieux) ou de l’aéronautique [23]. Le premier objectif de cette partie est de présenter les différentes approches utilisées en fatigue dans le cadre de la recherche. Le deuxième objectif est d’évaluer dans quelle mesure une ou plusieurs de ces approches peuvent être transposées aux WL-CSP et aux tests de chute et de flexion. Les conclusions doivent permettre d’établir un lien entre les données calculées par un logiciel de FEM (Méthodes des Eléments Finis) et les résultats statistiques obtenus dans la réalité.

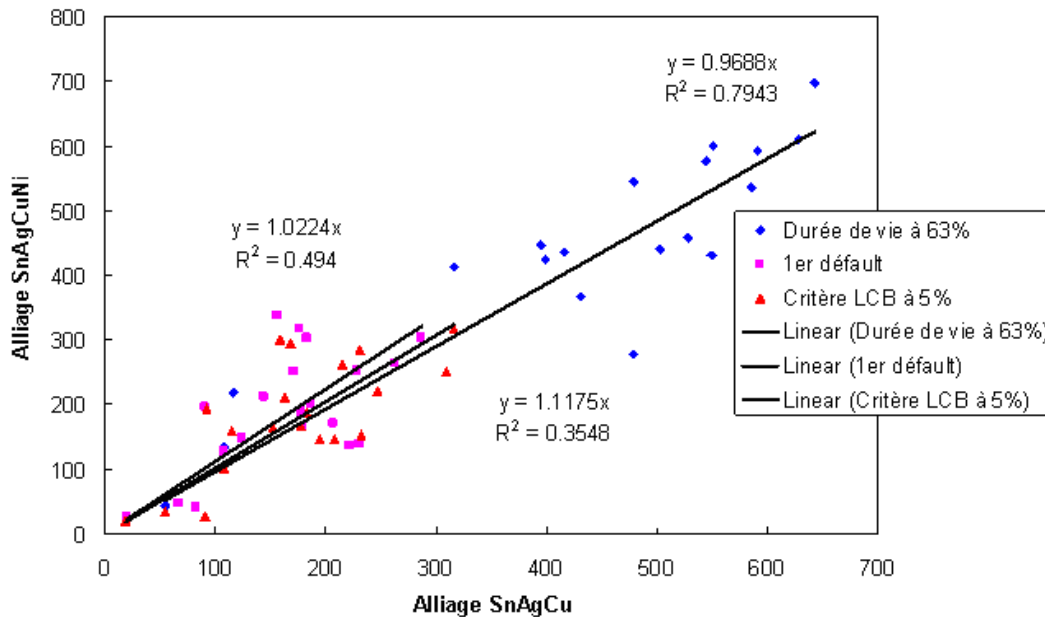


FIG. 2.38 – Comparaison de 15 essais du test de chute pour 2 alliages en fonction de 3 critères

2.4.1 Introduction

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau. Les étapes principales de la fatigue sont :

- L'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau)
- La propagation de fissures
- Et la rupture finale

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (contrainte ou déformation imposée), sa valeur moyenne, le fini de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée. Les faciès de ruptures sont caractérisés dans certaines conditions par l'apparition de stries : la géométrie présente une alternance régulière dans le relief qui permet de retrouver le lieu d'initiation ainsi que la direction de propagation. De manière plus générale, un matériau sous sollicitation cyclique subit des changements microstructuraux dont l'issue est la formation d'une amorce de rupture. Un matériau polycristallin possède plusieurs sites d'amorçage :

- A la surface, à l'intérieur d'un grain (intergranulaire) ou entre deux grains (transgranulaire)
- A partir d'un défaut comme une porosité, une inclusion, un microvide, etc.

On retient que les fissures se développent de manière générale à partir de défauts, l'initiation et la propagation qui en résultent sont dépendantes de la cristallographie (taille

des grains, joints de grains).

2.4.2 Comportement cyclique, fatigue oligocyclique

2.4.2.1 Définitions

Généralement on considère que le comportement d'un matériau sous sollicitations cycliques est semblable à celui observé lors d'un essai de traction simple (uni-axial). Lorsque la limite élastique de ce matériau est dépassée, alors le matériau commence à se déformer de manière irréversible, il plastifie. Un exemple de chargement sous sollicitations cycliques est schématisé dans la figure 2.39.

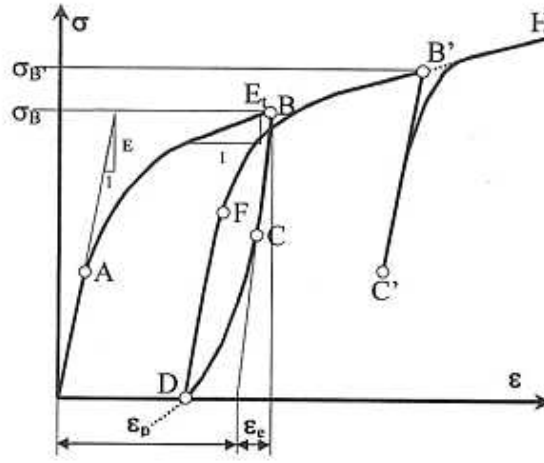


FIG. 2.39 – Exemple de courbe contrainte (σ)-déformation (ε) sous sollicitation monotone [23]

On observe que lors de la remise en charge, la limite élastique (point F sur la figure) est supérieure à la limite élastique initiale (point A). Ce phénomène appelé « Effet Bauschinger » permet – par des essais de traction/compression – de déterminer l'écrouissage isotrope ou cinématique d'un matériau. Par ailleurs, la courbe de 2ème mise en charge ne repasse pas nécessairement par le point d'inversion de la charge (E_t). L'évolution de la courbe définie par les points OABB'H peut être modélisée de façon analytique, par exemple suivant le modèle de Ramberg-Osgood :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

σ_0 est la contrainte à la limite élastique du matériau, α est un coefficient propre au matériau, n est le coefficient d'écrouissage.

On note que ce modèle ne permet pas de prendre en compte des phénomènes physiques tels que la vitesse de sollicitation.

Lorsqu'un matériau est sollicité de manière cyclique, celui-ci dissipe l'énergie accumulée sous forme d'une boucle appelée « boucle d'hystérésis » comme l'illustre la figure 2.40. Cette

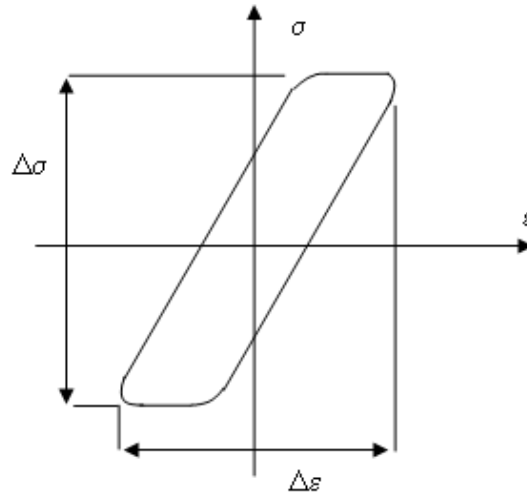


FIG. 2.40 – Schéma d'une boucle d'hystérésis contrainte-déformation

courbe représente, sur un cycle, l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. Les paramètres les plus couramment utilisés sont :

- L'étendue de variation de la contrainte : $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- L'amplitude de la contrainte : $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$
- Le rapport de déformation : $R_\epsilon = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}}$

Cette courbe d'hystérésis évolue lors d'un essai, cette évolution est caractérisée notamment selon que la sollicitation soit pilotée en contrainte ou en déformation. Par exemple, on parle de « durcissement » (ou consolidation) lorsque la déformation est imposée et que l'amplitude des contraintes augmente. Si, au contraire, l'amplitude des contraintes diminue alors on parle d'adoucissement (ou de déconsolidation). Il est généralement difficile de prédire l'évolution de la boucle d'hystérésis, ceci dit il existe des règles et des relations empiriques appuyées sur un certains nombre d'essais. Le comportement en fatigue est généralement caractérisé par le nombre de cycles avant rupture. Si le nombre de cycles est « faible » (ou petit) alors on parle de fatigue oligocyclique. Ce type de fatigue est généralement associé à la sollicitation du matériau dans son domaine plastique. Ce domaine s'étend (environ) jusqu'à quelques 10⁴ cycles avant rupture. Coffin et Manson ont exploité des essais de fatigue dans ce domaine pour montrer expérimentalement qu'il existe une relation entre l'amplitude de déformation plastique ($\Delta\epsilon_p$) et le nombre de cycles à la rupture (N_f) :

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f \times (N_f)^c \quad (2.2)$$

ϵ'_f est le coefficient de ductilité, c est l'exposant de fatigue ductile, il est généralement entre -0,5 et -0,8 selon le matériau et le type de sollicitation.

La durée de vie en fatigue plastique comporte trois étapes :

- Une étape de consolidation
- Une étape d'amorçage de fissure

- La propagation de la fissure jusqu'à rupture

L'accommodation constitue entre 10 % et 50 % de la durée de vie du matériau. Dans cette période de vie, le matériau évolue d'un point de vue micro-structural pour s'adapter aux déformations qui lui sont imposées. Ce phénomène dépend donc de la nature du matériau, par exemple pour une structure cristallographique de type cubique à faces centrées (CFC) on observe que les dislocations s'organisent selon des motifs particuliers appelés des « cellules ». Notons également que l'effet Bauschinger présenté précédemment peut influencer significativement la durée de vie. En effet, lorsqu'un matériau est sollicité dans une direction puis dans la direction opposée, alors sa limite d'écoulement peut se retrouver abaissée. Cet effet peut intervenir en addition de l'effet de contraintes internes (dues à des gradients thermiques par exemple). D'autre part si un matériau modélisé doit posséder un comportement élasto-plastique, alors il sera nécessaire de préciser dans quelle mesure l'écrouissage est de type isotrope ou cinématique. L'étape d'amorçage d'une fissure a lieu en surface du matériau, son état de surface est déterminant dans le domaine plastique. Les fissures sont initiées sur des irrégularités de la structure telles que les joints de grains, les bandes de glissement, etc. On précise que la phase de propagation de la fissure constitue la majeure partie de la durée de vie. Cette dernière phase a donné lieu à de nombreuses méthodes de calcul dont une synthèse est proposée par la suite.

2.4.2.2 Courbes d'endurance

Les essais avec un chargement périodique permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture d'un matériau. Les essais de fiabilité produisent des contraintes propres à ce qu'on appelle le « profil de mission », celles-ci correspondent à l'application du composant. La localisation des défaillances observées conduit à étudier en fatigue le matériau qui présente la rupture sous forme d'éprouvettes lisses. La contrainte alternée est caractérisée par sa valeur moyenne et son rapport de charge R défini par :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.3)$$

Pour un matériau et une sollicitation donnés, à chaque amplitude de la sollicitation alternée σ_a correspond un nombre de cycles à rupture N_f . Le tracé de cette caractéristique est une courbe de Wöhler.

Sur la figure 2.41 trois zones sont délimitées :

- La zone 1 correspond à une contrainte proche de la résistance mécanique avec peu de cycles, typiquement moins de 1000 cycles (fatigue oligocyclique)
- La zone 2 correspond à un faible niveau de contraintes avec beaucoup de cycles, typiquement plus de 50000 cycles, on parle d'« endurance limitée »
- La zone 3 correspond à la limite d'endurance, en dessous de la contrainte σ_{aD} on ne constate plus de rupture. Notons que tous les matériaux ne présentent pas une limite d'endurance Cette courbe est usuellement appelée courbe S-N par les anglo-saxons. Notons également que la présence de défauts géométriques ou microstructuraux a un effet direct sur la limite d'endurance [41].

La courbe d'endurance est établie à partir d'essais à des niveaux de contraintes différents. Pour chaque niveau de contrainte plusieurs échantillons sont nécessaires car les essais

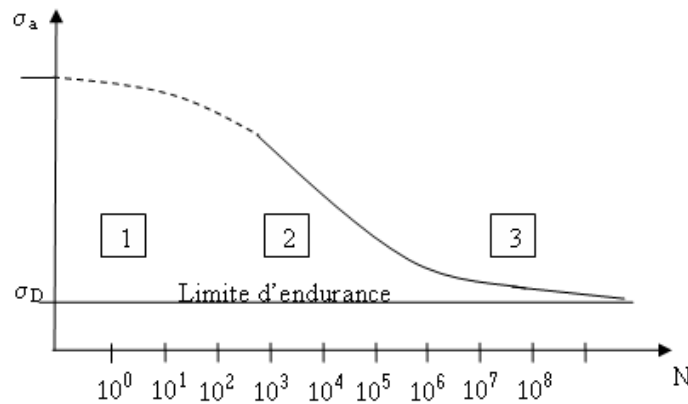


FIG. 2.41 – Courbe de contrainte de Wöhler représentant en échelle semi-logarithmique la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles de chargement

en fatigue montrent naturellement une grande dispersion. Les causes de cette dispersion sont rangées en trois catégories :

- La dispersion liée au matériau lui-même
- La dispersion liée au procédé de fabrication des éprouvettes
- Les causes de dispersions extérieures aux deux précédentes

Parmi les causes de dispersion liée au matériau on trouve toutes les imperfections dues à l'élaboration du matériau lui-même : retassures, porosités, etc. La dispersion liée à la fabrication des éprouvettes peut venir de contraintes internes, de la rugosité ou de fissures accidentellement produites. La troisième cause de variabilité est liée au montage de l'éprouvette, à la mise en place de l'essai. Un grand nombre d'essais permet de montrer que la durée de vie pour un niveau de contrainte donné suit une distribution lognormale. La courbe de Wöhler tracée précédemment correspond en fait à la durée de vie à 50 % de probabilité de rupture pour chaque niveau de contrainte (on parle d'isoprobabilité). Du point de vue des essais de fiabilité décrits précédemment on peut considérer qu'une même structure de composant, testée avec des matrices de billes de tailles différentes, correspond en fait à plusieurs niveaux de contraintes appliqués à cette structure. Cette considération est valable sous réserve de valider que le mode de défaillance est le même à tous les niveaux de contraintes / tailles de matrices de billes. En effet, la structure des composants étant complexe, le chemin de fissuration est susceptible de changer en fonction du niveau de contrainte qui est appliqué.

Six paramètres sont considérés comme particulièrement influents sur la tenue en fatigue d'une pièce :

- La contrainte moyenne de la sollicitation cyclique
- Le mode de sollicitation : traction-compression, flexion alternée, flexion rotative, etc.
- L'état de surface du matériau
- Les contraintes internes
- La fréquence de sollicitation
- La température

Les deux premiers points concernent le mode de sollicitation et l'amplitude. Dans le

cadre des normes JEDEC ces paramètres sont imposés tant pour le test de chute que pour celui de flexion, au niveau du circuit imprimé. Au niveau du composant, et plus particulièrement au niveau de ses interconnexions, il faudrait déterminer les caractéristiques de la contrainte cyclique. La contrainte alternée au niveau des interconnexions sera discutée plus précisément via les calculs par simulation numérique. En effet, les actions envisageables pour modifier l'amplitude de la contrainte (et sa valeur moyenne) sont surtout des modifications géométriques des interconnexions. L'état de surface du matériau est lié notamment au procédé de fabrication. On rappelle que les fissures s'amorcent en général à partir d'irrégularités de la surface d'un matériau. Dans le cas de procédé d'usinages classiques, des opérations telles que le polissage électrolytique ou le grenaillage peuvent apporter des améliorations substantielles.

Les contraintes internes (aussi appelées « contraintes résiduelles ») constituent un point mal connu en microélectronique. Ces contraintes sont relativement connues au niveau des procédés de dépôts car celles-ci engendrent la courbure de la plaquette de silicium. En effet, l'empilement des matériaux (pistes de conduction, passivations, couches ayant des fonctions électroniques, couche d'adhésion, etc.) est effectué par étapes successives et les températures atteintes dépendent du type de matériau déposé. Du fait de cette complexité on parle généralement de « budget thermique » pour désigner l'ensemble des variations de températures que la plaquette subit. Toujours au niveau de la diffusion des dépôts on quantifie généralement la contrainte « globale » de la plaquette en fonction de sa courbure, de son diamètre et de son épaisseur. La formule de Stoney [42] permet de remonter à une valeur de contrainte σ :

$$\sigma = \frac{E_s}{6.(1 - \nu_s)} \times \frac{t_s^2}{t_f} \times \left(\frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (2.4)$$

E_s est le module d'Young du substrat (la plaquette), ν_s désigne le coefficient de Poisson du substrat, t_s est l'épaisseur du substrat et t_f est l'épaisseur du film.

R_0 est le rayon de courbure de la plaquette à l'état initial et R_f le rayon de courbure de la plaquette une fois le film déposé.

Cette formule est une manière de quantifier l'état de contrainte d'une plaquette indépendamment de ses dimensions géométriques. Cela dit aucun lien avec les différents éléments de la matrice des contraintes (forme générale dans un repère donné) n'a pu être trouvé. Les méthodes actuelles présentent donc deux inconvénients :

- La contrainte calculée est établie globalement et non couche par couche
- La formulation ne permet pas de remonter aux éléments de la matrice des contraintes (ou aux contraintes principales par exemple) comme cela sera développé dans le Chapitre 3. *Stoney* [42] supposait que la contrainte était uni-axiale dans la direction de courbure.

Au niveau de la finition, des contraintes internes sont probablement générées lors du refroidissement des billes sur les couches d'adhésion. Ces contraintes se caractérisent par des fissures avant tout essai comme cela a été évoqué précédemment (*cf.* figure 2.5). Ce type de fissures n'arrive pas systématiquement, il est lié au type de passivation utilisée. Certaines de ces fissures sont d'ailleurs déjà présentes avant la soudure de la bille.

Les contraintes internes s'ajoutent aux contraintes extérieures appliquées, l'expression

est la suivante :

$$\sigma_{moyenne} = \sigma_{moyenne\ externe} + \sigma_{intrinsque} \quad (2.5)$$

Selon que les contraintes intrinsèques soient en traction ou en compression - compensent ou non la sollicitation extérieure - celles-ci peuvent avoir un effet favorable ou défavorable sur la tenue en fatigue du matériau considéré. La fréquence (5ème point) peut influencer la durée de vie de plusieurs manières. D'une part son action intervient *via* la vitesse de déformations dans la courbe de plasticité du matériau. D'autre part il est établi que dans un milieu actif l'augmentation de la fréquence tend à augmenter la durée de vie. Enfin, la température est un point délicat à prendre en compte lors de l'étude de la résistance en fatigue. Ce paramètre intervient dans la courbe contrainte-déformation du matériau et tend à amplifier l'effet de l'oxydation. Par ailleurs, il existe probablement des interactions entre l'endommagement par fatigue et l'endommagement par fluage à des températures élevées.

2.4.3 Les modèles de prédiction

Il existe un grand nombre de modèles pour prédire la durée de vie d'un composant électronique, certains précisent le domaine d'application (sollicitation physique ou type de boîtier électronique). Ces modèles varient au niveau du critère utilisé (contrainte, déformation, etc.) ainsi que du modèle mathématique : loi puissance, exponentielle, etc. On peut trouver des synthèses de ces modèles, par exemple *Lee et Al.* [43] proposent la classification suivante :

- Modèles de fatigue basés sur les contraintes
- Sur la déformation plastique
- Sur la déformation en fluage
- Sur l'énergie
- Et sur l'accumulation d'endommagement

Les modèles qui n'appartiennent à aucune de ces cinq catégories sont classés comme « empiriques », l'auteur cite ainsi le modèle de *Norris et Landzberg*. L'approche générale pour modéliser la fatigue se divise en quatre étapes principales. La 1ère de ces étapes consiste à établir une équation théorique (ou constitutive). Ensuite l'équation est transcrite dans un modèle éléments finis (FEM). Le programme FEM calcule les contraintes et déformations du système. Puis, ces résultats sont utilisés pour créer un modèle qui prédit le nombre de cycles à rupture N_f . Finalement, ce modèle est validé en utilisant des données réelles.

2.4.3.1 Modèles basés sur les contraintes

De tels modèles sont utilisés lorsque la sollicitation appliquée est une force ou une contrainte de laquelle résulte une déformation. Ceux-ci s'appliquent plus spécifiquement dans le cas de composants qui subissent des chocs ou des vibrations. Notons que dans le cas du test de chute et de celui de flexion, le composant lui-même n'est pas soumis à un choc. De fait, l'énergie issue du pulse d'accélération provoque une déformation du circuit imprimé ; la sollicitation des interconnexions des WL-CSP est donc plus vraisemblablement

2.4. ETUDE SUR LA FATIGUE MÉCANIQUE

basée sur les déformations induites par la déformation du circuit imprimé. La formulation la plus ancienne du calcul de la durée de vie proposée est probablement celle de Wöhler :

$$\ln(N) = a - b \times \sigma_a \quad (2.6)$$

N est le nombre de cycles à rupture, a et b sont les constantes dépendantes du matériau, σ_a est l'amplitude de la contrainte alternée. Citons également les lois suivantes :

- De Weibull $N (\sigma_a - \sigma_D)^n = C$
- De Basquin $\sigma_a = \sigma'_f \times N^b$ avec b compris entre -0.05 et -0.12

Par ailleurs, on remplace couramment le nombre de cycles N par le nombre d'inversions $2N_f$ dans un cycle. Ainsi, on peut trouver la loi de Basquin sous la forme :

$$\sigma_a = \sigma'_f \times (2N_f)^b \quad (2.7)$$

Dans le cas de contraintes cycliques, une estimation du temps à rupture peut-être faite en utilisant une forme particulière de la règle de fractionnement du temps développée ci-dessous [44] :

$$N_f = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{t_{ri}} \right) = 1 \quad (2.8)$$

N_f est le nombre de cycles à rupture, n est le nombre d'étapes dans un cycle, Δt_i est le temps passé au niveau de contrainte σ_i dans un cycle, t_{ri} est le temps à rupture pour le niveau de contrainte σ_i . On remarque que le terme dans la sommation est similaire avec celui de la règle de Palmgren-Miner pour l'endommagement cyclique.

2.4.3.2 Modèles basés sur les déformations

Déformations plastiques

Coffin-Manson, Solomon, Engelmaier et Miner ont proposé des modèles de fatigue des joints de soudure basés sur la déformation plastique. Chacun d'eux prédit le nombre de cycles pour atteindre la rupture en se basant sur la détermination (expérimentale ou calculée) de la déformation de cisaillement appliquée. Le modèle de Coffin-Manson semble être le plus largement appliqué actuellement, le nombre total de cycles à défaillance N_f est décrit comme dépendant de l'amplitude de déformation plastique ainsi que d'un coefficient de ductilité ε'_f et de l'exposant de fatigue ductile c :

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.9)$$

L'exposant de fatigue ductile varie entre -0.5 et -0.7. On constate que des données expérimentales sont nécessaires pour déterminer les deux constantes de l'équation. Ce modèle suppose que la fatigue est principalement liée à la part plastique de la déformation, il est donc communément combiné avec l'équation de Basquin pour prendre en compte les déformations élastiques :

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \times (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.10)$$

$\Delta\varepsilon$ étant la gamme de déformations, E le module d'Young ; ε'_f , σ'_f , c et b étant des constantes. La part plastique de la déformation est particulièrement importante à prendre en compte dans le cas d'un grand nombre de cycles de fatigue. La relation de Solomon relie la déformation plastique de cisaillement – fatigue en peu de cycles – au nombre de cycles par la relation suivante :

$$\Delta\gamma_p N_p^\alpha = \theta \quad (2.11)$$

$\Delta\gamma_p$ correspond à l'amplitude de déformation plastique en cisaillement. N_p est le nombre de cycles à défaillance. θ est l'inverse du coefficient de fatigue ductile et α est une constante liée au matériau.

Le principe de superposition de Miner est linéaire et permet de prendre en compte à la fois la déformation plastique et la déformation liée au fluage. Ce modèle combine le modèle de Solomon vu ci-dessus et la modèle de Knecht-Fox décrit dans la section suivante :

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_p} + \frac{1}{N_c} \quad (2.12)$$

N_f est le nombre de cycles à rupture, N_p le nombre de cycles liés à la fatigue par déformation plastique (modèle de Solomon) et N_c le nombre de cycles de fatigue liés au fluage. On constate que l'ensemble de ces modèles relie une déformation plastique à un nombre de cycles *via* une loi puissance. Une discussion sera nécessaire pour déterminer quel phénomène (déformation plastique, élastique ou de fluage) devra être pris en compte dans les cas des tests de chute et de flexion car les nombres de cycles à la rupture de ces deux tests ne sont pas du même ordre de grandeur.

Déformations de fluage

On distingue le fluage de la matrice et le fluage au niveau des grains. Knecht et Fox ont proposé un modèle de fatigue matriciel lié à la microstructure de la brasure et à l'amplitude des déformations de cisaillement.

$$N_f = \frac{C}{\Delta\gamma_{mc}} \quad (2.13)$$

N_f est le nombre de cycles à rupture, C est une constante liée au critère de défaillance et à la microstructure de la brasure, $\Delta\gamma_{mc}$ est l'amplitude de déformation due au fluage matriciel.

La vitesse des cycles thermiques détermine le mécanisme de fluage mis en jeu. Les effets de la déformation plastique en fluage ne peuvent être négligés que si la vitesse de déformation est suffisamment basse pour être négligée. En conséquence la contrainte est considérée constante et la déformation est effectivement dépendante du temps. *Morris et Reynolds* [45] ont montré l'effet de la structure sur la mécanique des alliages de brasure eutectiques. Ils soulignent trois points fondamentaux :

- L'utilisation de données qui doivent être représentatives du véritable joint de brasure

2.4. ETUDE SUR LA FATIGUE MÉCANIQUE

- Les modèles analytiques de prédiction doivent incorporer l'effet de la microstructure
- Les petites impuretés ont un effet significatif sur la microstructure

2.4.3.3 Modèles basés sur l'énergie

Les modèles basés sur l'énergie sont de plus en plus largement utilisés, notamment pour des problèmes de thermiques. *Akay et Al.* [46] relient le temps de défaillance N_f à l'énergie de déformation $\Delta\bar{W}_{totale}$ totale par la relation suivante :

$$N_f = \left(\frac{\Delta\bar{W}_{totale}}{W_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.14)$$

k et W_0 sont des coefficients à déterminer.

Le modèle probablement le plus employé en électronique – et plus particulièrement pour les essais de cyclage thermique (TCT) – s'appuie sur les travaux de *Darveaux* et a été utilisé par *Gustafsson* [47] pour la prédiction du comportement de BGA. Une relation est établie entre la quantité $\Delta W_{average}$, le nombre de cycles à l'initiation de la fissure N_0 et la vitesse de propagation de la fissure da/dN :

$$\begin{cases} N_0 = C_3 \Delta W_{avg}^{C_4} \\ \frac{da}{dN} = C_5 \Delta W_{avg}^{C_6} \end{cases} \quad (2.15)$$

C_3 , C_4 , C_5 et C_6 sont des constantes, et a est la longueur de fissure caractéristique.

Le terme ΔW_{avg} est appelé « densité de travail plastique », cette valeur est moyennée sur les éléments du modèle FEM qui concentrent le maximum de travail plastique. Dans la pratique *Gustafsson* utilise la densité accumulée entre le 3ème et le 4ème cycle pour calculer les constantes et effectuer toutes les prédictions.

2.4.3.4 Autres modèles

Les recherches concernant la fatigue des matériaux passent souvent par l'étude des fissures, leur propagation et les facteurs de concentration de contraintes qui interviennent. L'étude du comportement des fissures peut-être décomposée comme suit :

- Méthodes de détection de l'initiation d'une fissure, de sa propagation [48]. Le corollaire de cette phase est le choix d'un critère d'initiation de la fissure qui peut être une valeur absolue (par exemple 20 μm) ou une valeur relative (par rapport à la taille de grain, par exemple) [49]
- Etude de la propagation de la fissure : différence entre fissures courtes et longues, influence de la microstructure, effet de la fermeture de fissure (attribuée à la rugosité, à l'oxydation et à une compression plastique notamment), influence du mode de sollicitation, etc.
- Modélisation de cette propagation de fissure et modélisation, par exemple par la détermination du facteur de concentration de contraintes [50]. Cette étape de modélisation est souvent accompagnée par la simulation numérique pour tenir compte notamment des effets géométriques et du comportement plastique des matériaux

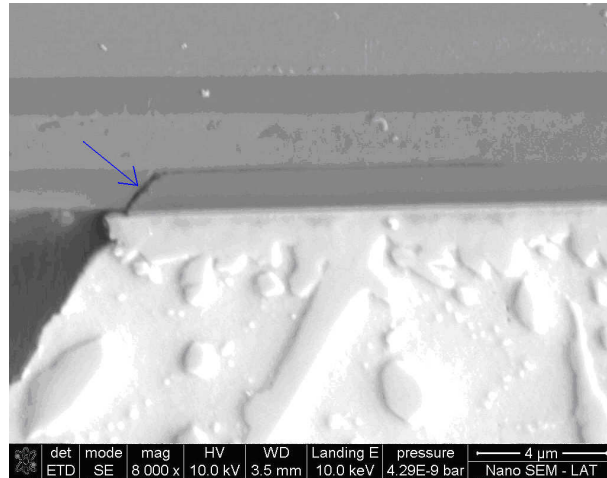


FIG. 2.42 – Exemple de fissure initiée après test de flexion

Aujourd'hui, en microélectronique, nous ne connaissons pas de moyen d'investigation physique pour déterminer à quel moment une fissure est initiée et dans quelle mesure celle-ci se propage. Les défauts constatés *a posteriori* impliquent que la fissure soit totalement propagée bien que dans de rares cas on puisse observer une propagation partielle comme le montre la figure 2.42. D'autre part, les points précédents sont généralement étudiés à partir d'éprouvettes lisses ou entaillées d'un même matériau. Or les observations – cf. figure 2.42 – montrent que plusieurs matériaux interviennent (ici : passivation, composés intermétalliques et aluminium). De plus on observe que les fissures se propagent partiellement dans un matériau puis dans un autre ainsi qu'à leurs interfaces. Les modèles de fatigue basés sur la mécanique de la rupture constituent donc une démarche spécifique, envisagée dans le cadre de futurs travaux de recherche et qui n'est pas développée plus avant ici.

2.4.4 Conclusions et perspectives sur l'étude de la fatigue

Cette partie a permis de donner un aperçu général sur la façon d'appréhender la fatigue. Il convient de distinguer l'approche de la microélectronique et celle de la mécanique. Dans le premier cas l'approche consiste à comparer une durée de vie expérimentale à une grandeur issue de la simulation numérique. Cette grandeur peut-être en contrainte, en déformation ou en énergie selon le type de boîtier et le profil de mission. De manière générale la discussion concerne surtout la façon de modéliser le composant électronique, son environnement et les sollicitations qui lui sont appliquées. Cette discussion a été initiée dans le Chapitre 1 lors de la présentation de l'état de l'art et se poursuivra avec le chapitre consacré à la modélisation par la méthode des éléments finis. Elle devra également établir dans la mesure du possible la gamme de validité du modèle ainsi utilisé ou établi. La deuxième approche présentée, purement mécanique, consiste à solliciter une éprouvette lisse ou entaillée dans des conditions normées. Cette méthode permet de déterminer notamment le comportement en fatigue d'un matériau (courbe de Wöhler) ainsi que d'autres aspects tels que l'écrouissage isotrope ou cinématique. Les difficultés rencontrées sont principalement technologiques : fabrication d'éprouvettes représentatives, critères de rupture, variation de

l'amplitude de la sollicitation et du rapport de charge, prise en compte des contraintes internes, etc. Une partie importante de la fatigue en mécanique n'a pas été traitée, il s'agit de la mécanique de la rupture. En effet, aux limitations citées précédemment s'ajoutent d'autres telles que : déterminer un critère d'initiation de fissure et suivre l'évolution d'une fissure (dans un matériau autre que la piste). Compte-tenu de ces différents éléments on privilégie une approche associée aux éléments finis. Celle-ci devrait permettre de « synthétiser » les contraintes et les différents lieux d'initiation et de propagation de la fissure à partir d'une ou plusieurs grandeurs. D'autre part les observations sur le test de chute permettent de conclure à une fatigue de type oligocyclique, ce qui conduit à prendre en compte la déformation plastique d'un ou plusieurs éléments de la structure des WL-CSP.

2.5 Conclusion sur les essais mécaniques

Deux essais de fiabilité mécanique ont été étudiés dans ce chapitre, l'essai de chute et celui de flexion. De nombreux résultats expérimentaux existent concernant l'essai de chute : tant au niveau statistique qu'au niveau des observations des microsections. L'étude a donc été orientée de manière à proposer d'étudier : d'une part un paramètre métallurgique et d'autre part un essai alternatif. Les expérimentations de mise en étuve avaient pour objectif d'influencer la métallurgie de la structure du composant. Aucune influence significative n'est apparue sur les résultats statistiques, cependant des mesures de cisaillement des composants ont été menées en parallèle. D'après l'état de l'art du chapitre précédent, les essais de cisaillement pourraient constituer une alternative à l'essai de chute pour évaluer (au moins qualitativement) la fiabilité des composants. Il apparaît au final que les faciès de rupture après les mesures en cisaillement ne correspondent pas avec les faciès observés lors du retrait des billes après l'essai de chute. Des analyses chimiques sur ces faciès de rupture ont permis de décrire « dans le volume » la propagation de la fissure contrairement aux microsections qui n'apportent qu'une vue partielle. Ceci démontre que la fissure prend une forme circonférentielle qui tend à se propager dans une direction parallèle à la longueur du circuit imprimé. Il conviendrait donc d'effectuer les microsections selon le même axe pour observer correctement la propagation de la fissure. Un banc de test pour l'essai de flexion a été mis au point. Dans un premier temps des mesures de force, de déplacement et de déformation permettent de cerner les ordres de grandeurs mis en jeu dans les conditions définies par la norme JEDEC. Ensuite l'essai de flexion dans les conditions de cette norme est répété trois fois pour en évaluer la répétabilité. A partir de ces informations, plusieurs paramètres sont évalués : le mode d'assemblage, la fréquence de sollicitation et la pré-charge. La pré-charge correspond à une nécessité pratique : assurer le contact entre les appuis et le circuit imprimé. La variation de la fréquence correspond à un autre aspect pratique : accélérer le test pour en diminuer le temps. Le mode d'assemblage est dépendant du procédé industriel choisi pour reporter le composant sur le PCB. Il apparaît que la pré-charge peut être choisie entre 1 N et 4 N sans influencer significativement le résultat statistique. La fréquence semble influencer la durée de vie significativement compte-tenu des variations observées lors des essais de répétabilité. Cependant, ce dernier point devrait être répété pour en assurer la validité. Suite aux essais de flexion des microsections ont montrés que les faciès de rupture dans les composants sont analogues à ceux observés lors des essais de chute. Un futur travail pourrait consister à évaluer l'influence du circuit im-

2.5. CONCLUSION SUR LES ESSAIS MÉCANIQUES

primé sur cet essai. En effet, il est acquis que le PCB influence significativement l'essai de chute et il serait intéressant de disposer d'un essai dans lequel on pourrait s'affranchir de cette variable. Ceci est envisageable dans la mesure où l'essai de flexion est piloté en déplacements et non en force. Enfin, les analyses statistiques indiquent que certaines distributions correspondent à des modèles de Weibull à trois paramètres. Une seule population est considérée compte des observations des microsections. Il pourrait être intéressant de poursuivre cette recherche pour déterminer ce qui influence ce troisième paramètre car cette étude serait transposable également à l'essai de chute.

Troisième partie

Caractérisation des matériaux

Chapitre 3

Caractérisation des matériaux

Ce chapitre présente les mesures effectuées sur les matériaux mis en jeux lors des essais mécaniques de chute et de flexion. Ces mesures doivent permettre de :

- Déterminer les caractéristiques spécifiques aux WL-CSP pour les utiliser en simulation numérique
- Comprendre le comportement des matériaux pour faire ressortir des caractéristiques qui pourraient influencer significativement les performances en fiabilité

Lors d'un essai de chute (*cf.* figure 1.13) la sollicitation est une accélération appliquée à l'assemblage (circuit imprimé et composants). Le circuit imprimé vissé en ses quatre coins fléchit, sa déformation est la principale cause de détérioration des composants. La raideur du circuit imprimé possède probablement une importance moindre pour le test de flexion dans la mesure où le déplacement est imposé, par contre il faut prendre en compte d'autres paramètres comme la configuration des plots de cuivre. Les localisations des fissures sont variées compte-tenu du grand nombre de produits et de configurations aussi tous les matériaux du composant électronique doivent être caractérisés dans la mesure du possible. Deux techniques ont été mises en œuvre dans le cadre de cette caractérisation. La première technique est basée sur la technique de l'analyse mécanique dynamique qui permet de caractériser des phénomènes macroscopiques, elle est utilisée sur le circuit imprimé et l'alliage des billes de brasure. La deuxième technique répond à une problématique fondamentale en microélectronique : les couches successives sont déposées sur une plaquette (ici en silicium) et celles-ci ont une épaisseur généralement de l'ordre de quelques micromètres. La nanoindentation est donc largement utilisée dans le cadre de la caractérisation des propriétés des WL-CSP.

3.1 La technique de mesure par DMA

Dans un premier temps on développe le principe d'une analyse dynamique en mécanique, ce qui permet d'exploiter correctement les mesures effectuées ensuite sur plusieurs sortes de circuits imprimés et d'alliages de brasure.

3.1.1 Mesures sur circuit imprimé

3.1.1.1 Présentation de l'appareil DMA

L'Analyse Mécanique Dynamique est une technique de grande précision permettant la mesure des propriétés viscoélastiques des matériaux. Elle consiste à appliquer une déformation sinusoïdale à un échantillon de matériau et à mesurer la force résultante transmise par l'échantillon. Equipé de capteurs, le viscoanalyseur (DMA) du LMR mesure principalement deux grandeurs dynamiques : le déplacement et la force. Le logiciel de pilotage propose deux possibilités : piloter en force et mesurer les déplacements ou l'inverse. Les mesures sont réalisées sur des rampes ou sur des paliers de températures. Le déphasage entre les signaux sinusoïdaux d'entrée et les signaux de sortie est donné par l'angle de phase δ . Le signal de réponse en déformation d'un matériau viscoélastique est déphasé car ce dernier dissipe une partie de l'énergie en se déformant. L'angle δ est calculé à partir du traitement de ces signaux, par l'application d'une transformation de Fourier rapide. Connaissant la rigidité dynamique et la géométrie de l'éprouvette, il est possible de calculer le module élastique du matériau.

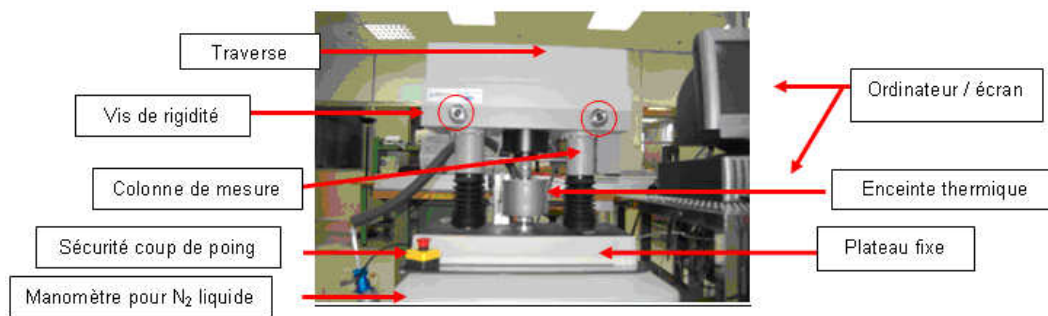


FIG. 3.1 – Présentation du viscoanalyseur VA2000

Les mesures des propriétés thermomécaniques des matériaux sont réalisées sur un appareil de marque METRAVIB, au LMR, disposant de mors de traction/compression et de flexion.

Les signaux délivrés par les capteurs subissent un traitement de façon à extraire les valeurs des grandeurs mécaniques.

3.1.1.2 Mesures à température ambiante

Il s'agit d'essais de flexion plane, libre, 3-points utilisant un échantillon du circuit imprimé, ce qui impose :

1. De choisir une lamelle suffisamment grande pour prendre en compte une portion représentative entre le FR-4 (composite constituant le circuit imprimé) et les pistes de cuivre,
2. De répéter cette mesure sur plusieurs « lieux de prélèvement »

Ce type de mesure permet d'accéder au module en flexion noté E_f calculé de la manière suivante :

3.1. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR DMA

$$E_f = \frac{24L^3}{bh^3\Pi^4} \left(k \times \cos \delta + \omega^2 \rho \frac{Lbh}{2} \right) \quad (3.1)$$

L est la distance entre les appuis, b et h la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette, ω la pulsation (liée à la fréquence) de la sollicitation et δ l'angle de déphasage entre le signal appliqué et le signal mesuré. Cette expression tient compte de la masse volumique ρ du matériau testé, toutefois son influence est relativement faible ce qui permet d'utiliser une valeur approchée. Pour effectuer ce type de mesure plusieurs précautions doivent être prises concernant les dimensions de l'éprouvette et les conditions d'essai :

- Que la raideur k (en N/m) soit dans la gamme de mesure de la machine, ce qui dépend également du capteur utilisé
- Que l'on travaille à des fréquences qui limitent les effets de résonance et de cisaillement (distance entre appuis $L = 22$ mm, largeur de l'échantillon $b = 16$ mm et hauteur dans le sens de sollicitation $H = 1$ mm)

$$f_s = 0.71 \times \frac{b}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 70768 Hz \quad (3.2)$$

Le calcul des propriétés dynamiques doit être limité aux fréquences d'excitation inférieures à $0.08f_s$, c'est-à-dire inférieures à 5661 Hz (f_s étant calculée à partir de l'équation ci-dessus). Dans le cas du circuit imprimé, une pré-contrainte statique de 500 μ m est appliquée afin que l'actionneur reste en contact permanent avec l'échantillon.

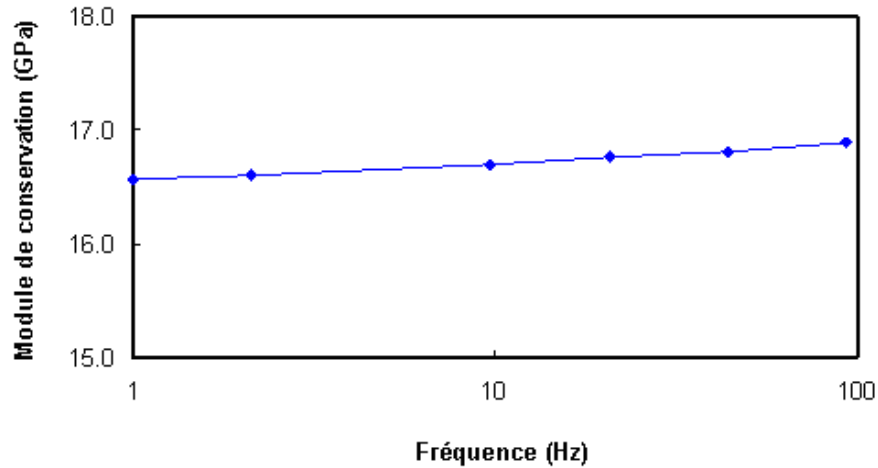


FIG. 3.2 – Variation de la rigidité en fonction de la fréquence - Réponse d'un circuit imprimé Aspocomp conception ST avec un pas de 500 μ m

D'après la figure 3.2, ce matériau a un comportement linéaire entre 1 Hz et 100 Hz, pour des niveaux de déformation compris entre $1e-3$ et $5e-4$. Le taux de déformation étant moins bien stabilisé que la force par le viscoanalyseur (erreur relative par rapport à la consigne plus importante), par la suite les essais seront pilotés en force ce qui permettra des comparaisons entre différents circuits imprimés. Ce type de mesure présente l'avantage

3.1. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR DMA

d'être proche du mode de sollicitation d'un assemblage lors du test de chute par deux aspects : flexion et vibrations. Le module mesuré ici se situe entre 18 GPa et 19 GPa, ce qui correspond bien avec d'autres valeurs obtenues en flexion. En revanche les fréquences que peut atteindre l'appareil sont limitées à 200 Hz (borne supérieure) alors que les premiers modes de vibrations - obtenus par simulations dans la littérature – sont situés plus loin comme le montre le tableau 3.1 [7]. Dans la partie suivante, le principe d'équivalent temps/température est envisagé pour explorer des domaines de fréquences plus élevées.

Mode	Expérience (Hz)	Modélisation (Hz)	Ecart relatif (%)
1er	470	471.96	-0.42
2ème	911	919.46	-0.93
3ème	1360	1287.1	5.36
4ème	2030	2050.8	-1.02
5ème	2220	2168.9	2.30
6ème	2571	2665	-3.66
7ème	2863	2876.1	-0.46
8ème	3625	3542.7	2.27

TAB. 3.1 – Analyse modale de la vibration d'un circuit imprimé lors du test de chute avec fixation 4 vis

D'autre part cette technique ne permet pas de déterminer la limite élastique du matériau mais seulement de s'assurer que l'on reste dans le domaine de linéarité.

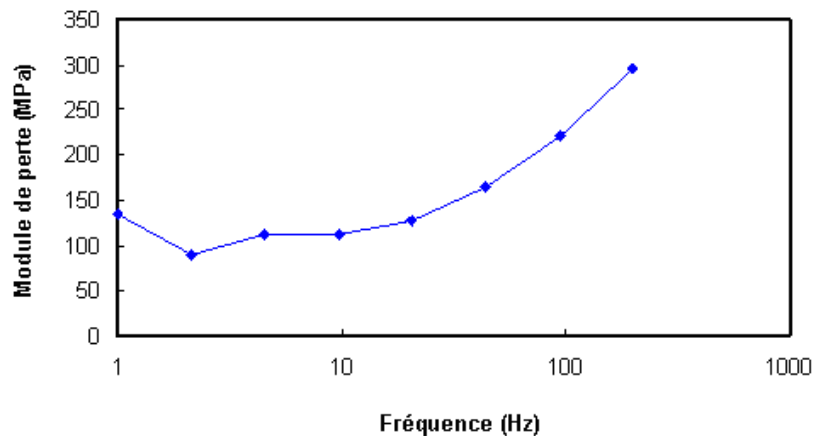


FIG. 3.3 – Variation du module E en fonction de la fréquence - Réponse d'un circuit imprimé Aspocomp conception ST avec un pas de 500 μm

On voit sur la figure 3.3 la composante visqueuse caractéristique de la 2ème partie du modèle de Kelvin-Voigt.

3.1.1.3 Mesures en température

Ces mesures peuvent être envisagées de deux manières :

- Pour obtenir la variation du module d'Young en fonction de la température. Ce type de caractérisation peut présenter un intérêt pour le test de cyclage thermique, mais le test de chute est réalisé à température ambiante,
- Pour dépasser la limite supérieure de 200 Hz et celle inférieure de 10^{-2} Hz propres aux caractéristiques du viscoanalyseur, via la méthode de l'équivalent temps/température [51].

C'est ce deuxième point qui va permettre de déterminer les caractéristiques du circuit imprimé aux fréquences correspondantes à ses modes de vibration.

En effet, si la fréquence de sollicitation est suffisamment basse (temps très supérieur au temps caractéristique τ) le comportement visqueux est prépondérant et toutes les molécules ont le temps de « répondre » dans l'espace d'une période. Par contre, à plus haute fréquence (temps inférieur à τ) les chaînes n'ont pas le temps de répondre totalement et le blocage artificiel qui en résulte se traduit par une augmentation du module [52]. D'autre part l'augmentation de la température correspond à une augmentation du volume libre, ce qui augmente la mobilité des molécules. Ainsi, une augmentation de température correspondra à une diminution de fréquence et inversement. Cette technique fonctionne pour les polymères, dans leur domaine linéaire, or le circuit imprimé est un composite avec une matrice en polymère. On peut donc atteindre les fréquences souhaitées en effectuant les mesures entre 1 Hz et 100 Hz à plus basse température. En revanche cette technique ne sera pas applicable dans le cas du métal pour lequel les phénomènes physiques mis en jeux sont différents.

La figure 3.4 montre que le module E' ne varie presque pas en fonction de la fréquence, il n'est donc pas possible de calculer des courbes maîtresses pour ce matériau dans le domaine étudié. Rappelons que le principe de superposition fréquence/température n'est valide que dans un domaine de température compris approximativement entre la fin du plateau vitreux des matériaux (T_1) jusqu'à une température $T_2 = T_1 + 100$ °C.

Sur la figure 3.5 l'échelle de gauche correspond aux points rouges et l'échelle de droite aux points en bleu. Le module E' correspond à la partie purement élastique du matériau (module de conservation), tandis que E'' correspond au module d'amortissement du matériau (module de perte). Cette figure montre que les basses températures permettent d'atteindre les hautes fréquences par superposition des essais à plusieurs températures sur une gamme restreinte de fréquences (de 1 Hz à 100 Hz) en une courbe maîtresse isotherme sur une gamme élevée de fréquences. Sur 4 décades en fréquence, le module d'Young du circuit imprimé varie entre 18.4 GPa et 23.8 GPa ce qui représente un écart de 5 GPa.

Compte-tenu de la précision de la DMA, on voit que la plus grande source d'erreur repose sur les caractéristiques dimensionnelles de l'échantillon, de sa mise en place sur les appuis ainsi que du placement de la colonne (pour l'appui).

3.1. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR DMA

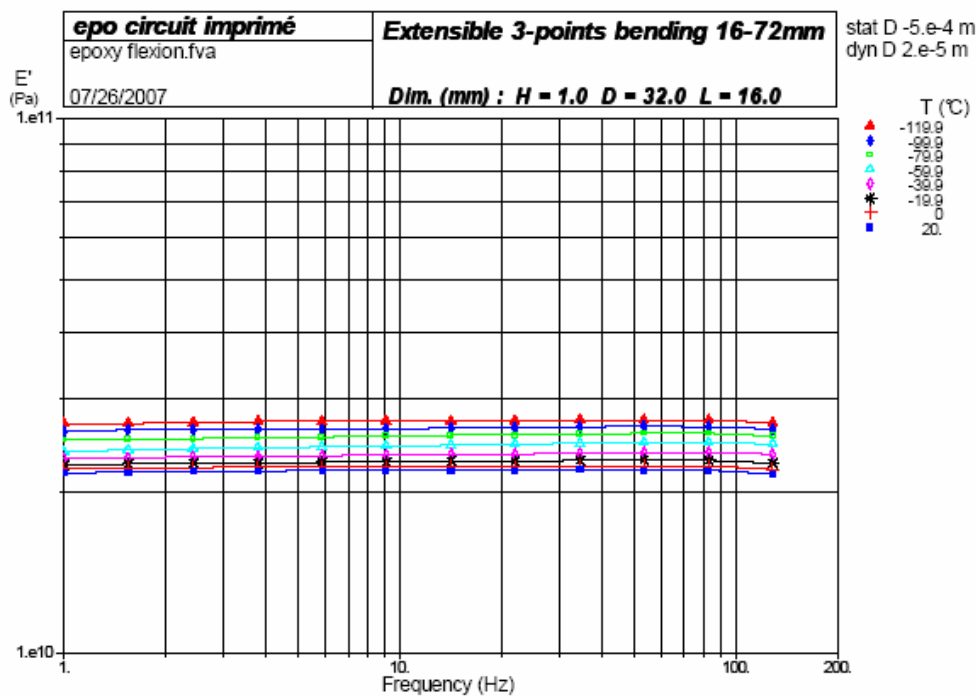


FIG. 3.4 – Exemple de mesures en flexion 3-points à plusieurs températures et fréquences sur circuit imprimé

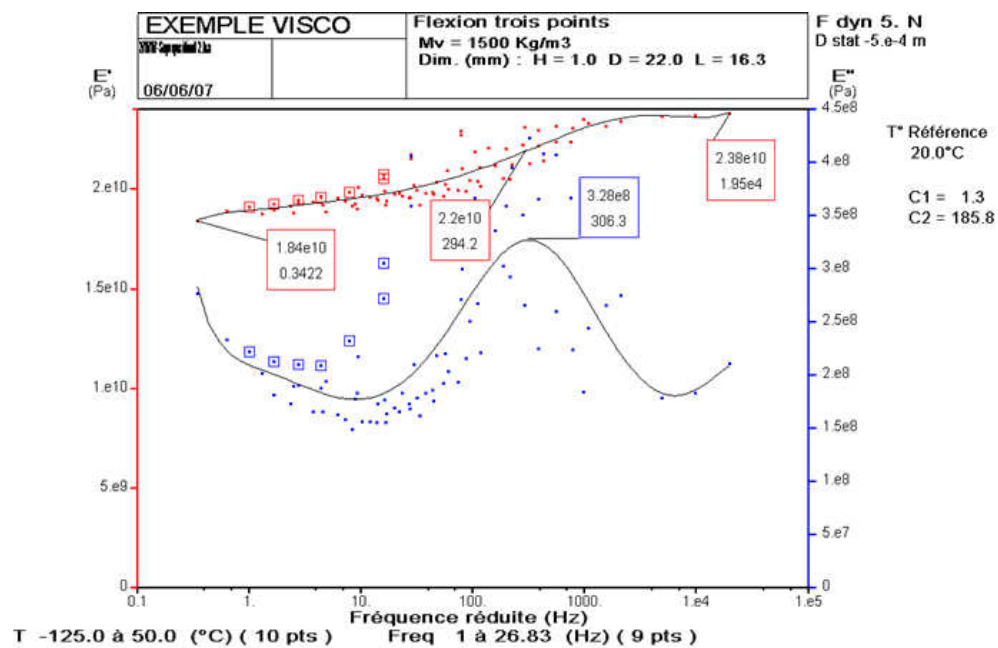


FIG. 3.5 – Equivalent temps/température sur circuit imprimé Ibidem conception ST avec un pas de 500 μm Mesures entre -125 °C et + 50 °C – L'échelle de gauche correspond aux points de mesures en rouge et l'échelle de droite à ceux en bleu

3.1. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR DMA

3.1.2 Alliages pour les interconnexions

3.1.2.1 Procédé de fabrication des éprouvettes

La matière première, qui sert à la fabrication des éprouvettes, se présente sous forme de billes pour les alliages sans-plomb utilisés sur les WL-CSP. Contrairement à l'alliage $\text{Pb}_{92.5}\text{Sn}_5\text{Ag}_{2.5}$ (initialement conditionné sous forme de pâte), le procédé de réalisation des éprouvettes sans plomb est parfaitement répétable avec un bon état de surface. Le protocole de réalisation des éprouvettes de brasure qui permet cette fabrication répétable, notamment pour les dimensions de la partie utile (*cf.* 3.6) sont : hauteur de 30 mm, largeur de 2 mm et épaisseur de 0.6 mm.

Les dimensions ont été calculées en prenant en compte deux contraintes majeures :

- La gamme d'acceptation de la DMA en termes d'élançement et de rigidité de la pièce dans la gamme de fréquences statique 200 Hz
- Les possibilités de moulage et de fabrication du moule (*cf.* Annexe 1)

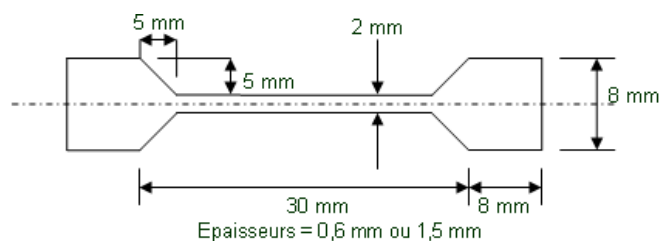


FIG. 3.6 – Schéma et dimensions des éprouvettes de traction

Les conditions optimales de réalisation des éprouvettes sont alors :

- Vitesse d'avance du tapis du four : 11 cm/min
- Cycle de température du four : 400 °C 380 °C 300 °C, chacune des températures correspondant à une zone dans le four (sous atmosphère N_2)

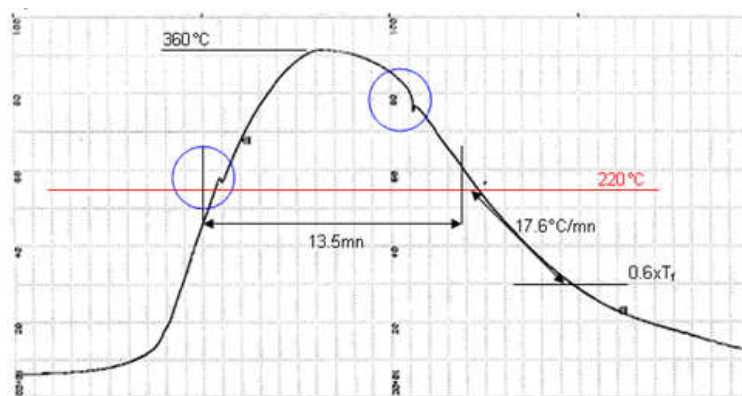


FIG. 3.7 – Relevé de températures du moule lors de son passage dans le four

La figure 3.7 montre l'évolution de la température au cours du passage dans le four. Celle-ci est mesurée à l'aide d'un thermocouple placé dans le moule.

3.1.2.2 Mesures sur alliages sans-plomb

Les propriétés de l'alliage sans-plomb $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ sont étudiées en statique et en dynamique. Ces données ont permis de montrer que le module d'Young E de cette brasure est pratiquement constant dans le domaine fréquentiel. Des mesures sont effectuées sur deux autres alliages sans-plomb : $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ (SAC105) et $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}_{0.05}$ (SACN125-5). Des résultats du test de chute sont ensuite comparés aux courbes de tractions afin de déterminer un éventuel lien entre leurs propriétés et leurs performances. Ceci permettra par exemple de déterminer si le module est une donnée suffisante pour la simulation ou s'il sera nécessaire de prendre en compte la plasticité. Les mesures en températures permettent de mieux comparer les résultats avec les données des publications scientifiques et ainsi d'en évaluer l'écart. Le procédé de fabrication des éprouvettes reste identique à celui utilisé sur le $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$: mêmes moules et même profil de four, utilisation de matière première sous forme de billes utilisées pour le billage des WL-CSPs. Les essais avec la DMA sont répétés sur 5 éprouvettes pour chaque température puis les courbes sont moyennées à l'aide d'un programme MATLAB d'interpolation. Ceci permet d'obtenir une comparaison précise concernant les modules d'Young, la limite élastique et la résistance mécanique. Par contre la déformation à la rupture doit être calculée séparément car le logiciel ne peut pas interpoler cette donnée (ne pas lire directement cette valeur sur les courbes moyennes).

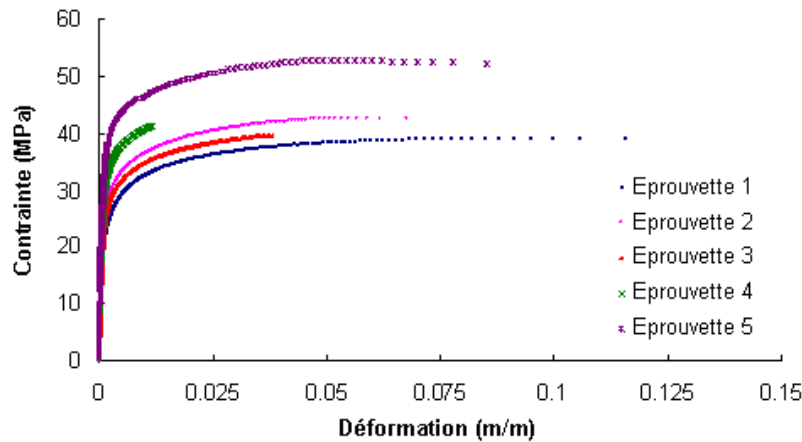


FIG. 3.8 – Essais de traction statique sur $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ température ambiante sur 5 éprouvettes

Alliage	Es (GPa)	Re (MPa)	Rm (A%)	A%
$\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$	13.3	30.9	41.2	10.5
$\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$	9.3	21.5	28.8	12.1
$\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$	9.6	22.9	32.5	7

TAB. 3.2 – Synthèse des propriétés mécaniques des 3 alliages étudiés à température ambiante

Les essais de traction sur un alliage sont répétés comme l'illustre la figure 3.8, ce qui

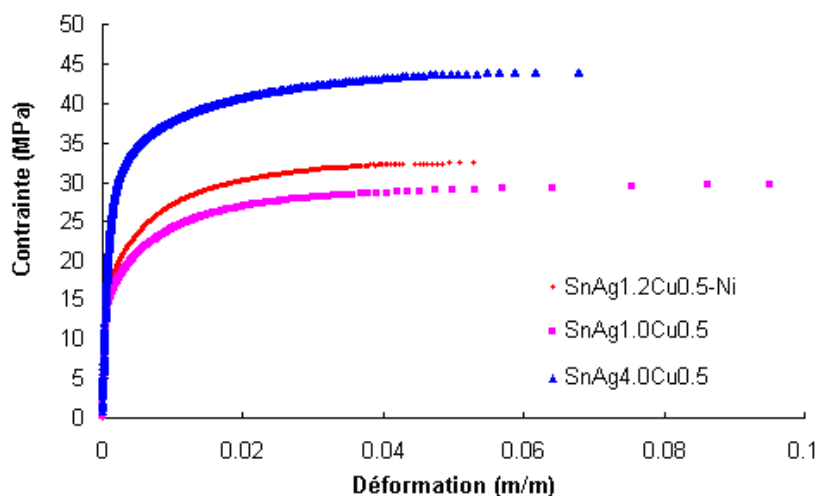


FIG. 3.9 – Superposition des courbes moyennes de traction pour les 3 alliages : température ambiante

montre la distribution liée principalement au matériau lui-même. A partir de cette série de courbes on effectue une moyenne par interpolation des points de mesure, ce qui permet la comparaison des 3 alliages de la figure 3.9. Enfin, le tableau 3.2 résume les différentes propriétés mécaniques obtenues des trois matériaux indiqués.

Le module sécant Es est déterminé par la pente entre l'origine de la courbe contrainte-déformation et le point à 0.2 % de déformation. La contrainte à ce niveau de déformation est appelée limite conventionnelle d'élasticité et notée Re dans le tableau ci-dessus. La résistance mécanique Rm est la contrainte maximale atteinte lors de l'essai de traction. L'allongement à la rupture - noté A % - est la moyenne des allongements à rupture des essais.

Note sur la mesure du module d'Young :

Le module sécant présenté ici est généralement inférieur à celui des publications, ce qui est lié à la méthode de calcul. En effet, il existe plusieurs méthodes pour interpréter les mesures issues des essais de traction. Si on prend en considération le module tangent¹ alors les valeurs sont plus proches mais restent inférieures à ce qui est attendu. En revanche, la valeur obtenue avec le mode dynamique de la DMA donne des valeurs tout-à-fait acceptables par rapport aux valeurs relevées dans l'état de l'art. On en déduit donc que les essais de traction sont effectués dans des conditions « quasi-statiques » pour lesquelles la vitesse de déformation est faible alors qu'en dynamique celle-ci est supérieure. Une première observation permet de constater qu'il y a un écart d'environ 30 % entre la limite élastique du $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ et celles – très proches – des $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ et $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}$. La même remarque s'applique sur le module sécant, la résistance mécanique et l'allongement à la rupture. Ceci permet de supposer que le $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ donnera un résultat sensiblement différent lors du test de chute tandis que les deux autres alliages devraient donner des performances très proches. Pour vérifier ces hypothèses on compare un boîtier testé avec le test

¹Le module tangent est déterminé en calculant la pente de la tangente à la courbe de traction à l'origine

3.1. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR DMA

de chute dans des conditions identiques, les 3 alliages ont été évalués sur ce même boîtier. Les paramètres relevés sont ceux qui décrivent le mieux le comportement d'un échantillon, ils ont été normalisés pour rendre la comparaison plus aisée.

Alliage	β	η	1er défaut	LCB
SnAg ₄ Cu _{0.5}	0.88	0.63	0.59	0.72
SnAg ₁ Cu _{0.5}	1.00	0.77	1.00	1.00
SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni	0.55	1.00	0.80	0.68

TAB. 3.3 – Performances relatives au test de chute sur 1 même boîtier avec 3 types d'alliages

Le tableau 3.3 provient d'une série d'essais sur IPAD 7x7 avec un pas de 400 μm . Les valeurs normalisées sont telles que la plus élevée vaut 1 et les autres sont des fractions de celle-ci. Les paramètres observés sont :

- β est appelé « facteur de forme » et caractérise le mode de dégradation du composant, graphiquement on l'observe par une modification de la pente de la distribution statistique. Ce mode de dégradation est systématiquement vérifié par des analyses de défaillances. Dans ce cas précis les micro-sections semblent montrer un mode de défaillance unique. Les variations affichées ici sont donc liées à la variabilité (du composant, de l'assemblage et du test)
- η est appelé la durée de vie, il s'agit de la durée de vie pour une fiabilité (ou taux de défaillance) à un taux de 63.2 %
- Le premier défaut est le nombre nécessaire de chutes qu'il a fallu pour provoquer la 1ère défaillance de la population testée. Celui-ci dépend donc de la taille de la distribution et dans ce cas, 36 pièces ont été testées et la valeur a été normalisée.
- La valeur à 5 % (LCB) constitue un critère d'acceptation pour les WL-CSP. Il s'agit d'atteindre un nombre donné de chutes tel que la limite basse de confiance se situe à gauche du point ainsi défini.

On constate que le nombre de chutes pour obtenir un premier défaut augmente avec la résistance mécanique Rm de l'alliage, ainsi qu'avec la limite élastique Re . On a vu dans le Chapitre 2 que la limite basse de confiance à 5 % (LCB) varie trop d'un essai à un autre pour permettre de conclure. Lorsque ces mesures sont répétées à plusieurs températures, alors on peut déterminer les variations des paramètres mécaniques. Une étude sur ces matériaux à plusieurs températures, dont les résultats sont exposés ci-dessous, a montré une évolution significative de ces paramètres. Ces valeurs obtenues à des températures élevées pourront être utilisées dans des simulations de cyclage thermique des composants.

Ce type de mesure a été également réalisé sur un alliage au plomb suite à un partenariat avec le LMP dans le cadre d'un projet visant à rechercher des alternatives pour se conformer à la législation dans les composants de puissance. Les mesures dynamiques montrent que les modules d'Young de ces trois alliages ont des valeurs très proches. Par contre les mesures statiques ci-dessus montrent des différences significatives entre les alliages, notamment vis-à-vis des limites élastiques et des résistances mécaniques. Etant donné que les WL-CSP avec des billes en SnAg₁Cu_{0.5} et SnAg_{1.2}Cu_{0.5}Ni permettent d'obtenir de meilleurs résultats de fiabilité, on en déduit que l'abaissement de la limite élastique et de la résistance mécanique améliore la fiabilité mécanique des composants. Cette observation est cohérente

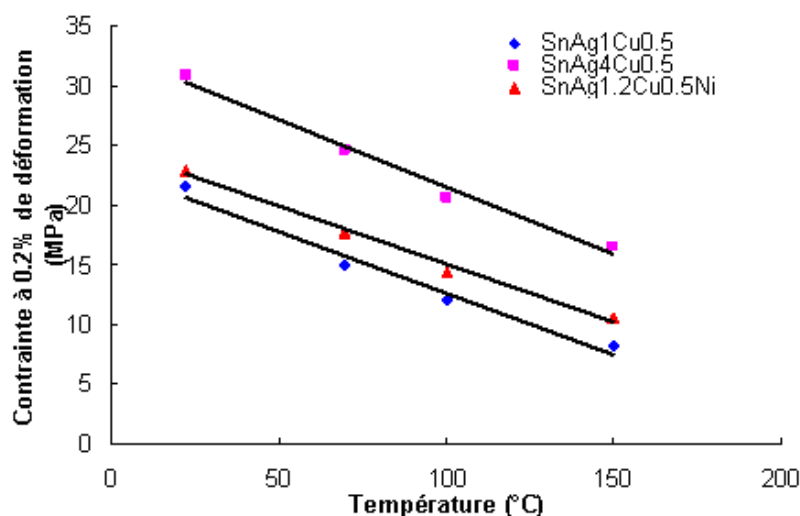


FIG. 3.10 – Limite conventionnelle à 0.2 % de déformation en fonction de la température pour 3 alliages

avec ce qui a été relevé dans l'étude bibliographique, par exemple avec *Tanaka et Al.* [22]. Cette dernière a également permis d'aboutir à la conclusion suivante : abaisser la quantité d'argent permet d'améliorer la fiabilité mécanique.

3.2 La technique de mesure par nanoindentation

La nanoindentation est une technique pour la caractérisation de propriétés matériaux comparable à un essai de micro-dureté. La différence réside dans les profondeurs atteintes par la pointe qui sont de l'ordre de la centaine de nanomètres. Ce changement d'échelle implique de prendre en compte des phénomènes particuliers comme la décohésion entre les grains d'un métal. Des variations de température de l'ordre de 0.1 °C influencent la mesure par la dilatation du matériau au point de nécessiter une correction appelée « thermal drift ». Dans la mesure où de nombreux matériaux en microélectronique sont présents sous forme de fines couches – de l'ordre du micromètre – la technique présentée ci-dessous est bien adaptée. Elle permet d'apporter des informations supplémentaires pour :

- Introduire des données matériaux spécifiques aux produits utilisés - en tenant compte du procédé de fabrication - dans le modèle numérique
- Discriminer plusieurs matériaux et, par exemple, tenter de comprendre comment la dureté d'une passivation peut influencer la tenue en fatigue de la structure d'un composant

3.2.1 Théorie de la nanoindentation

La nanoindentation est une technique qui permet de déterminer le module d'Young et la dureté d'un matériau. Le principal apport de cette technique repose sur le fait que de très petits volumes et de très faibles épaisseurs peuvent ainsi être caractérisés. Les sections

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

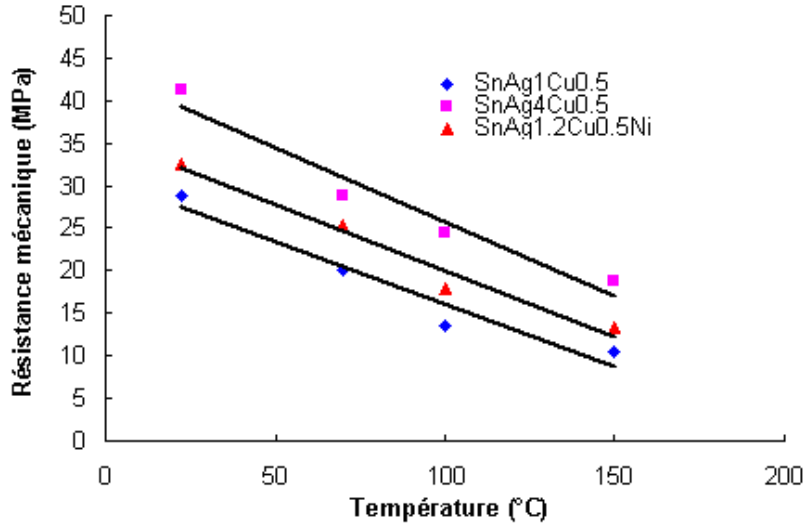


FIG. 3.11 – Résistance mécanique en fonction de la température pour 3 alliages

qui suivent ont pour objectif de présenter brièvement la théorie liée à cet essai ainsi que l'équipement sur lequel les tests ont été mis en place pour aider à l'interprétation des résultats.

3.2.1.1 Modèle d'Oliver & Pharr

L'interprétation de l'essai de nanoindentation tel que nous le connaissons actuellement repose sur le modèle mécanique développé par Oliver et Pharr (O&P) en 1992 puis revu en 2004 par les mêmes auteurs [24]. Ce dernier modèle reprend les travaux précédents sur la nanoindentation instrumentée et propose une analyse plus rigoureuse des courbes force-pénétration et une prise en compte précise des caractéristiques géométriques du contact entre l'indenteur et le matériau [53].

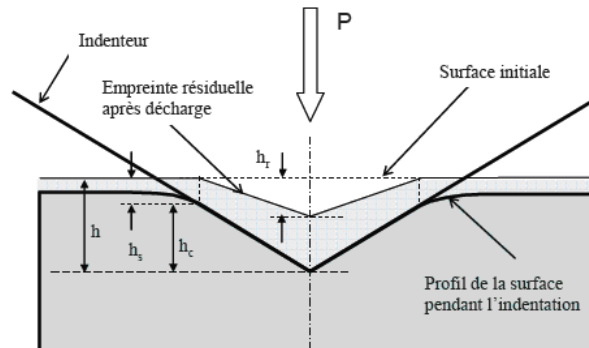


FIG. 3.12 – Description de la géométrie utilisée dans le modèle d'Oliver et Pharr [24]

La figure 3.12 présente la géométrie du contact vue en coupe ainsi que les dimensions

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

utilisées dans le modèle d'Oliver et Pharr. Les données brutes recueillies lors de l'essai sont le déplacement de l'indenteur h en fonction de la force appliquée P . La profondeur de l'empreinte résiduelle après décharge est notée h_r . Ces grandeurs se retrouvent sur la courbe force-pénétration présentée dans la figure 3.12. Lors des premiers travaux sur la nanoindentation [54], pour une charge maximale P_{max} , deux valeurs de pénétration pouvaient être choisies pour calculer l'aire de contact entre l'indenteur et la matière : le déplacement maximal de l'indenteur h_{max} ou la profondeur résiduelle h_r . Cependant ces deux grandeurs ne représentent pas en général la hauteur de contact réelle h_c . Pour un certain nombre de matériaux, la déformation élastique de l'échantillon sous l'indenteur est importante et fait que la hauteur de contact h_c est inférieure au déplacement vertical de l'indenteur h . A tout moment, h_c peut donc être définie comme :

$$h_c = h - h_s \quad (3.3)$$

h_s représente le déplacement vertical de la surface à la limite du contact. Si h est mesuré expérimentalement, toute la difficulté de l'analyse repose sur la détermination du déplacement élastique de la surface h_s pendant l'indentation. Une première solution fut proposée par Doerner et Nix [55] : constatant que sur certains matériaux, la première partie de la courbe de décharge est linéaire, comme dans le cas d'un poinçon plat, les auteurs déterminent la hauteur de contact h_c en extrapolant la portion linéaire pour une force nulle. Cette hauteur de contact représente une bien meilleure approximation que h_r ou h_{max} , mais repose sur l'hypothèse d'une décharge initialement linéaire. Oliver et Pharr proposent une relation similaire, pour déterminer h_s à partir de la force maximale appliquée P_{max} et de la raideur de contact S , mais comportant un facteur correctif ε . En reprenant les travaux de Sneddon [56] sur la déflexion élastique d'une surface sous un indenteur conique ou sphérique, ils aboutissent à la relation suivante :

$$h_s = \varepsilon \times \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

La forme des courbes de décharge observées par Oliver et Pharr sur de nombreux matériaux leur suggère que la meilleure approximation est obtenue avec $\varepsilon = 0.75$, valeur relative à l'indenteur sphérique. De nombreux travaux récents [57], [58] ont cependant mis en évidence que le calcul de la hauteur de contact à partir de ces équations ne s'applique en réalité qu'aux matériaux homogènes de forte élasticité (comme les polymères, les verres ou les oxydes). En effet, l'analyse proposée par O&P pose des problèmes fondamentaux sur les matériaux peu élastiques comme les métaux, où l'apparition d'un bourrelet [59] augmente considérablement l'aire de contact.

La seconde avancée notable apporte par les travaux d'O&P concerne la mesure de la raideur de contact. *Doerner et Nix* et *Loubet et al.* supposaient que l'aire de contact restait constante au début de la décharge, donnant une première partie de courbe linéaire comme dans le cas d'un poinçon plat. Oliver et Pharr font cependant remarquer que dans le cas de l'indentation avec un cône ou une pyramide, et pour la plupart des matériaux, l'aire de contact change continûment pendant la phase de décharge et que par conséquent la courbe de décharge ne possède pas de partie linéaire. La mesure de la pente initiale de décharge ne peut donc pas se faire précisément par régression linéaire. Leurs observations montrent

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

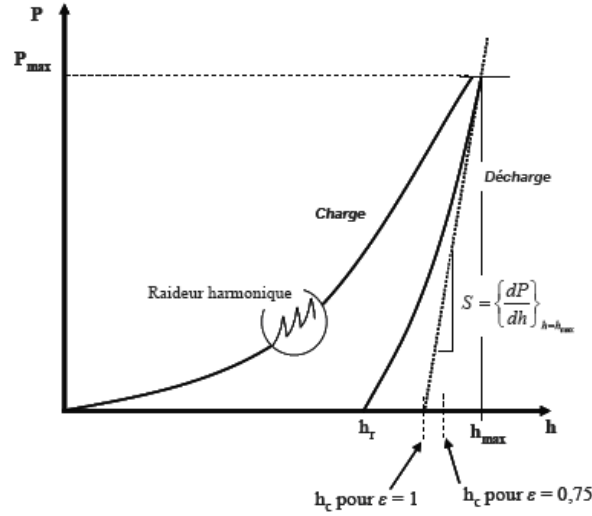


FIG. 3.13 – Courbe force-pénétration et grandeurs utilisées dans l'analyse mécanique O&P

que le calcul de S par simple régression linéaire est source d'erreur, car les valeurs obtenues dépendent grandement du nombre de points utilisés pour la régression. O&P démontrent que la courbe de décharge peut être plus avantageusement représentée par une loi de type puissance :

$$P = \alpha (h - h_r)^m \quad (3.5)$$

Le calcul de la raideur de contact S se fait alors en dérivant cette équation $h = h_{max}$:

$$P = \left\{ \frac{dP}{dh} \right\}_{h=h_{max}} = m\alpha (h_{max} - h_r)^{m-1} \quad (3.6)$$

Des essais d'indentation sur divers matériaux montrent que l'exposant m , pour une force maximale de 120 mN est compris entre 1.2 et 1.6, α varie de 0.02 mN/nm^m environ pour les métaux comme l'aluminium. Le calcul de S permet donc de déterminer la hauteur de contact h_c grâce à ces équations et l'aire de contact projetée connaissant la fonction d'aire de l'indenteur $A(h_c)$. La dureté est calculée selon la relation traditionnelle :

$$H = \frac{P_{max}}{A(H_r)} \quad (3.7)$$

H_r est la dureté calculée à partir de la profondeur de l'empreinte résiduelle après décharge. Le calcul du module élastique doit tenir compte de la déformation, même minime, de la pointe en diamant durant l'indentation. Un module effectif (ou module apparent) E_r est défini comme suit [60] :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1 - \nu^2)}{E} + \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} \quad (3.8)$$

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

Cette expression prend en compte le module d'Young E_i et le coefficient de Poisson ν_i de l'indenteur, E et ν étant les propriétés propres à l'échantillon. Le module E_r est obtenu à partir de la relation de Sneddon (1965) :

$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A(h_c)}} \quad (3.9)$$

β est un facteur de correction visant à tenir compte notamment du caractère non axisymétrique du contact lors de l'indentation avec des indenteurs pyramidaux de type Berkovich ou Vickers. La valeur de β reste une source de discussion, mais est généralement prise égale à 1.034 pour l'indenteur Berkovich.

3.2.1.2 Nanoindenteur MicroMaterial

Le principe de fonctionnement de l'appareil utilisé pour les mesures de nano-dureté exposées par la suite est schématisé figure 3.14. Cet appareil est équipé de trois modules :

- Un module pour la nanoindentation dont le principe est exposé dans la section précédente
- Un module de rayure
- Un module d'impact pour la tenue en fatigue des surfaces ou l'adhésion des couches minces

Seul le premier module est utilisé dans la présente étude, l'échantillon est déplacé dans le plan vertical tandis que la pointe en diamant se déplace uniquement selon une ligne horizontale. La détection est basée sur une mesure de capacité pour détecter des déplacements très faibles, des aimants placés en haut du pendule appliquent la charge. L'ensemble permet d'afficher en temps réel les variations de charge et de déplacement. On note également qu'un système de positionnement très précis permet de déplacer l'échantillon alternativement devant l'indenteur puis devant un microscope pour observer les empreintes obtenues.

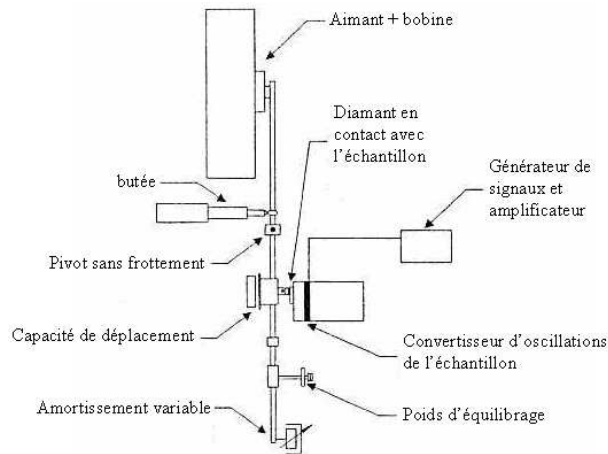


FIG. 3.14 – Schéma de principe du nanoindenteur Micro Materials Ltd (NanoTest) utilisé [25]

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

L'indenteur utilisé est de type Berkovitch car cette géométrie permet un contrôle plus précis du processus d'indentation. La géométrie Berkovitch correspond à une pyramide à trois faces orientée à 65.27° par rapport au plan de l'échantillon. La pression de contact est déterminée par une mesure de la profondeur plastique de la pénétration h_p telle que l'aire de contact projetée sur le plan de l'échantillon est donnée par l'équation :

$$A = 3\sqrt{3} \times h_p^2 \times \tan^2 \theta \quad (3.10)$$

Pour un angle $\theta = 65.27^\circ$, $A \approx 24.5 \times h_p^2$ ce qui permet de calculer la pression de contact - ou dureté H - ainsi :

$$H = \frac{P}{24.5 \times h_p^2} \quad (3.11)$$

L'usage est d'utiliser la pression de contact moyenne comme définition de la dureté en nanoindentation, aussi les pointes de type Berkovitch sont conçues pour présenter le même rapport « aire projetée sur profondeur d'indentation » qu'un indenteur Vickers, lorsque l'angle est de 65.27° .

3.2.1.3 Analyse des courbes de chargement [26]

L'objectif principal de la nanoindentation est de déterminer le module d'Young et la dureté d'un matériau. Comme cela a été précédemment indiqué, lorsque la pointe s'enfonce dans le matériau celle-ci génère une déformation composée d'une partie plastique et d'une partie élastique. Au moment du retrait de la pointe – de la décharge – le matériau garde une empreinte, une déformation résiduelle liée à la déformation plastique. La dureté est déterminée au maximum de profondeur de l'indent, à partir de la surface de l'empreinte. Comme la surface de l'empreinte ne peut pas être déterminée directement de façon précise, on utilise pour cela des relations géométriques ainsi qu'un étalonnage avec un matériau connu, typiquement de la silice fondue. Le module d'Young est déterminé lors du retrait de la pointe. En effet, le matériau se déforme de façon quasi-linéaire lors de la décharge comme cela est schématisé sur la figure 3.13. La connaissance du matériau de l'indenteur (une pointe en diamant) permet d'en déduire le module d'Young de l'échantillon test [26]. Les essais de nanoindentation montrent en fait plusieurs types de courbes en fonction du comportement de l'échantillon mesuré. Ces comportements se traduisent notamment sur les courbes de charge-décharge par des irrégularités.

Sur la figure 3.15 six modèles de comportements sont exposés :

- (a) Solide purement élastique
- (b) Silice fondue
- (c) Acier
- (d) Silicium cristallin, la pression induit un changement de phase caractérisé par un décrochement lors de la décharge
- (e) Saphir, le matériau fissure sous la pression ce qui explique l'augmentation de la profondeur à force constante à partir d'un certain niveau de chargement

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

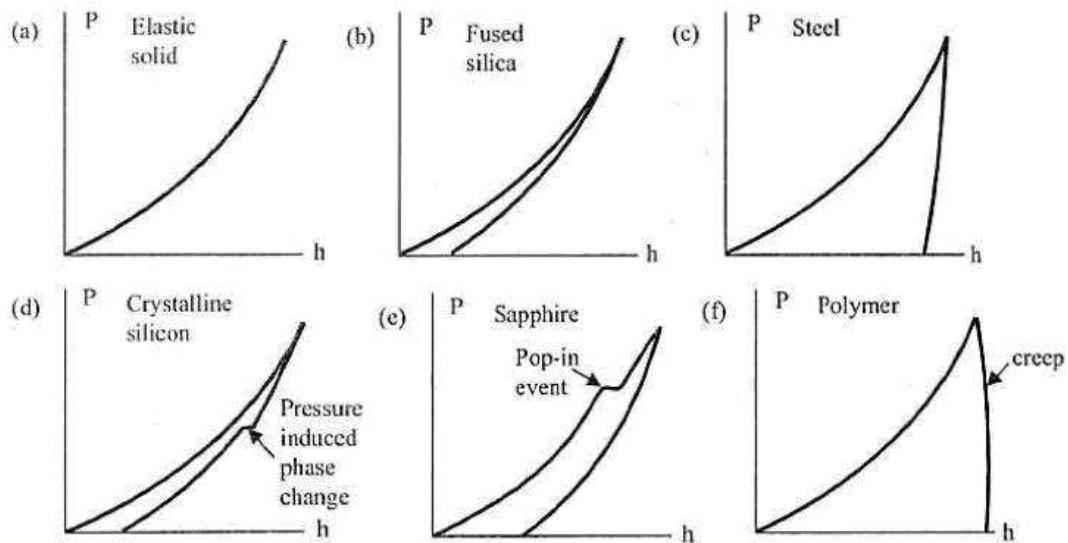


FIG. 3.15 – Exemples schématiques de courbes force-déplacement pour plusieurs propriétés et comportements de matériaux [26]

(f) Polymère, le fluage intervient tant au niveau de la charge que de la décharge

Sur les graphiques de la figure 3.15 le temps de maintien à la charge maximale n'est pas pris en compte, dans le cas contraire on aurait vu un plateau sur le schéma (f). L'effet dit de pop-in correspond à un soulèvement de la matière (décollement de l'échantillon du substrat) dans la zone mécaniquement affectée par la mesure.

La mesure d'une couche mince est très dépendante de la couche sur laquelle elle est déposée (substrat), ceci est d'autant plus vrai que le revêtement étudié est fin. Dans une première approximation on considère que l'échantillon et le substrat réagissent comme deux amortisseurs en série. Cependant, le champ des contraintes dans un matériau indenté ne correspondant pas à une simple compression verticale, il existe également des contributions de part et d'autre du point visé. Ceci fait que la contribution du revêtement est supérieure à ce qui est attendu, on considère donc que la règle qui consiste à indenter dans moins de 10 % d'un revêtement ne s'applique pas aussi simplement. Une méthode relativement rapide pour contourner cet obstacle consiste à tracer le module mesuré en fonction du rapport a/t , où t est l'épaisseur du revêtement et a le rayon de contact (cas d'un indenteur sphérique). Normalement le module d'Young E « réel » est atteint lorsque le rapport a/t tend vers zéro. Cette technique est très exigeante car de nombreux facteurs interviennent : la variation de la température ambiante au cours de l'essai, la profondeur pour la détection de surface ou encore la rugosité de l'échantillon. La préparation de l'échantillon même est problématique car pour obtenir un état de surface on a souvent recours au polissage, or celui-ci entraîne l'écrouissage de la surface. En revanche des développements permettent d'extraire un certain nombre d'informations autres que celles discutées ici, citons : les contraintes résiduelles dans un matériau, la détermination de propriétés visco-plastiques, l'adhérence d'un dépôt sur son substrat, la susceptibilité à la rupture fragile.

3.2.2 Propriétés des passivations

L'appareil de nanoindentation utilisé fonctionne sur le principe du pendule. Dans un premier temps cet appareil permet de caractériser les passivations qui isolent et protègent la puce. Dans le cas du test de chute, les analyses de défaillance montrent très fréquemment une fissure dans ce matériau. La caractérisation de ce matériau revêt une importance particulière, on s'attache donc à caractériser :

- Leur état de surface
- Les propriétés mécaniques d'une passivation planarisante ainsi que d'une passivation non-planarisante

3.2.2.1 Passivation USG

La passivation caractérisée ici est appelée USG (Undoped Silicate Glass) et est de type minérale.

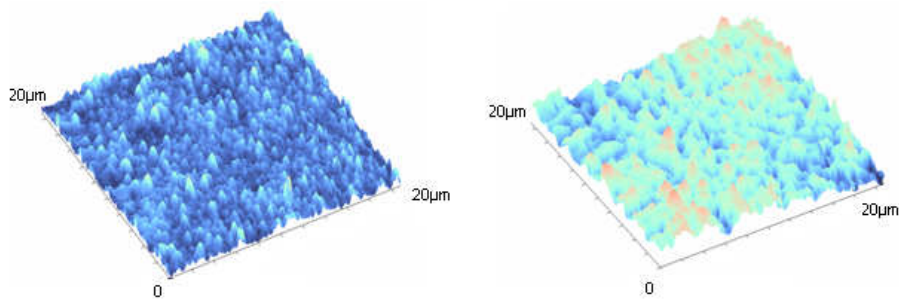


FIG. 3.16 – a) Etat de surface sur un WL-CSP de 5x5 billes avec un pas de 500 μm – b) Etat de surface sur une plaquette recouverte uniquement et totalement d'USG

Des plaquettes permettent d'observer la rugosité (*cf.* figure 3.16) lorsque le dépôt est total et uniquement constitué d'USG. Ce dernier a une épaisseur de 2 μm ce qui est supérieur au dépôt sur WL-CSP et facilitera la mesure. L'état de surface est meilleur car il n'y a pas de processus pour faire adhérer les billes ou découper les composants dans ce cas précis. Les mesures de nanoindentation présentées ensuite sont effectuées sur ces mêmes plaquettes. Récapitulatif des valeurs de rugosité :

- Passivation déposée sur composants = 24 nm
- Passivation déposée sur wafer = entre 2.2 nm et 2.4 nm
- Pour comparaison, sur couche d'adhésion = 250 nm

Ces mesures montrent un écart important entre la rugosité d'une couche déposée sur l'ensemble de la plaquette de silicium et son sa rugosité sur un composant. Cela s'explique notamment par l'emploi de procédés de gravure. D'autre la mesure sur couche d'adhésion permet de donner un ordre de grandeur de la rugosité du composé intermétallique à forme dendritique qui croît lors de la fusion de la bille sur la couche d'adhésion.

Mesures sur USG

Mesures sur la passivation USG d'une épaisseur de 2 μm . Des essais à plusieurs profondeurs avec une pointe Berkovitch permettent de déterminer l'influence de la profondeur.

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

Pour respecter la règle empirique des 10 % il ne faudrait pas indenter au-delà de 200 nm toutefois, en-dessous de cette valeur le signal est très perturbé. Valeurs relevées sur des matrices d'indentations de 6x6 :

- A 150 nm $E_r = 89 \pm 13$ GPa
- A 200 nm $E_r = 94 \pm 8$ GPa
- A 400 nm $E_r = 105 \pm 6$ GPa
- A 600 nm $E_r = 123 \pm 7$ GPa

Plus l'indentation est profonde et plus l'influence de la couche de silicium en-dessous est importante. Ces mesures permettent de cadrer la rigidité de l'USG entre 86 et 102 GPa.

3.2.2.2 Passivations organiques

Le BCB et le PBO sont deux passivations organiques, contrairement aux passivations à base de silice que sont l'USG et le PSG. Elles sont utilisées en général comme diélectriques sur du cuivre, leur propriété étant d'aplanir le « relief » sur lequel elles sont déposées. Les paramètres de mesure sont les suivants :

- Pointe Berkovitch
- Force maximale = 5 mN
- Vitesse = 0.1 mN/s
- Durée de maintien = 30 s
- Dérive thermique = 60 s
- Nombre d'indentations : matrice de 10x10 avec indents espacés de 30 μm

Deux types de BCB sont étudiés :

- Un 1er dont le recuit - à 210 °C - est tel que le taux de polymérisation est de 85 %
- Un 2me dont le recuit - à 250 °C - est tel que le taux de polymérisation est de 100 %

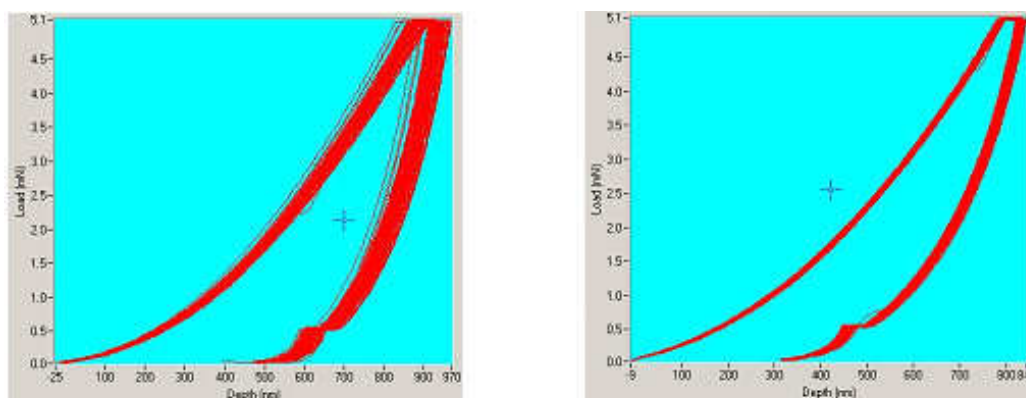


FIG. 3.17 – A gauche mesures sur BCB polymérisé à 85 % - A droite sur BCB polymérisé à 100 % - En abscisses la profondeur d'indentation (nm) et en ordonnées la force (en mN)

Sur la figure 3.17 des profondeurs négatives sont affichées car la profondeur 0 est définie à un autre endroit de l'échantillon, un décalage peut apparaître si le niveau à l'endroit de la mesure est différent. De plus la pointe du nanoindenteur est susceptible de glisser ce qui peut provoquer des irrégularités au début de la mesure, ceci n'influençant pas significativement sur la dureté et le module calculés par la suite. Les mesures du polymère à 85 % sont

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

plus dispersées que celles de celui à 100 %. Ceci pourrait s'expliquer par une meilleure homogénéité de la passivation complètement polymérisée. Sur la figure 3.18 on observe le résultat des indentations sur une passivation proche des deux BCB étudiés.

Valeurs des modules mesurés :

- Pour le BCB polymérisé à 85 % Er = 6.7 ± 0.2 GPa ($E_f^2 = 2.9$ GPa)
- Pour le BCB polymérisé à 100 % Er = 6.63 ± 0.06 GPa ($E_f = 2.5$ GPa)
- Pour le PBO Er = 7.5 ± 0.3 GPa ($E_f = 2.1$ GPa)

On constate que plus le matériau est polymérisé et plus les hystérésis sont répétables. Ce phénomène s'explique probablement par une meilleure homogénéité des matériaux totalement polymérisés. Pour compléter les observations, il est préférable d'observer les empreintes.

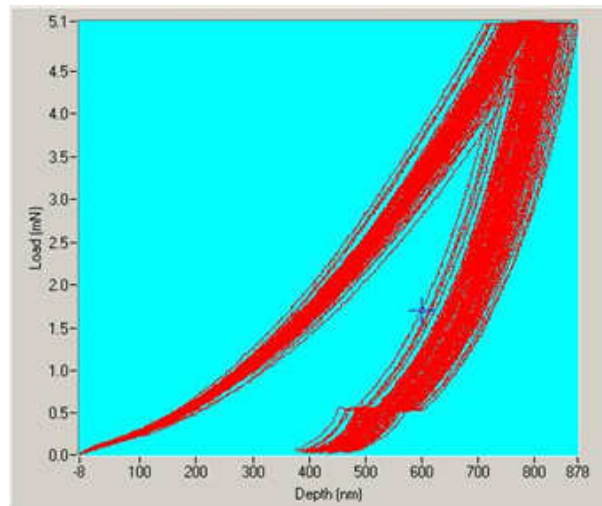


FIG. 3.18 – Nanoindentation sur passivation PBO

La figure 3.19 présente un agrandissement progressif sur la zone indentée. L'image ne permet pas de discerner correctement le fond de l'empreinte – en raison de la profondeur de champ – ce qui empêche de détecter un phénomène de collage. Toutefois, la rectitude des arêtes montre qu'il n'y a pas eu de phénomène de bourrelet (pile-up) ou d'effondrement (sink-in).

3.2.3 Propriétés des métallisations

Les métallisations en aluminium revêtent une grande importance car il s'agit d'un lieu de rupture fréquemment observé lors des essais de fiabilité. Les matériaux étudiés dans cette partie sont particuliers car ils sont d'une pureté très élevée : 99.99 %, ce qui fait que leurs propriétés sont différentes de celles des métaux habituellement présents dans les abaques. Du fait de cette pureté élevée l'aluminium a des caractéristiques mécaniques particulièrement basses, probablement à l'origine des difficultés de mesures rencontrées. On souligne également que ce type de métal déposé par pulvérisation (sputtering) a été très

² $E_f = E_{fournisseur}$

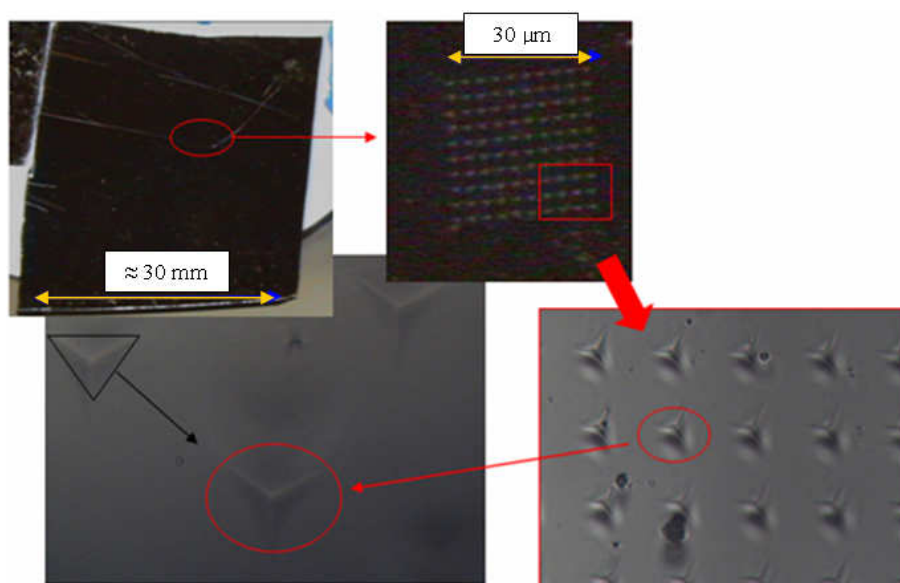


FIG. 3.19 – Observation des empreintes sur BCB

peu publié dans les journaux scientifiques.

3.2.3.1 Aluminium pur et Al-Cu sur plaquette

Les alliages en aluminium et en aluminium-cuivre avec des épaisseurs de $3\text{ }\mu\text{m}$ sont déposés et recuits à plusieurs températures sur des plaquettes de silicium sans motif particulier (pleine plaque). Le recuit comme le procédé de déposition dure environ 1/4 d'heure dans les conditions industrielles, toutefois ceux-ci ont un effet important sur l'état de surface, la taille des grains et la texture métallurgique. Le recuit est effectué à $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ sous atmosphère N_2H_2 . Les états de surface sont observés en annexe 4. Il apparaît clairement que dans le cas de l'aluminium une température de déposition plus élevée permet de diminuer significativement la présence des monticules et de modifier à la fois l'aspect de surface et la taille des grains. Dans tous les cas l'épaisseur est précisée car il a été démontré que celle-ci a un impact significatif sur le bilan thermique et donc sur le résultat final du dépôt. Les conditions de dépôt par pulvérisation sont :

- Puissance de 12 kW
- Pression dans l'enceinte de 3 Torr
- Atmosphère sous argon (Ar)

La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 3.4. L'aluminium-cuivre déposé à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ et recuit à $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ présente un état de surface très irrégulier provoquant une forte dispersion de la mesure. Aussi, une seule série de mesures à 2 mN a été effectuée.

L'augmentation du module avec la force appliquée correspond à une influence croissante des couches présentes sous celle qui est indentée. C'est pour diminuer cette influence et respecter au mieux la règle des 10 % exposée précédemment que nous ne retiendrons que les valeurs à 1mN dans la cadre de la simulation numérique. On constate que l'Al-Cu déposé à $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ et recuit à $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ présente un module et une dureté supérieurs à ceux des autres

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

Cas	Force (mN)	Vitesse en 10^{-2} mN/s	Er (GPa)	Ecart- type de Er	Dureté (GPa)	Ecart- type
AlCu350/450+bilan thermique	1	5	63.3	6.5	0.319	0.045
AlCu350/450+bilan thermique	2	10	103.3	14.4	0.0599	0.096
AlCu350/450+bilan thermique	3	15	109.5	12.4	0.51	0.08
AlCu350/450	1	5	59.8	7.8	0.29	0.06
AlCu350/450	2	10	80.4	9.8	0.41	0.06
AlCu350/450	3	15	93.5	7.5	0.46	0.05
Al480/450	1	5	51.8	6.8	0.189	0.03
Al480/450	2	10	83.6	8.5	0.29	0.03
Al480/450	3	15	116.9	11.4	0.42	0.04
AlCu480/450	1	5	135.6	36.6	9.15	3.73
AlCu480/450	2	10	149.5	39.7	7.9	4
AlCu480/450	3	15	243.4	52.7	11.7	3.9

TAB. 3.4 – Synthèse des essais pour déterminer l'influence des températures de déposition et de recuit

métallisations. Ce phénomène est clairement visible via les courbes de charge/décharge (hystérésis) présentées sur la figure 3.20.

L'oxyde entre l'aluminium (ou la passivation) et le silicium peut être de deux sortes et produire des résultats significativement différents comme le montre la figure 3.21. On peut distinguer deux types d'oxydes :

- Oxyde thermique comme ceux déposés sur les chaînes électriques
- Oxyde PECVD comme ceux déposés sur toute la surface des plaquettes préparées pour ces mesures (à l'exception d'une qui est indiquée)

L'oxyde thermique croît sur la plaquette tandis que l'oxyde PECVD est directement déposé. En conséquence, ces deux produits diffèrent par leur qualité – et donc leur densité – ainsi que par leurs épaisseurs. A noter également que le premier est utilisé en production alors que le 2ème est utilisé dans le cadre de la R& D pour les mesures présentées ici. L'oxyde peut avoir une influence thermique au cours du dépôt et une influence liée à sa raideur au cours de l'essai.

De manière générale, les sources d'erreurs liées à la mesure sont dues notamment à :

- La rugosité / à l'état de surface de l'échantillon
- Au collage
- Au protocole d'essai (écartement des indents, profondeur d'indentation, etc.)

Parmi les sources d'erreurs liées au matériau on cite :

- L'orientation cristalline
- La variabilité des lots (plusieurs plaquettes dans un lot en production)
- La taille des grains et la texture

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

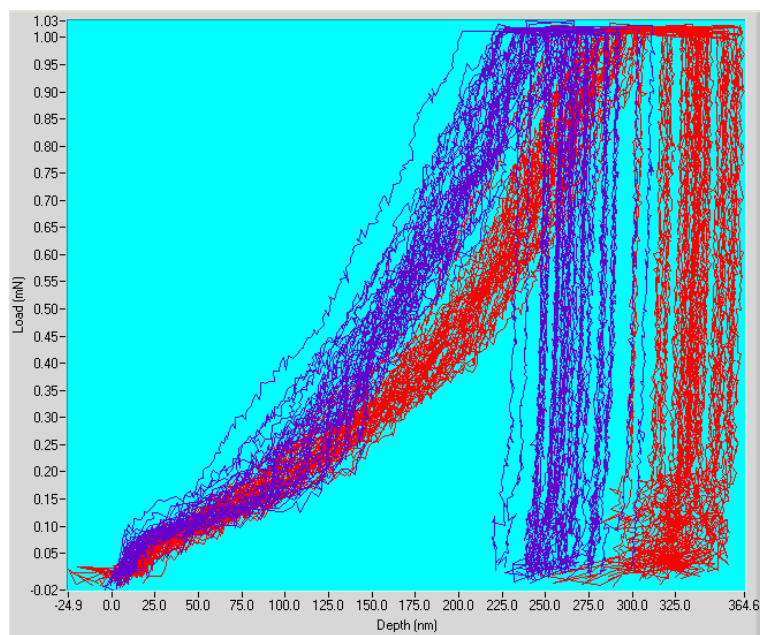


FIG. 3.20 – Comparaison de 2 séries de charge-décharge sur l'alliage Al-Cu déposé à 450 °C (en bleu) et celui déposé à 350 °C et recuit à 480 °C (en rouge)

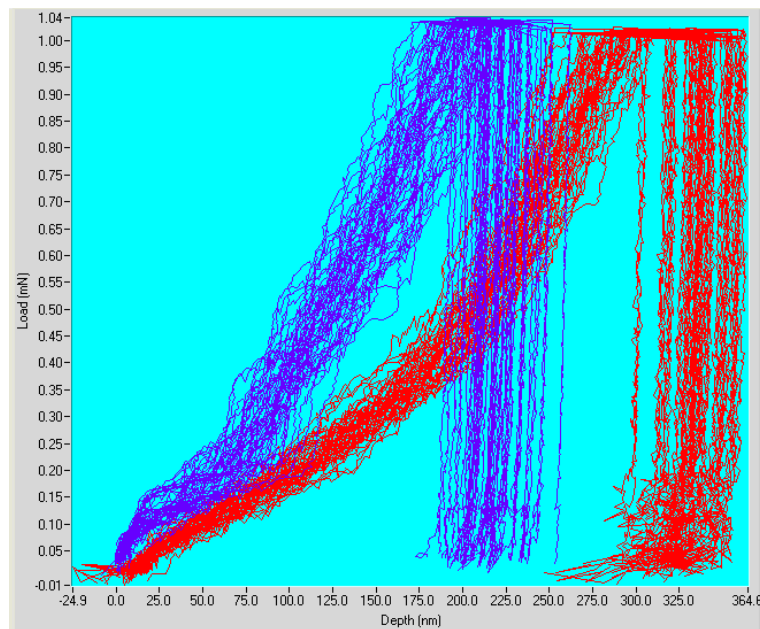


FIG. 3.21 – Comparaison d'un alliage AlCu déposé à 480 °C puis recuit à 450 °C, sur oxyde thermique en bleu et sur oxyde PECVD en rouge

- La présence possible d' Al_2O_3 sur quelques nanomètres ($E_{\text{Alumine}} = 300 \text{ GPa}$)

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

Les métallisations en aluminium pur déposées vers 200 °C présentent beaucoup de monticules (visibles en Annexe 4) qui peuvent poser des problèmes lors de leur croissance (par exemple détruire des pistes). Les traitements thermiques et les conditions de dépôt modifient significativement la texture et la taille des grains pour les alliages en Al-Cu. Globalement, plus le bilan thermique (*i.e.* la température de dépôt et de recuit sont élevées et maintenues longtemps) et plus la dureté du métal est élevée. Ces observations sur l'état de surface sont importantes car l'étude du phénomène de fatigue mécanique a montré que les fissures – notamment en fatigue plastique – s'amorcent préférentiellement à la surface du matériau, sur des hétérogénéités. D'autre part, l'oxyde sur lequel la métallisation est déposée semble jouer un rôle notable sur les propriétés mécaniques finales de cette dernière. De nombreux paramètres du procédé de dépôt n'ont pas pu être pris en compte : dépôt en environnement humide ou sec, puissance électrique de pulvérisation etc. La partie suivante présente donc des mesures effectuées directement sur des boîtiers pour tenter d'évaluer les propriétés « finales » des pistes électriques.

3.2.3.2 Métallisations sur composants

Les mesures des métallisations directement sur les composants ont l'avantage de tenir compte de toutes les étapes et plus particulièrement de tous les cycles thermiques du composant. Le retrait des couches est effectué par le Laboratoire d'Analyses Technologiques (LAT) de STMicroelectronics selon une méthode standard détaillée en Annexe 3. On mesure le composé Al-Cu sur un composant WL-CSP nommé « Produit 1 ». L'indentation est effectuée sur les pistes (épaisseur de 3 μm) et la passivation est retirée par plasma, ce qui évite un écrouissage de la surface. Les paramètres de mesures sont les suivants :

- Pointe Berkovitch
- Force maximale = 1 mN
- Vitesse = 0.08 mN/s
- Période de maintien = 120 s
- Dérive thermique = 60 s

Nombre d'indentations : matrice de 3x20 avec indents espacés de 10 μm .

Les faibles profondeurs et l'état de surface peuvent expliquer l'hétérogénéité de ces courbes. Par ailleurs on constate une dérive importante lors de la période de maintien : 100 nm sur 350 nm d'indentation (soit près de 30 %) ce qui caractérise un comportement particulier.

La figure 3.23 et la figure 3.24 montrent des arêtes qui sont – pour la plupart – droites ce qui indique qu'il n'y a pas eu de phénomène indésirable. La reconstitution 3D confirme également l'état de surface irrégulier et souligne le motif laissé par les joins de grains. La valeur retenue après tri des données - 51 indentations - est la suivante : $E_r = 57 \pm 8 \text{ GPa}$. On produit les mêmes mesures sur trois autres composants, les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.5 (les notations de la partie précédente sont conservées).

La mesure sur chaînes électriques est compliquée car les pistes d'aluminium sont étroites et proches de la structure des couches d'adhésion, billes, etc. La difficulté de localiser les zones indentées ainsi que la réussite (ou non) du procédé de retrait de la passivation peuvent expliquer les mêmes résultats pour les mesures « Aluminium pur techno C » et « Passivation techno C ». De manière générale on constate que les mesures d'Al-Cu sur

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

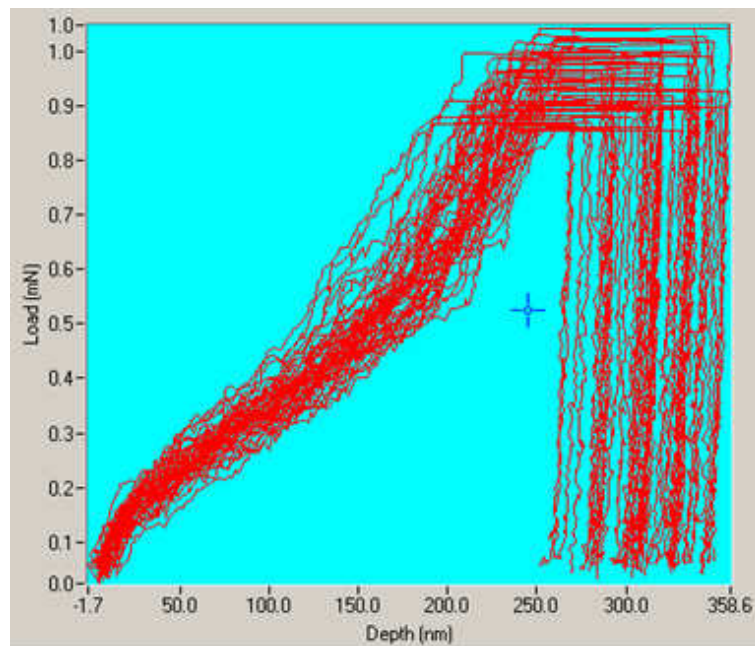


FIG. 3.22 – Courbes d'hystérésis pour l'Al-Cu

chaînes électriques donnent des valeurs environ 2 fois inférieures aux mesures précédentes sur plaquettes. Les écart-types constatés sur chaînes électriques sont également en moyenne environ 2 fois supérieurs aux écart-types constatés sur plaquettes.

3.2.3.3 Conclusion des mesures sur métallisations

La caractérisation mécanique des métallisations en électronique est fondamentale car de nombreuses fissures apparaissent, même sans sollicitation particulière. En effet, les contraintes résiduelles ont des valeurs élevées, elles provoquent la courbure de la plaquette et peuvent générer des fissures tant au niveau diffusion qu'au niveau finition. Les essais de nanoindentation ainsi que les observations sur les alliages d'aluminium ont permis d'établir les conclusions suivantes :



FIG. 3.23 – Observation des indentations sur Al-Cu - a) Vue générale - b) Agrandissement

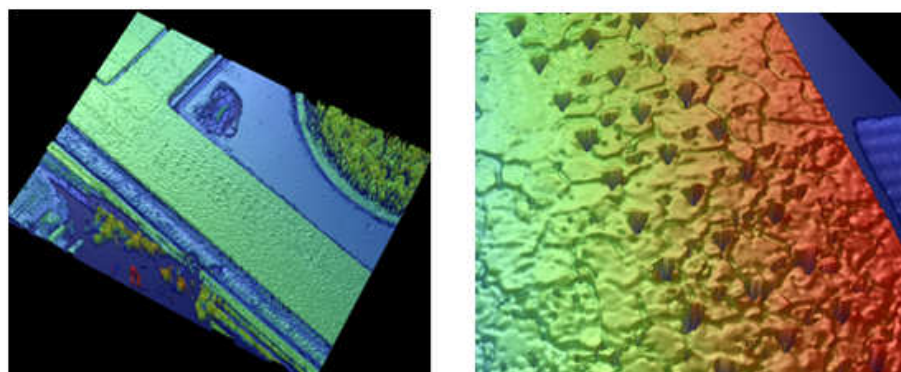


FIG. 3.24 – Reconstitution 3D des empreintes d'indentations sur Al-Cu - a) Vue générale
- b) Agrandissement

Cas	Force (mN))	Er (GPa)	Ecart-type	Dureté (GPa)	Ecart-type
AlCu Produit 1	2	26.4	8.5	1.47	0.8
AlCu Produit 2	2	50	15.3	1.01	0.46
Aluminium pur de la techno C	2	195.4	24.5	12.8	2.5

TAB. 3.5 – Propriétés des métallisations mesurées sur les composants

- Les conditions de dépôts influencent notablement la matière au niveau de la taille des grains, des excroissances et de la dureté
- L'influence des couches sur et sous la métallisation - oxyde de silicium, autres couches dans le cas d'un produit - doit impérativement être prise en compte

Un déplacement important de la pointe est observé au cours de ces mesures. On peut supposer qu'il s'agit de fluage, on pourrait d'essayer de caractériser ces matériaux avec un indenteur de forme sphérique pour étudier ce phénomène. D'autre part, une étude plus poussée complétée par de la simulation numérique (via la méthode dite « méthode inverse ») pourrait permettre de remonter au comportement plastique de ces alliages.

3.2.4 Mesures sur les composés intermétalliques

Les composés intermétalliques (IMC) sont obtenus par un essai accéléré appelé « électromigration ». Cet essai consiste à observer la migration de matière lorsque le composant est soumis à un courant électrique. Le transport des électrons génère un mouvement de matière là où les fortes densités de courant sont localisées, ce qui crée dans l'interconnexion des vides par endroits et une accumulation de matière à d'autres endroits. Ce principe est exploité pour accroître la quantité d'IMC dans les échantillons testés ci-dessous. Compte-tenu du caractère rugueux de ce composé, on indente de profil (*cf.* figure 3.25). Le polissage a pour conséquence d'écrouir la surface mais de cette façon la profondeur de l'échantillon est de plusieurs dizaines de microns (pour obtenir une courbe de charge/décharge de meilleure qualité).

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

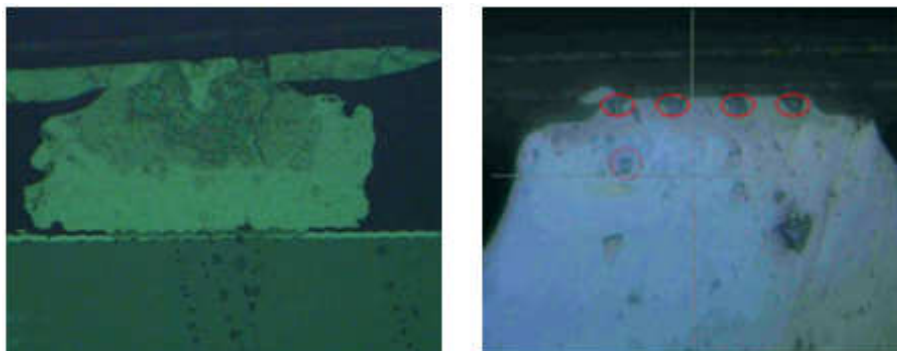


FIG. 3.25 – a) Bille avec IMC après électromigration – b) Bille indentée avec 4 zones de multi-chargement (encerclée de rouge)

Comme la surface est faible mais l'épaisseur de l'échantillon est relativement grande, on indente en multi-chargement. Ceci consiste à charger puis décharger dans la même empreinte avec une force croissante. Dans ce cas on choisit de faire 8 cycles entre 100 nm et 1100 nm.

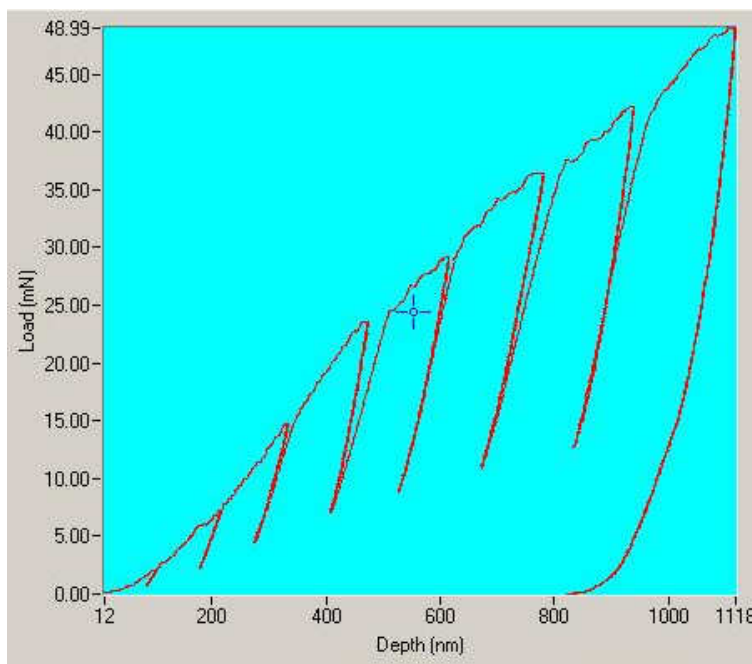


FIG. 3.26 – Cycle d'hystérésis en multi-chargement sur IMC

Une seule des 4 hystérésis (*cf.* figure 3.26) est exploitable. Celle-ci donne le résultat suivant : $Er = 117 \pm 41 \text{ GPa}$

Un essai en mono-chargement est effectué à faible profondeur – 300 nm – de façon à confirmer ce résultat, celui-ci donne une valeur de 92 GPa, ce qui est dans la gamme d'incertitude précédente. De manière générale les mesures sur ce type de composé sont

3.2. LA TECHNIQUE DE MESURE PAR NANOINDENTATION

moins précises que celles sur les passivations en raison de l'état de surface et de la plus faible surface disponible (moins d'essais par échantillon). Pour compléter ces mesures on reproduit dans le tableau 3.6 la synthèse de *Limaye et Al.* [61] :

IMC/Métal	E (GPa)	CTE (ppm/K)	Source
Cu ₆ Sn ₅	85.56	16.3	a)
(CuNi) ₆ Sn ₅	161.4		b)
Cu ₆ Sn ₅	134		c)
Cu ₆ Sn ₅	102		e)
Cu ₆ Sn ₅	93		f)
Cu ₃ Sn	108	19	a)
(CuNi) ₃ Sn	131.7		b)
Cu ₃ Sn	150		c)
Cu ₃ Sn	104		d)
Cu ₃ Sn	160		e)
Cu ₃ Sn			f)
Ni ₃ Sn ₄	133	13.7	a)
Ni ₃ Sn ₄	139.3		b)
Ni ₃ Sn ₄		15.5	g)
Ni	206	13.4	h)
Co	211	13	h)
CoSn ₂	35 ±5	20	i)
Cu	117	19	

TAB. 3.6 – Synthèse des propriétés de composés intermétalliques présentée par *Limaye et Al.*

Correspondance des sources avec le tableau 3.6 :

- a) R.J. Fields *et Al.* – *Physical and mechanical properties of intermettalllic compounds commonmy found in solder joints* – Available online : <http://www.metallurgy.nist.gov>
- b) K. Mohankumar *et Al.* – *Nanoindentation study of Pb-free solders in fine pitch interconnects* – Proceedings of the 6th Electronics and Packaging Conference, pp. 483-489
- c) R.R. Chromik *et Al.* – *Nanoindentation measurements on Cu-Sn and Ag-Sn intermetallics formed in Pb-free solder joints* – Journal of Materials Research, Vol. 18, n°9, pp. 225-2261, Sept. 2003
- d) L.M. Ostrovskaya *et Al.* – Soviet Journal of Non-Ferrous Mettallurgy, Vol. 26, n°90, 1985
- e) R. Cabrat *et Al.* – *The elastic properties of metallic alloys* – Journal institute of Metals, Vol. 75, n°391, 1949
- f) G. ghosh – *Elastic properties, hardness, and indentation fracture toughness of intermetallics relevant to electronics packaging* – Journal of Materials Research, Vol. 19, n°5, mai 2004
- g) N. Jiang *et Al.* – *Thermal expansions of several Sn-based intermetallics* – Scripta Materiala, Vol. 37, n°12, pp. 1851-1854, 1997

3.3. RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES OBTENUES PAR CARACTÉRISATION

- h) P. Ratchev *et Al.* – *Nanohardness study of CoSn2 intermetallic layers formed between CO UBM and Sn flip-chip solder joints* – Proceedings of the 6th Electronics Packaging technologies Conference, pp. 339-342

- i) Non précisé dans l'article

On constate que les mesures sur Cu_6Sn_5 et Cu_3Sn – les principaux composés rencontrés ici – sont dispersées, ce qui souligne la difficulté à les caractériser. Toutefois les valeurs obtenues précédemment suite à la croissance des composés par électromigration sont (pour la plupart) compris dans le domaine défini par $E_r = 117 \pm 41$ GPa ce qui est cohérent par rapport aux résultats fournis dans la littérature (*cf.* tableau 3.6).

3.3 Résumé des propriétés mécaniques obtenues par caractérisation

Les données qui seront incorporées dans le modèle numérique dépendent à la fois des phénomènes physiques mis en jeu (*cf.* Chapitre 2) et des contraintes informatiques. Cette partie résume les informations obtenues par les mesures, par la recherche d'informations et propose des perspectives concernant la caractérisation de certains matériaux. Le circuit imprimé a été caractérisé en flexion 3-points sur DMA. Pour des raisons pratiques chaque circuit imprimé a été divisé en six zones comme présenté dans l'annexe 1. Son module élastique et son module de perte (amortissement) ont ainsi été mesurés en flexion. Le domaine d'étude s'étend de 1 Hz jusqu'à 100 Hz, une extrapolation *via* l'équivalent temps / température a été également faite dans la mesure où le domaine apparaissait linéaire. Les résultats montrent que dans le domaine fréquentiel étudié le module d'Young d'une portion de circuit imprimé varie très peu. Il existe plusieurs types de conception, par exemple la répartition des pistes de cuivre varie selon que le circuit imprimé soit dédié au test de chute ou soit utilisé pour d'autres tests. Cette hétérogénéité a ainsi été quantifiée ce qui pourra permettre d'évaluer l'influence de ce paramètre par la suite. On a également quantifié l'hétérogénéité liée au pas entre les plots de cuivre (selon que cette distance soit de 400 μm ou de 500 μm). D'autre part des mesures de fatigue ont été effectuées, elles ne sont pas présentées dans ce mémoire mais montrent clairement qu'il existe des conditions pour lesquelles le module d'Young d'un circuit imprimé diminue à mesure que le nombre de cycles augmente. Cependant il semble difficile d'établir un lien entre les conditions DMA (flexion 3-points) et les conditions du test de chute. Une perspective pourrait être de comparer précisément ces conditions avec les conditions de vibration du PCB lors du test de chute car, si l'influence de ce phénomène³ est significative, celui-ci devrait être prise en compte dans le modèle de fatigue. L'appareil DMA a également été utilisé pour mesurer plusieurs caractéristiques des alliages de brasures à base d'étain. Les éprouvettes ont été conçues en forme d'haltères par refusion des billes utilisées pour le billage des plaquettes (*cf.* Chapitre 1). Des mesures à faibles vitesses de déformation – de l'ordre de 10^{-5} s^{-1} – ont servi pour déterminer le comportement élasto-plastique de 3 alliages. Celles-ci montrent que les alliages $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ et $\text{SnAg}_{1.2}\text{Cu}_{0.5}\text{Ni}500_{ppm}$ ont des comportements très proches. De plus, les résistances mécaniques et limites élastiques de ces alliages sont significativement inférieures à celles de l'alliage $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$. Des mesures dynamiques ont été également conduites. Bien qu'il ne

³Phénomène de fatigue du circuit imprimé au cours du test de chute

3.3. RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES OBTENUES PAR CARACTÉRISATION

semble pas évident de relier les valeurs obtenues en taux de déformation à différentes fréquences avec des vitesses de déformation, on peut voir que le module d'Young ne varie pas significativement dans le domaine étudié. D'autre part les références citées montrent une influence claire de la vitesse de déformation sur la résistance mécanique de ces alliages, la technique de mesure par DMA n'a pas permis de mesurer cette influence dans le cas des alliages fabriqués. Le plus souvent les auteurs sur ce sujet déterminent les paramètres du modèle d'Anand, fréquemment utilisé pour la simulation du test de cyclage thermique (TCT). Des mesures à fortes vitesses de déformation requièrent un équipement spécifique, il semble donc utile de déterminer préalablement l'ordre de grandeur de la vitesse de déformation réelle des billes des WL-CSP avant d'effectuer cette caractérisation. Cette grandeur semble difficile à obtenir car les contraintes sont très localisées. La nanoindentation est une technique comparable à celle de micro-dureté, mais les profondeurs atteintes par l'indenteur sont inférieures. Les mesures sur différentes passivations sont réalisables, l'état de surface et les courbes de charge-décharge donnent une bonne confiance dans les résultats. Les échantillons se présentaient sous forme de plaquettes ou de composants WL-CSP. On a ainsi pu déterminer la différence de module d'Young entre une passivation de type « verre » (minéral) comme l'USG et une passivation de type « organique » comme le BCB. Les deux types de passivations correspondent à des technologies de composants différents, il ne semble donc pas pertinent de les comparer. Les mesures sur plaquettes permettent d'avoir plus de points de mesure car, sur le composant, les plots de connexion prennent beaucoup de place et les couches déposées sont généralement moins épaisses. Les modules d'Young de ces constituants sont identifiés et les résultats montrent que la température lors du dépôt influence l'homogénéité des dépôts organiques.

La technique de nanoindentation a été utilisée pour investiguer les propriétés des métallisations en aluminium et aluminium-cuivre. Plusieurs difficultés ont été rencontrées :

- Certains alliages d'aluminium ont un mauvais état de surface (des monticules ou « hillocks » sont présents en surface)
- La pointe s'enfonce beaucoup lors du temps de maintien
- La taille des grains est du même ordre de grandeur que la taille des empreintes

Le fait que la pointe s'enfonce durant le temps de maintien pourrait venir de sa forme. En effet l'indenteur utilisé est de type Berkovitch et un phénomène de bourrelet est apparu, une pointe sphérique pourrait peut-être améliorer la courbe de chargement. Cela peut également être attribué à un comportement en fluage de l'aluminium. Du fait des trois points cités on ne peut pas établir avec confiance une valeur de module d'Young pour ces alliages. On ne peut pas non plus utiliser la méthode inverse pour retrouver leurs propriétés plastiques. Cependant un certain nombre de paramètres influençant les propriétés mécaniques des métallisations ont été trouvés (températures de dépôt, de recuit, type d'oxyde, etc.) et les alliages ont pu être comparés qualitativement (par exemple : l'aluminium-cuivre est plus dur que l'aluminium pur). En conséquence les propriétés trouvées dans les journaux scientifiques seront utilisées pour modéliser cet alliage. Le module d'Young des composés intermétalliques a été évalué avec la même technique. L'état de l'art montre une forte dispersion des résultats en fonction des sources d'information. Les échantillons utilisés ici sont issus d'essais accélérés d'électromigration ce qui permet d'avoir une quantité suffisante de ces composés pour indenter. L'incertitude est grande sur la valeur du module d'Young mais l'écart-type encadre les valeurs relevées précédemment.

Quatrième partie

Simulation numérique

Chapitre 4

Simulation numérique

4.1 Simulation numérique

En mécanique des solides, la méthode des éléments finis est une méthode approchée par laquelle on recherche les champs de déplacements ainsi que les champs de contraintes. Les connaissances nécessaires pour une simulation sont :

- Le comportement des matériaux mis en jeux
- Leurs géométries
- Une analyse de son environnement : caractère mono- ou multi-physique de la sollicitation, impact du procédé de fabrication, etc.

En mécanique cette méthode peut être utilisée dans de nombreux domaines tels que la mise en forme (par emboutissage, extrusion, etc.), le crash, le forgeage et l'usinage. De ce fait, les applications sont également nombreuses : génie civil (dimensionnement de ponts), aéronautique, électronique, etc. Parmi les logiciels existant actuellement, certains sont généralistes comme Ansys, Abaqus, Nastran et Samcef. D'autres sont spécialisés, dédiés, citons Radioss pour le crash, Pamstamp pour la mise en forme et Fluent pour les problèmes de mécanique des fluides. Enfin, il existe des logiciels non-commerciaux (libres) tels que Castem 2000 au CEA ou ASTER à EDF [62].

Dans le cas présent, Ansys est utilisé. Ce logiciel est composé d'une partie appelé « pre-processor » qui permet la mise en données :

- Spécification des modèles matériaux (isotrope ou non, module d'Young, etc.)
- Maillage pour la discrétisation spatiale
- Définitions des conditions aux limites (axes ou plans de symétries) et de chargement

Ensuite vient l'étape de calcul elle-même qui consiste à résoudre les équations de la mécanique en tenant compte de tous les éléments cités précédemment. La méthode utilisée peut-être différente selon le type de problème (2D ou 3D) mais aussi selon le nombre de degrés de liberté, pour utiliser au mieux les ressources informatiques. La troisième étape appelée « post-traitement » ou « post-processing » consiste à exploiter les résultats du calcul pour relever différentes grandeurs telles que les déplacements, contraintes, etc. aux endroits souhaités.

4.1.1 Discussion sur les choix de modélisation *a priori*

Cette partie présente l'ensemble des phénomènes qui peuvent être pris en compte dans le cas de la simulation numérique des essais de chute et de flexion d'un point de vue mécanique. Les hypothèses sur ces phénomènes peuvent être effectuées pour 3 raisons principales :

- Parce que l'hypothèse n'impacte pas la prévision du résultat de façon significative mais permet de gagner un temps de résolution important
- Parce que les capacités informatiques ne le permettent pas
- Car les propriétés ne sont pas ou ne peuvent pas être connues

Les deux sous-parties qui suivent présentent les lois de comportement matériaux et les simplifications numériques possibles. La connaissance des modèles de prédiction permet de déterminer les données à post-traiter après le calcul. Le maillage fait partie des hypothèses considérées, plusieurs stratégies seront comparées dans la partie de validation du modèle.

4.1.1.1 Avant propos sur la modélisation dynamique

La modélisation du comportement et de la rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques est discutée par *A. Dragon et Al.* [63]. Après avoir décrit le contexte industriel et les problématiques associées, les auteurs définissent la notion de régime dynamique. En effet, le comportement d'un matériau ou d'une structure ne peut être décrit pour n'importe quelle sollicitation. Les spécialistes s'accordent sur la classification suivante en fonction des vitesses de déformation :

- Un régime inférieur à 1 s^{-1} est qualifié de quasi-statique
- Entre 1 s^{-1} et 10 s^{-1} on parle de régime faiblement dynamique, ou lent (chute d'objets par exemples). Celui-ci est proche du quasi-statique et peut s'appréhender avec les mêmes outils, en particulier d'un point de vue expérimental
- Entre 10 s^{-1} et 1000 s^{-1} le régime est dit « moyen », il peut s'agir de phénomènes de crash par exemple
- Au-delà de 10^4 s^{-1} , la dynamique rapide est caractérisée par le phénomène de propagation d'ondes mécaniques, en particulier d'ondes de choc. Dans cette catégorie on peut citer les phénomènes d'impacts balistiques ou d'explosions
- Entre 10^6 et 10^8 s^{-1} les phénomènes sont particulièrement violents, par exemples les impacts météoritiques. Dans ces cas les matériaux se comportent comme des fluides et peuvent même relever de la physique des plasmas

Se situer parmi ces gammes de vitesses de sollicitation est déterminant au niveau des moyens expérimentaux, de la modélisation du comportement des matériaux et des choix en simulation.

4.1.1.2 Lois de comportement des matériaux

Cette partie décrit certaines propriétés fondamentales utilisées dans le modèle numérique : le comportement élastique ou inélastique et l'isotropie ou l'anisotropie d'un matériau. Modèles théoriques L'élasticité est la loi la plus simple et la plus couramment employée en mécanique. Celle-ci peut être linéaire ou non-linéaire selon le chemin emprunté lors de la déformation et du cycle charge-décharge. La plasticité a beaucoup d'impact sur

la durée du calcul puisqu'il s'agit d'une non-linéarité qu'il faut prendre en compte. Si, à chaque flexion du circuit imprimé un matériau plastifie alors il faut considérer l'accumulation de déformation (ou d'énergie) comme un critère de rupture possible en fatigue. D'autre part il faut définir une règle d'écoulement qui est :

$$\{d\varepsilon^{plas}\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (4.1)$$

Où : λ est le multiplicateur plastique, Q est une fonction qui détermine la direction de la déformation plastique. Les termes de déformation ε^{plas} et σ sont définis dans l'annexe 7. A cette règle d'écoulement il faut également ajouter une règle d'écrouissage qui décrit l'évolution de la surface de la contrainte limite (limite élastique en contrainte) définie dans l'espace des contraintes principales. Les règles de durcissement schématisée sur la figure 4.1 sont de deux sortes : isotrope et cinématique. Le comportement plastique est généralement simplifié par une suite de segment, ils sont donc dit multi-linéaires.

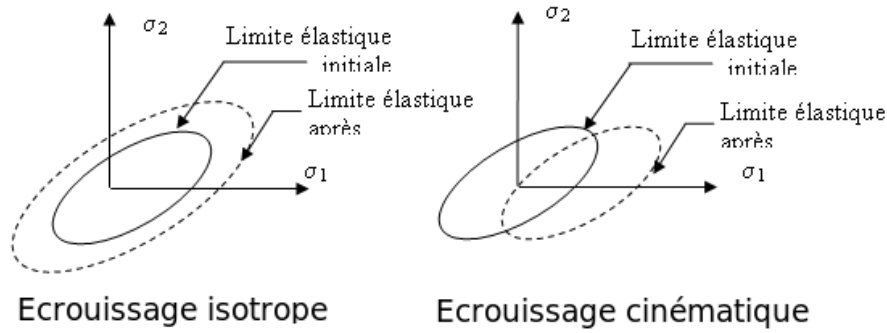


FIG. 4.1 – Représentation schématique des règles d'écrouissage (repère avec deux contraintes principales)

La viscosité consiste en une déformation plastique de la matière sous charge (*cf.* également Chapitre 3). Ce phénomène est temporel et se manifeste sous contrainte, surtout à température élevée. Les matériaux les plus sensibles au fluage sont les polymères, ensuite les métaux puis les céramiques. Enfin, l'écrouissage viscoplastique consiste en une variation de la contrainte pour atteindre une déformation donnée en fonction de la vitesse de déformation. Cette donnée peut s'avérer importante pour les métaux, exemple : la résistance mécanique du $\text{SnAg}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ à 25 °C est d'environ 41 MPa à 10^{-5} s^{-1} et de 66 MPa à 10^{-1} s^{-1} [64]. Par contre cette propriété n'est pas significative dans le cas d'un aluminium [65]. On peut ajouter que la plupart des comportements (plasticité, écrouissage, fluage et effets thermiques notamment) sont souvent mis en équations. On peut citer la plus connue et probablement la plus complexe, qui est en fait un système à 3 équations et 9 constantes, le modèle d'Anand [66] :

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon^p}{dt} = A \times \left[\sinh \left(\frac{\xi \sigma}{s} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \times \exp \left(-\frac{Q}{kT} \right) \\ \dot{s} = \left[h_0 \times (|B|)^a \times \frac{B}{|B|} \right] \times \frac{d\varepsilon^p}{dt} \\ B = \frac{1-s}{s^*} \end{cases} \quad (4.2)$$

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

Les paramètres de cette équation sont :

- A est appelé le facteur pré-exponentiel (en 1/s),
- h_0 est le coefficient de durcissement (en MPa),
- k est la constante de Boltzmann (en J/K),
- m est la sensibilité de la vitesse de déformation à la contrainte (sans unité),
- n est la sensibilité de la vitesse de déformation à la saturation (sans unité),
- Q est l'énergie d'activation (en J/mol),
- R est la constante universelle des gaz parfaits (en J/Kg.K),
- s est la résistance à la déformation (en MPa),
- s_0 est la valeur initiale de résistance à la déformation (en MPa),
- $\hat{s}$ est le coefficient de déformation (en MPa).

La connaissance des paramètres de ces équations peut permettre de gagner du temps de calcul par rapport à des données rentrées sous forme de tableaux de points. La détermination de ces coefficients est difficile, peu d'équipes de recherche y arrivent.

Modèles théoriques : isotropie

Le circuit imprimé représente le cas le plus évident d'anisotropie. Dans le cas du test de flexion sa déformation est imposée. En revanche, dans le cas du test de chute il faudra comparer sa flèche et sa déformation réelle avec les valeurs calculées pour évaluer la pertinence d'un modèle isotrope. La croissance des composés intermétalliques est dendritique, ces dendrites poussent perpendiculairement aux autres couches, ce qui constitue un cas d'anisotropie. On peut également considérer l'anisotropie des métaux selon l'orientation des plans cristallins ou s'ils ont subi un traitement local (de durcissement par exemple). La liste ci-dessous concerne les matériaux mis en jeux lors des essais mécaniques de chute et de flexion. Cette liste constitue une liste d'hypothèses *a priori*, celles-ci sont basées sur l'état de l'art notamment. On s'efforcera par la suite de vérifier leur validité.

Circuit imprimé Les mesures par zones ont montré une forte anisotropie du circuit imprimé. Son module d'élasticité est différent dans le plan et hors-plan. Des mesures ont été effectuées en flexion dans la partie de caractérisation des matériaux. Les mesures avec jauges de déformations ainsi que les données bibliographiques montrent que le maximum de déformation au cours d'un cycle n'évolue pas durant le test de chute, il suffit donc de modéliser la déformation élastique. D'autre part, la vibration de l'ensemble est d'environ 300 Hz d'après les mesures précédentes, on peut donc supposer que le fluage n'a pas d'influence majeure. De manière générale ce phénomène ne sera pas pris en compte avec les autres matériaux pour les mêmes raisons.

Plot de cuivre

Métal à structure cristalline cubique à faces centrées, le cuivre est très ductile et facile à mettre en forme par déformation plastique [67]. Sa conductibilité thermique est excellente et ses propriétés le rendent irremplaçable dans le monde de l'assemblage de composants électroniques. Sa plasticité doit également être prise en compte dans la simulation numérique.

Verni épargne

Celui-ci peut être soit SMD¹ soit non-SMD (NSMD) et son module est de l'ordre de 2.5 GPa. Il est généralement pris en compte dans les modèles de BGA et de WL-CSP lorsqu'il

¹SMD = Solder Mask Defined ; NSMD = Non-Solder Mask Defined selon qu'il recouvre partiellement ou non le plot de cuivre. Ceci influence la forme finale que peut prendre la bille de brasure.

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

impacte la forme de la bille. Une simulation numérique doit valider que cette sur-couche n'influence pas significativement la déformation du circuit imprimé. Cette couche étant très fine, il est intéressant de la négliger.

Composés intermétalliques

Les brasures constituent les matériaux les plus compliqués à modéliser du fait de leur comportement dépendant à la fois à la température et à la vitesse de sollicitation. Le problème vient du peu de données disponibles sur l'influence de la vitesse de déformation pour des brasures spécifiques à STMicroelectronics. On peut donc envisager soit un modèle élasto-plastique déterminé par les mesures du Chapitre 3, soit un modèle de la littérature qui pourrait moins bien correspondre mais inclure plus de phénomènes physiques. La présence d'aiguilles ou de plans d'Ag₃Sn à l'intérieur des billes (surtout pour le SnAg₄Cu_{0.5}), après refusion, est bien connue mais ne pourra être investiguée à une échelle macroscopique.

Composés intermétalliques

Il s'agit d'un matériau particulier car l'interface IMC/brasure est un lieu de fissuration fréquemment observé, selon les configurations. Sa composition peut être multiple (Cu₆Sn₅, Cu₃Sn, etc.) et il croît de la couche d'adhésion vers la brasure sous forme de dendrites. Des expériences ont montré que l'ajout de nickel permet de limiter sa croissance – qui est généralement de quelques micromètres – ce qui justifie l'emploi de brasures contenant du Ni. Sa topologie particulière ne pourra pas être reproduite pour la modélisation en l'état actuel des connaissances. La nature de l'IMC rend sa caractérisation difficile et seul son module d'Young a pu être déterminé par nanoindentation (*cf.* Chapitre 3).

Couche d'adhésion (Ti/Ni/Cu/Au) L'or est immédiatement dissout dans la bille de brasure liquide lors du report sur circuit imprimé. Le cuivre est consommé dans la fabrication des composés intermétalliques. Le nickel a le rôle de barrière de diffusion. Le titane permet l'adhésion du nickel et du titane sur la piste métallique. Des études montrent qu'il a un rôle plus large car il permet de former des composés qui modifient les contraintes intrinsèques, permet de combler les porosités de certaines couches et modifie le comportement plastique de l'aluminium [27]. Globalement chacune de ces couches a une épaisseur totale inférieure au micromètre et ne seront pas modélisées.

Passivation Des essais montrent que cette couche provoque une variabilité importante des résultats, de par son épaisseur et sa composition (USG/PSG, SiN, SiON, HDP, etc.). Ces observations peuvent être liées soit aux propriétés mécaniques du matériau, soit aux différents procédés de déposition (la densité des dépôts et leurs contraintes intrinsèques sont liées aux paramètres de dépôt). Sa prise en compte apparaît nécessaire dans la modélisation. Le comportement peut être modélisé par son module d'Young, son coefficient de Poisson ainsi que sa masse volumique.

Métallisation des pistes (Aluminium) Il s'agit d'une composante fondamentale dans la fiabilité du test de chute. En effet, le Chapitre 2 montre que selon la composition et le traitement thermique associé les performances peuvent varier significativement. Les fissures sont fréquemment localisées dans cette métallisation. Or ses propriétés mécaniques ne sont pas développées dans l'état de l'art. Dans un premier temps on considère un comportement élastique linéaire simple, celui-ci pourra être développé par la suite.

Oxyde L'oxyde de silicium est similaire au verre SiO₂ dont les propriétés sont bien connues. Son module d'Young $E = 68 \text{ GPa}$ n'est pas négligeable devant celui de l'aluminium

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

ou de la passivation et son épaisseur est équivalente. Du fait qu'il s'agit d'une céramique, son comportement est fragile et la plasticité n'est donc pas à prendre en compte. En revanche cette couche fine commune à toutes les structures risque de demander beaucoup d'éléments, il semble donc utile de vérifier son éventuelle influence.

Silicium De par sa maille cristallographique (diamant), le silicium monocristallin n'est pas par essence isotrope. En effet, la maille diamant présente des densités d'atomes différentes selon les directions. Cette différence entraîne une anisotropie. Mais à la vue des difficultés pour l'obtention des propriétés mécaniques de matériau anisotrope, on se satisfait souvent d'une approximation isotrope. Dans le cas du silicium, ce sont les approximations de Voigt ou de Reuss [68]. Dans le cas de l'approximation de Voigt les constantes sont :

- $E = 166 \text{ GPa}$
- $\nu = 0.218$

Dans le cas de l'approximation de Reuss, les constantes sont :

- $E = 159 \text{ GPa}$
- $\nu = 0.228$

Ainsi pour faciliter le traitement des résultats découlant de l'analyse FEM, une approximation isotrope est choisie.

Matériaux	Propriétés physiques modélisées	Nature des propriétés physiques réelles
Circuit imprimé	Elastique linéaire isotrope	Elasto-visco-plastique anisotrope
Plot de cuivre	Elasto-plastique isotrope	Elasto-plastique isotrope
Verni épargne	Elastique linéaire isotrope	Non-précisée
Brasure SnAgCu	Elasto-plastique isotrope	Elasto-visco-plastique isotrope
IMC	Elastique linéaire isotrope	Non-précisée
Couche d'adhésion	Aucune	Adhésion et barrière chimique
Passivation	Elastique linéaire isotrope	Elastique linéaire isotrope
Métallisation Al	Elastique linéaire isotrope	
Oxyde	Elastique linéaire isotrope	Elastique linéaire isotrope
Silicium	Elastique linéaire isotrope	Elastique linéaire isotrope

TAB. 4.1 – Propriétés des matériaux utilisés

Le tableau 4.1 synthétise les propriétés utilisées. Une hypothèse d'isotropie importante est appliquée au circuit imprimé, cela permet de ne modéliser qu'un quart de la structure et ainsi d'économiser du temps de calcul. Cette hypothèse n'a pas été investiguée plus avant dans ce document mais utiliser les modules mesurés par DMA pourrait permettre de mieux cerner l'influence de la répartition des pistes de cuivre, dans un travail futur. D'autre part, le circuit imprimé est considéré comme purement élastique linéaire. Cette hypothèse est également prise dans la mesure ou il n'a pas été encore clairement établi dans quelle mesure la fatigue des matériaux constitutifs du PCB influence la déformation de celui-ci au cours de l'essai de chute.

4.1.1.3 Plasticité des métaux

Les propriétés élasto-plastiques des matériaux métalliques sont prises en compte car sans cela les contraintes dans les différentes couches seraient particulièrement élevées dans certaines couches par rapport à la résistance mécanique réelle du matériau considéré. Par exemple des modèles comparables réalisés en interne, avec un comportement élastique linéaire des matériaux conduit à une contrainte normale dans la bille supérieure à 100 MPa alors que les mesures dans le Chapitre 3 montrent que la résistance mécanique des alliages en étain n'atteint pas 50 MPa. En conséquence un comportement élasto-plastique est utilisé pour le plot de cuivre du circuit imprimé ainsi que l'alliage de la bille de brasure. Les fissures observées précédemment montrent qu'idéalement il faudrait également prendre en compte la déformation plastique dans la piste en aluminium. Ceci n'est pas possible car il s'agit d'un alliage particulier dont les propriétés ne sont pas connues. Les essais dynamiques réalisés dans le Chapitre 3 ont permis de déterminer le module d'Young des alliages à base d'étain. Les essais de traction en quasi-statique ont permis d'établir les propriétés dans le domaine plastique de ces mêmes alliages, les courbes mesurées sont simplifiées et conduisent à la modélisation représentée sur la figure 4.2.

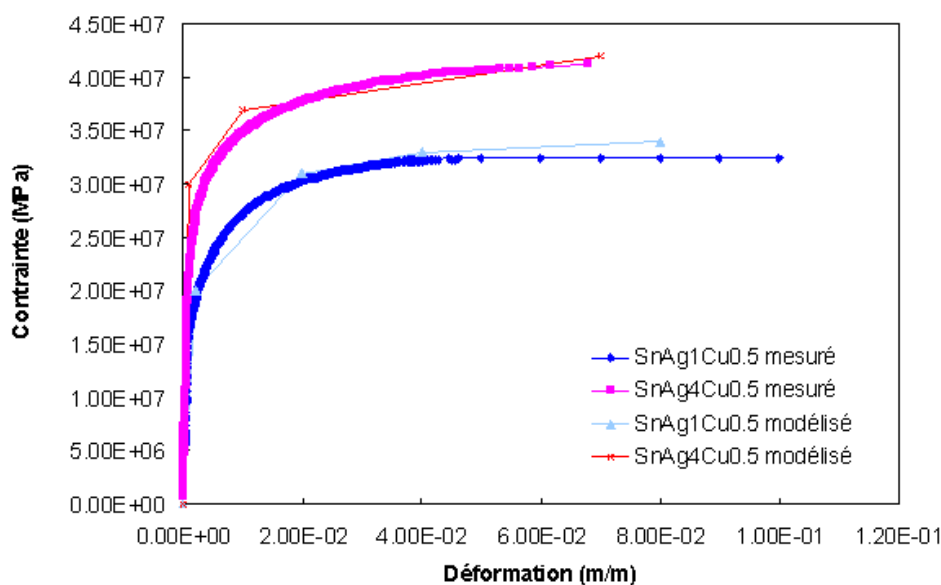


FIG. 4.2 – Comparaison des propriétés matériaux simplifiées avec celles mesurées pour les deux alliages modélisés de la bille de brasure

Les propriétés du plot de cuivre du circuit imprimé correspondent à celles des fournisseurs et sont simplifiées pour les simulations qui suivent, comme cela a été fait pour les alliages en SnAgCu.

4.1.1.4 Simplifications numériques

Hypothèse des petites perturbations Il s'agit d'une hypothèse de calcul qui assimile le déplacement à $t_0 + \Delta t$ avec celui à t_0 . D'un point de vue pratique cela permet de gagner un temps de calcul considérable, cette simplification s'applique dans le cas de faibles déformations plastiques. Dans le cas de flambage (par exemple : flexion du circuit imprimé) alors il faut se placer en « grandes déformations ». On peut avoir des déformations infinitésimales (de l'ordre de 10^{-3} m/m) et obtenir des déplacements non infinitésimaux (exemple de la flexion d'une lame de rasoir ou de ressort en acier et plus généralement de tous les problèmes de « flambement et post-flambement élastiques »). Réciproquement, on peut avoir des déplacements infinitésimaux et obtenir des déformations de l'ordre de 1 (exemple : striction localisée dans une éprouvette de traction) [69]. Pour valider cette hypothèse il faut s'assurer que les déplacements et déformations sont identiques avec et sans celle-ci.

Modèles dynamiques : implicite et explicite [62] [69] Le schéma d'intégration temporel explicite est particulièrement adapté dans les cas de non-linéarités et de propagation d'ondes. En revanche il est conditionnellement stable, cela signifie que la convergence temporelle n'est obtenue que si le pas d'intégration temporel est suffisamment petit. Le schéma implicite est inconditionnellement stable, par contre il n'est pas très efficient pour la résolution de problèmes dynamiques (requiert plus de temps). De plus, dans le cas de fortes non-linéarités la résolution implicite peut provoquer des divergences.

Maillage Il ne s'agit pas d'une hypothèse à proprement parler, mais ce point est important car un maillage trop fin conduit à des temps de calculs trop longs et des ressources informatiques excessives. A l'opposé, un maillage trop grossier produit des résultats qui manquent de précision, voire des difficultés de résolution pour le contact. Dans une zone anguleuse, on peut trouver une contrainte croissante à mesure que le maillage est de plus en plus raffiné. Pour cette raison des compromis sont à rechercher, la discussion portera sur les parties du modèle les plus importantes à affiner. L'étape de maillage souligne généralement un travail amont de simplification de la géométrie, de retirer les détails (par exemples les chanfreins, arrondis, etc.) qui ne sont pas importants d'un point de vue thermique ou mécanique. Ajoutons également que les éléments doivent obéir à des critères de formes. De manière générale un quadrangle doit être proche de la forme d'un cube et les tétraèdres doivent être le plus proche possible de formes équilatérales avec des angles au sommet proches de 60° (dans une face). Chaque logiciel a ses propres recommandations sur le sujet, pour Ansys les quadrangles (carrés et cubes) sont à privilégier.

Sous-structuration (aussi appelé modèle global/local, ou multi-échelles) Il s'agit d'utiliser l'hypothèse de Saint Venant : « Si un système donné de distribution de forces est remplacé par un système statiquement équivalent, la distribution des contraintes et déformations équivalentes est altérée seulement près des régions où le chargement est appliqué ». Ceci implique que les effets de la concentration de contraintes sont localisés. Si les limites du sous-modèle sont suffisamment éloignées de la concentration de contraintes, des résultats raisonnablement précis peuvent être calculés dans le sous-modèle. Il s'agit donc :

1. De calculer un modèle avec un maillage grossier
2. De s'assurer dans tous les cas que le chargement du sous-système n'est pas trop rapproché des concentrations de contraintes.

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

3. De raffiner les zones d'intérêts : passivation, bille(s), métallisations, etc.
4. De déterminer si on peut calculer le modèle peu raffiné en élastique linéaire puis le sous-modèle avec des lois plastiques.

Cette méthode est intéressante car, dans le cas du test de flexion, elle pourrait permettre de séparer les non-linéarités de contact (entre les appuis et le circuit imprimé) des non-linéarités matériaux.

4.1.1.5 Modèles de chargement

Géométries - Généralités De manière générale les structures sont idéalisées du fait du travail amont réalisé sur la géométrie. Ceci doit nécessairement être le cas pour des structures complexes telles que les composés intermétalliques (*cf.* figure 4.3). Plus le détail est important et plus les éléments doivent être affinés. Les explications précédentes sur le temps de calcul en statique sont amplifiées en dynamique puisque le pas de temps est fonction du plus petit élément de la structure en explicite.

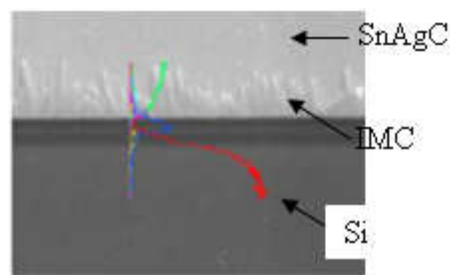


FIG. 4.3 – Structure comprenant, du haut vers le bas, Sn – Intermétalliques – Ti/Ni/Cu – Oxyde

Pour les mêmes raisons des couches très fines telles que le Ti/Ni demanderait des éléments trop petits (pour ne pas être dégénérés), aussi leur contribution à la résistance mécanique et à la distribution de contraintes dans les zones critiques doit être discutée. Une technique de simplification courante consiste à dessiner une couche unique « homogénéisée » pour laquelle les propriétés mécaniques sont « proportionnées » (calcul d'homogénéisation) de façon à être représentatives de l'ensemble des couches.

Géométries - Symétries Dans le cas de WL-CSP déposés sur circuit imprimé, on peut faire l'hypothèse que toute la zone du circuit imprimé contenant les 4 composants centraux subit le même niveau de déformation. Cette supposition permet de positionner un composant au centre de la plaque et ainsi (selon les hypothèses matériaux et de chargement) d'appliquer deux plans de symétrie.

L'effet est de diviser par quatre le nombre d'éléments – comme l'illustre la figure 4.4 – ce qui représente un gain élevé sur le temps de calcul.

Dynamique / Statique : Application de la sollicitation Le test de chute est un problème faiblement dynamique et requiert donc une analyse dynamique pour une prédiction de durée de vie. Le temps de résolution d'une analyse dynamique est fortement dépendant de la taille du problème et des éléments. Donc, la méthode statique pour le test de chute

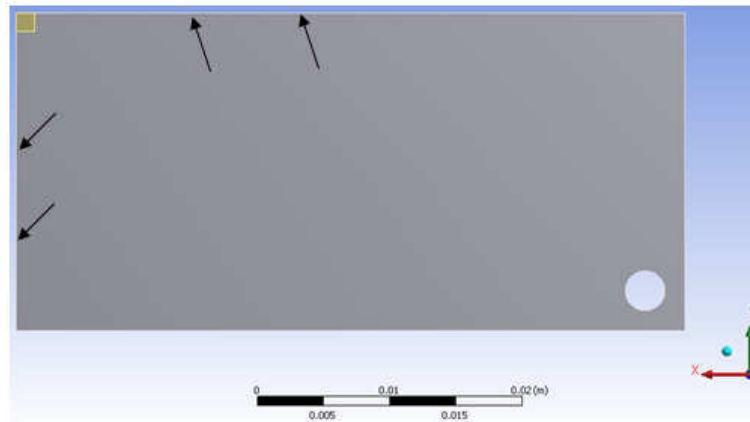


FIG. 4.4 – Quart du circuit imprimé et de la puce représentés, les plans de symétries sont indiqués

est développée pour une première estimation rapide ou lorsque le modèle dynamique n'est pas accessible en raison de limitations techniques ou de coûts. Par exemple, on a vu dans le Chapitre 1 que la rupture du joint de soudure est principalement causée par la flexion cyclique du circuit imprimé après impact, donc une déflexion au centre du circuit imprimé peut être appliquée. Ce modèle induit une contrainte excessive au centre de la plaque et n'est donc pas approprié pour étudier les effets de la position du boîtier sur le circuit imprimé (*cf.* figure 4.5a).



FIG. 4.5 – a) Modèle statique avec déflexion au centre du circuit imprimé – b) Modèle statique avec flexion répartie sur l'ensemble du circuit imprimé

Un autre modèle statique simplifié est montré sur la figure 4.5b). Les forces équivalentes sont appliquées uniformément sur l'ensemble de la structure, de telle sorte que la déflexion et la déformation correspondent aux mesures expérimentales. Ce modèle statique est plus proche du modèle dynamique que le précédent, à l'instant du 1er maximum de flexion du circuit imprimé après l'impact.

Le principal avantage du modèle statique étant qu'il est plus rapidement résolu que le modèle dynamique, certains exemples rapportent un gain d'un facteur 30 [70]. Des modèles plus compliqués (*e.g.* avec prise en compte de la plasticité) peuvent être proposés avec un temps de résolution court. Les modèles statiques sont également utiles dans le cas de grandes géométries avec des tailles d'éléments très fines. Le modèle statique est plus utile dans le cas de comparaisons relatives boîtier/circuit imprimé. Généralement, le modèle statique est capable de donner les mêmes tendances de résultats que le modèle dynamique pour la plupart des applications, et particulièrement quand la flexion est domi-

nante. Toutefois, si un tel modèle est capable de capter les effets du pic d'accélération, il ne pourra pas tenir compte de la durée de l'impulsion. L'effet temporel ne peut être retrouvé dans un modèle statique. Donc ce type de modèle peut capturer les grands changements dans un design (*e.g.* la DNP²) mais pas les « petites variables ». Pour résumer, le modèle statique est utile pour un aperçu des effets du design et offrir une tendance sur un plan d'expérience. Ensuite, les points retenus peuvent être analysés plus en détail avec le modèle dynamique. Ce dernier est plus adapté pour une optimisation de conception ainsi que pour la qualification virtuelle, pour déterminer si un boîtier est suffisamment performant lors du test de chute.

Modèles de chargement : Chute libre et accélération (*Free-Fall, Input-G et Support excitation scheme*) Le choix du type de chargement est largement discuté dans la littérature. On en recense 4 principaux, le chargement peut être imposé selon plusieurs méthodes, *C.-L. Yeh et Al.* [36] en font une synthèse appuyée par les démonstrations mathématiques correspondantes développée dans le Chapitre 1. Le mode de chargement retenu est celui appelé « support excitation scheme » car il permet de simplifier fortement le modèle (on garde seulement le circuit imprimé et le composant) tout en gardant des propriétés non-linéaires pour les matériaux. On applique donc une accélération équivalente à 1500 G pendant 1 ms sur l'ensemble des corps.

4.1.2 Aspects numériques

Les hypothèses discutées précédemment sont basées d'une part sur les résultats de la littérature, et d'autre part sur la caractérisation préliminaire des matériaux mis en jeu dans la structure à étudier. Cette partie décrit le modèle – composé de deux parties – mis en place et largement utilisé par la suite. Les points à valider sont les suivants :

- Influence du mode de chargement (statique ou dynamique)
- Choix des éléments du maillage, notamment pour modéliser le circuit imprimé et les couches fines
- Plusieurs propriétés matériaux à prendre en compte ou non en prêtant une attention particulière au comportement des brasures et du circuit imprimé

Les grandeurs observées pour valider ou non chacune de ces hypothèses sont définies préalablement.

4.1.2.1 Grandeurs observées

Les grandeurs observées peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Celles liées au circuit imprimé
- Les grandeurs liées au composant et au boîtier

Les grandeurs associées au circuit imprimé sont choisies de manière à confronter directement l'expérience et le calcul, ce qui ne pourra pas être fait dans le cas du composant. En effet, dans les précédents chapitres nous avons vu qu'il était possible d'instrumenter l'essai de chute avec une caméra rapide et des jauges de déformation. En conséquence, le déplacement et les déformations (dans les différentes directions) sont observés, tout particulièrement à l'endroit où le composant est positionné. Plus précisément, on s'intéresse

²DNP = Distance to Neutral Point

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

au déplacement vertical maximum au centre du circuit imprimé ainsi que la déformation longitudinale du côté où les composants sont assemblés. Les grandeurs relevées sur le WL-CSP sont localisées aux endroits où sont observées les fissures lors des microsections après les essais. Il s'agit de grandeurs à la base de la bille de brasure côté silicium (par opposition avec le côté du circuit imprimé) dans la bille elle-même, les composés intermétalliques, la passivation et la couche d'aluminium. Par ailleurs, lorsque les propriétés des composants comportent une composante plastique – typiquement un modèle élasto-plastique – alors cette composante plastique est utilisée. Les autres matériaux qui constituent l'empilement de la structure du composant sont généralement modélisés sur la base d'un comportement élastique. D'autre part, la propagation des fissures observées suggère que la sollicitation est de mode I. En conséquence on relève la contrainte dite « normale », perpendiculaire au sens d'ouverture de la fissure et, en général, également perpendiculaire à la puce. Ceci pourra être vérifié en comparant l'ensemble des composantes de la matrice des contraintes dans un élément à cette composante choisie.

4.1.2.2 Définition des modèles global et local

Le modèle global initial est constitué par un quart de géométrie avec la matrice de billes : 5 rangées et 5 colonnes. L'empilement sous la bille de coin est le suivant :

- Plot d'aluminium
- Couche de passivation
- Couche de composés intermétalliques (produite lors de la fusion de la bille sur la couche d'adhésion)
- Bille en $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$
- Plot de cuivre côté circuit imprimé

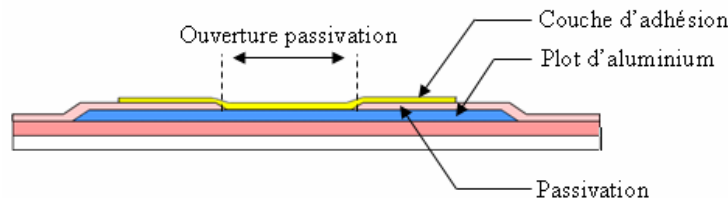
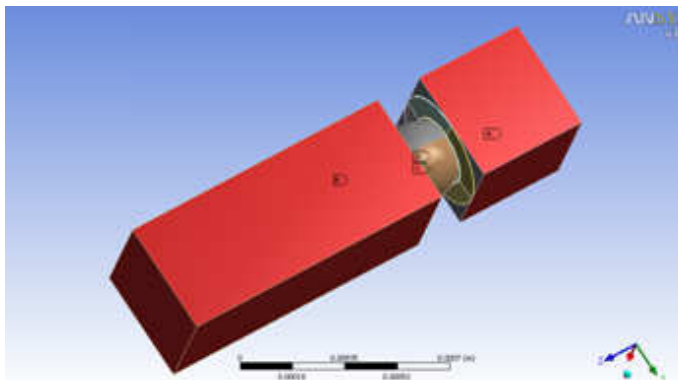


FIG. 4.6 – Structure sur Silicium d'une « technologie » de WL-CSP

Dans le modèle global, les autres billes ne sont pas supportées par cette structure, on fait l'hypothèse que cela ne perturbe pas le résultat car les couches fines sont plus complexes à mailler comme on le verra par la suite. La taille de maille est d'environ 0.2 mm. Par ailleurs, le circuit imprimé est maillé avec au moins 3 éléments dans l'épaisseur, un affinement par sphère d'influence près de la puce et une taille de maille de 0.25 mm. L'ensemble des matériaux a un comportement élastique linéaire isotrope. La géométrie du modèle local est générée à partir de celle du modèle global par enlèvement de matière du circuit imprimé, de la puce et des autres billes. Les faces sélectionnées pour l'interpolation doivent être « éloignées » des zones de contraintes en respect avec la règle de Saint-Venant. Les zones sélectionnées sont donc celles illustrées sur la figure 4.7. Celles-ci comprennent les parties de silicium et de circuit imprimé extraites du modèle global. Le maillage des



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99

[illegible]

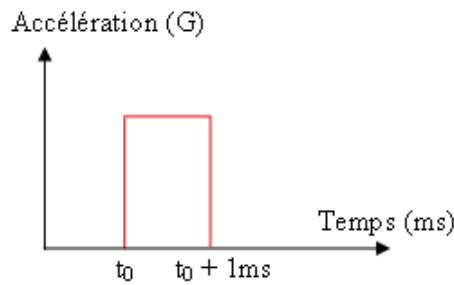


FIG. 4.8 – Représentation temporelle de l'accélération appliquée en dynamique

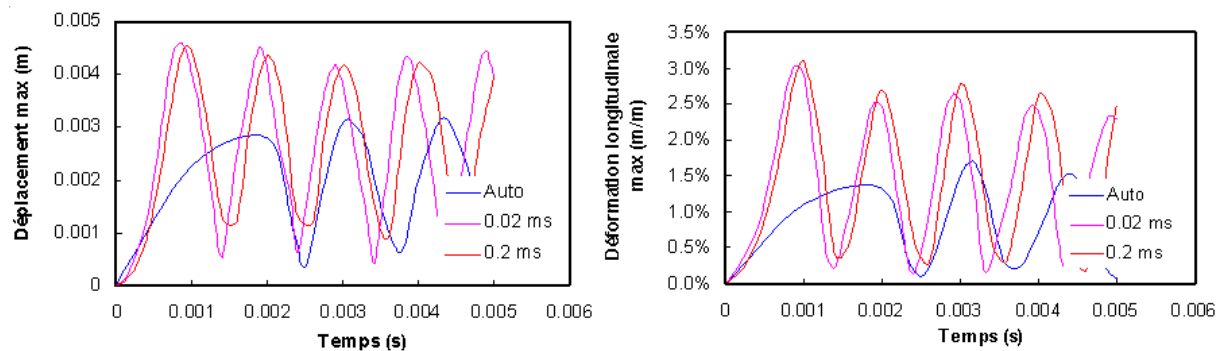


FIG. 4.9 – Influence du pas de temps sur la flèche maximale et la déformation maximale au centre du circuit imprimé

constate qu'un pas de temps minimum de 0.2 ms et un pas de temps de 0.02 ms aboutissent approximativement aux mêmes résultats bien que le deuxième cas prenne un temps significativement plus grand. Sur ces graphiques les valeurs sont toujours positives car la face supérieure est en traction quand la face inférieure est en compression et inversement. Comme seuls les maxima sont relevés, les valeurs sont relevées alternativement sur une face puis sur une autre.

4.1.2.4 Optimisation du maillage

L'optimisation du temps de calcul et des ressources informatiques se fait par un ensemble d'hypothèses qui ne doivent pas influencer de manière trop importante la précision souhaitée du résultat. C'est pourquoi, dans un 1er temps, les hypothèses sur le comportement des matériaux ont été traitées avec un élément 3D nommé SOLID186 qui utilise les formulations générales des éléments. Dans cette partie on fait varier un paramètre – ici l'ouverture de la passivation – et on compare les tendances sur une des grandeurs définies précédemment, en fonction des trois stratégies adoptées :

- Eléments SOLID186 à intégration réduite
- Eléments SOLID186 à intégration complète

Les formulations générales sont applicables dans le cas général de déformation finie. Naturellement, elles sont applicables aux petites déformations, aux petites déformations-

4.1. SIMULATION NUMÉRIQUE

grandes rotations et écouissage dans les cas particuliers. Les formulations sont basées sur le principe des puissances virtuelles. Un minimum d'hypothèses est utilisé pour arriver à la pente des relations non-linéaires, *i.e.* raideur tangente de l'élément. Pour cette raison elles sont appelées formulations consistantes [71].

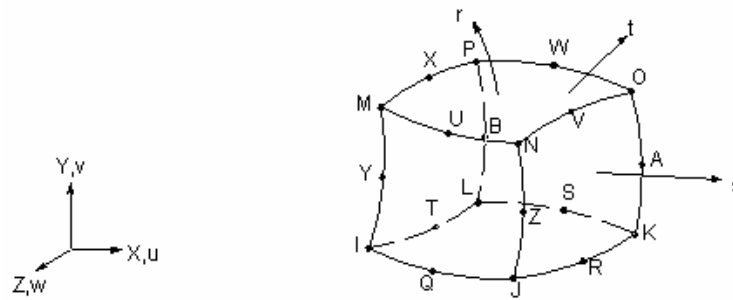


FIG. 4.10 – Eléments SOLID186 à 20 nœuds monocouche

La figure 4.10 présente la forme générale de l'élément SOLID186 à 20 nœuds ainsi que la position de ses nœuds. D'une manière générale il est recommandé d'utiliser au minimum 3 couches de cet élément pour discrétiser une géométrie. Dans le cas d'un plot de $200\ \mu\text{m}$ de diamètre et $1\ \mu\text{m}$ d'épaisseur – ordre de grandeur typique en microélectronique - il faut un grand nombre d'éléments cubiques pour remplir cette condition.

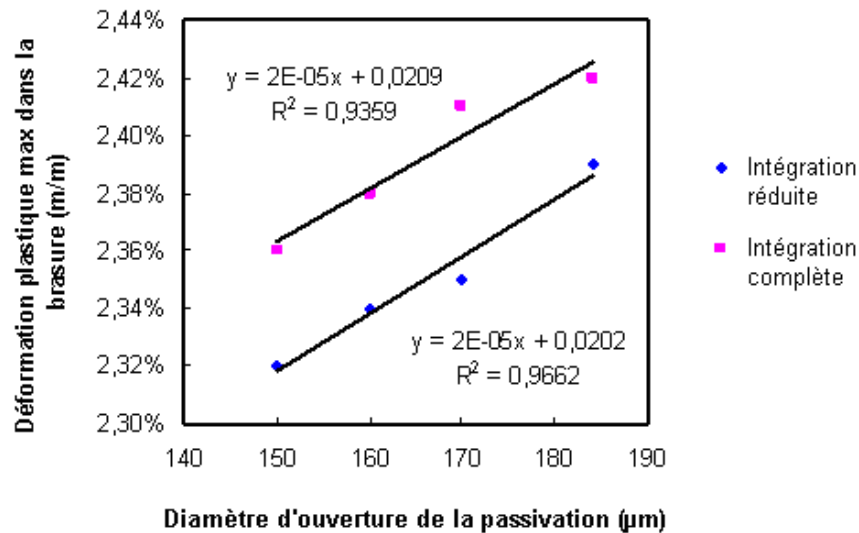


FIG. 4.11 – Comparaison de la déformation plastique dans la brasure en fonction de l'ouverture de la passivation et du type d'élément utilisé

L'élément SOLID186 décrit dans la section « Points d'intégration et contraintes » (en Annexe 7) peut se décliner de deux manières : soit en intégration complète, soit en intégration réduite. L'intégration complète est recommandée dans le cas où l'on ne peut mettre qu'une seule couche d'éléments comme pour les passivations de la structure étudiée ici.

On utilise donc le critère de déformation plastique défini précédemment et on modifie les éléments des couches suivantes :

- Métallisation en aluminium
- Passivation
- Métallisation sous la bille

La figure 4.11 montre que le nombre de points d'intégration influence légèrement l'évolution de la déformation plastique dans la brasure (moins de 2 % de variation) ainsi que la valeur absolue de cette même déformation. Le gain de temps étant inférieur à 10 %, on poursuit l'étude avec des éléments contenant un grand nombre de points d'intégrations. Les éléments à épaisseur fine (SOLSH190) ne sont pas présentés ici car ils ne permettent pas de reproduire exactement le même maillage que celui avec les éléments classiques ni produire un gain de temps significatif.

4.2 Utilisation du modèle de fatigue

La prédiction de la fiabilité des composants est réalisée en faisant le lien entre les outils numériques et ceux exposés dans le Chapitre 2 concernant l'étude de la fatigue mécanique des matériaux. Le modèle numérique est validé par la corrélation des déformations et déplacements du circuit imprimé entre mesures expérimentales et calculs numériques. Dans un premier temps cette partie expose les observations qualitatives et quantitatives délivrées par le modèle numérique. Celles-ci sont ensuite reliées à un modèle de fatigue dont les coefficients sont déterminés par des cas de référence. Dans un 2ème temps, le modèle retenu est exploité pour confirmer ou infirmer l'influence de paramètres aux étapes de diffusion et de finition.

4.2.1 Calcul des durées de vie

4.2.1.1 Structures des technologies

Dans ce cas précis, le terme « technologie » est associé à une modification dans le choix du matériau, par exemple : verre ou silicium. Cette modification implique généralement des modifications dans le choix de l'empilement.

Les particularités de la techno C, sur la figure 4.6, sont les suivantes :

- Métallisation en aluminium pur pour les pistes électriques dans le composant
- Présence d'un niveau de passivation « double » (généralement USG et PSG)
- La surface de contact entre l'UBM et la métallisation est caractérisée par un diamètre d'ouverture

Bien que cette structure soit simple, le nombre de paramètres qui peuvent varier reste élevé : choix du matériau dans chacune des couches, épaisseurs de celles-ci, diamètre d'ouverture de la passivation, diamètre du plot de métallisation, diamètre de la couche d'adhésion, etc.

Le tableau 4.2 décrit les types de structures qui sont utilisées dans les parties suivantes. Les autres informations dimensionnelles telles que le diamètre de la bille font partie de l'étude paramétrique qui suit. Ajoutons à cela que les contraintes technologiques en Front-

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

Paramètres	Techno A	Techno B	Techno C
Alliage de métallisation	Al-Cu	Al-Si-Cu	Al-Cu
Epaisseur de la métallisation	3 μm	1 μm	1.5 μm
Matériau de la passivation	USG-SiN	PSG-SiN	USG-PSG
Epaisseur de la passivation	2 μm	1 μm	1.2 μm

TAB. 4.2 – Descriptions des trois types de structures utilisées pour valider le modèle de fatigue

End sont telles que l'on rencontre fréquemment un défaut lié au « passage de marche ». Cette appellation imagée indique une difficulté de certains matériaux à se déposer uniformément lorsqu'ils rencontrent une variation topologique. La description de ces différentes structures est nécessaire car, si celles-ci ont des modes de défaillances différents, leur fiabilité mécanique en générale et leur tenue au test de chute en particulier varient significativement.

4.2.1.2 Observations qualitatives

Dans les 2 modèles il y a environ 100 000 nœuds, le temps de calcul pour le modèle global est d'environ 2 heures alors que pour le sous-modèle cela prend environ 1 heure avec un maillage analogue à celui présenté dans les figures ci-dessous. Le temps de calcul varie fortement car celui-ci dépend du nombre de degrés de liberté mais aussi du niveau de déformation plastique atteint dans certains matériaux. L'aspect quantitatif sera validé dans la partie concernant la prédiction de la durée de vie et les modèles de fatigue. On s'intéresse ici à la distribution des contraintes dans les différents éléments de la structure.

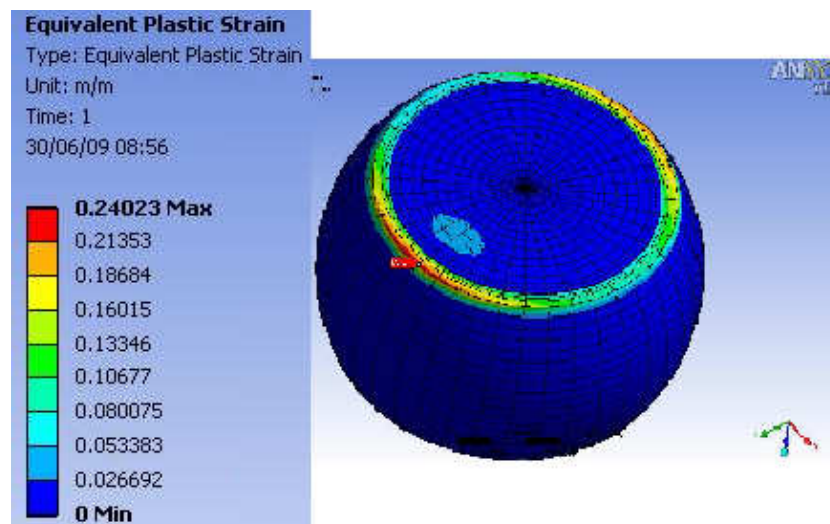


FIG. 4.12 – Distribution des déformations plastiques dans la bille, vue depuis le silicium

Les observations faites à partir des figures 4.14 et 4.15 sont de 2 types : déformations plastiques et contraintes normales selon l'axe z (vertical). L'axe appelé « z » correspond à

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

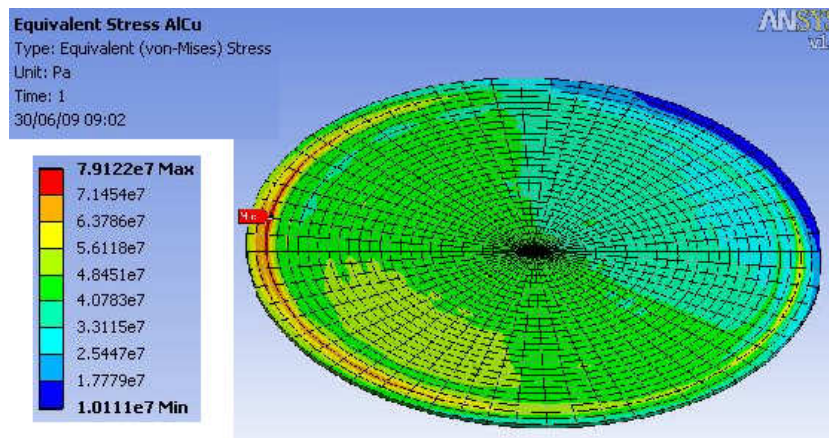


FIG. 4.13 – Distribution des contraintes normales en Pa dans la métallisation Al-Cu, vue depuis le circuit imprimé

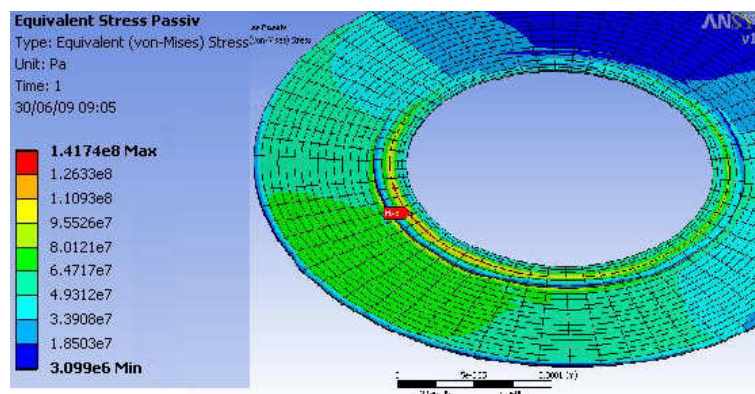


FIG. 4.14 – Distribution des contraintes selon z, en Pa, dans la passivation

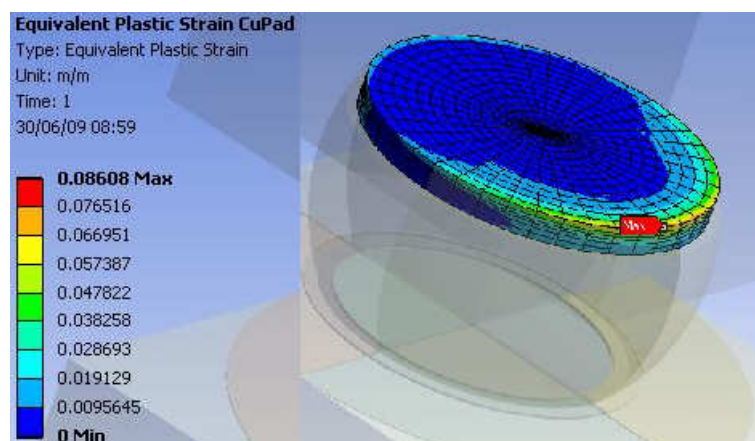


FIG. 4.15 – Distribution des déformations plastiques dans le plot de cuivre

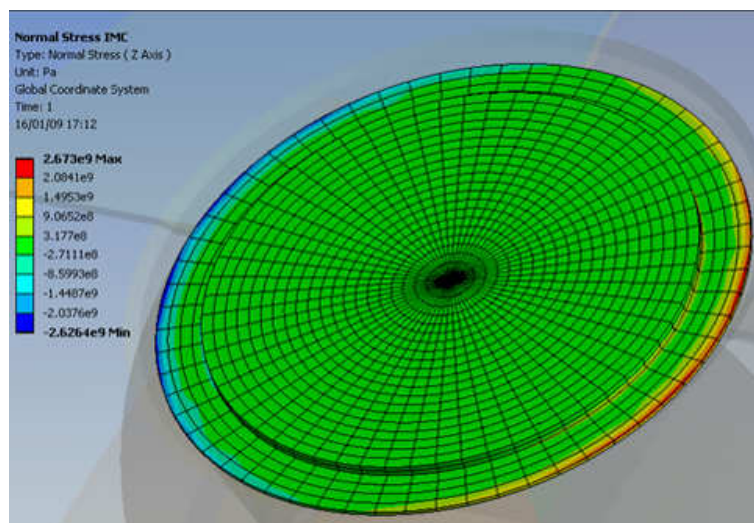


FIG. 4.16 – Distribution des contraintes selon z, en Pa, dans les intermétalliques

la direction hors-plan des métallisations. Les déformations plastiques sont relevées sur les matériaux qui ont un comportement élasto-plastique. Les contraintes normales permettent de déterminer les valeurs positives et négatives (travail en traction ou en compression), ce que ne permettent pas les contraintes de Von Mises. Les valeurs positives sont particulièrement néfastes car elles peuvent générer la propagation de fissures dans la matière et aboutissent à des ruptures de contacts électriques.

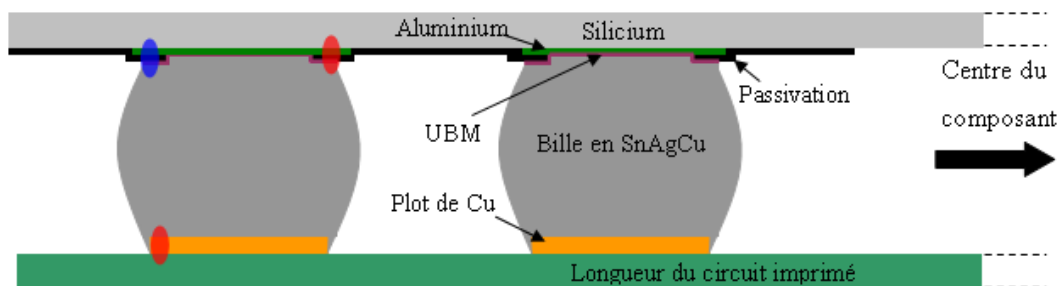


FIG. 4.17 – Schéma localisant les extremums de contraintes observées dans la simulation, vue en coupe d'un WL-CSP – En rouge les contraintes positives et en bleu les contraintes négatives

La figure 4.12 montre que les déformations plastiques dans la bille sont très localisées, elles sont concentrées du côté de la puce. Le maximum de déformation est orienté vers l'intérieur du composant. Ce maximum correspond également avec les autres maximums de contraintes observés dans les autres éléments de la structure.

Sur la figure 4.13 la contrainte dans l'Al-Cu est très localisée. Comparativement à la microsection 2.13 présentée dans le Chapitre 2, on observe que la fissure qui démarre dans la passivation peut soit se propager dans la métallisation en Al-Cu, soit se propager à l'interface entre ces deux matériaux, cette deuxième possibilité est observée dans cet

exemple.

Sur la figure 4.16 la contrainte dans la couche modélisant les intermétalliques est localisée sur le bord. Cette contrainte est positive vers l'intérieur du composant et négative vers l'extérieur. Sur la figure 4.15, la déformation plastique maximale dans le plot de cuivre du circuit imprimé est localisée à l'opposé de la déformation plastique maximale dans la bille de brasure. D'autre part cela permet de mettre en évidence que ce métal travaille également dans son domaine plastique, la partie suivante montre que la valeur de cette déformation n'est pas négligeable. Sur la figure 4.14, les contraintes normales dans la passivation sont surtout localisées près de la bille, après le passage de marche comme cela est montré sur la microsection de la figure 2.13. Les contraintes sont positives lorsqu'elles sont vers l'intérieur du composant, elles sont négatives du côté opposé au composant.

Le schéma de la figure 4.17 montre une bille de la rangée extérieure du composant où sont localisées ces contraintes et déformations maximales. Les ovales rouges indiquent les contraintes positives ainsi que les maximums de déformations plastiques. L'ovale bleu indique un maximum de contrainte compressive. L'ensemble de ces observations permet d'aboutir à deux conclusions :

- D'une part les localisations des maximums correspondent avec ceux effectivement observés à l'aide des microsections et des images de type FIB³. Les efforts sont orientés de manière à ouvrir les fissures en mode I.
- D'autre part ces contraintes sont très concentrées et localisées au niveau d'une « singularité » géométrique, à la jonction entre la bille et le reste de la structure.

4.2.1.3 Choix du modèle de fatigue

Un état de l'art a été effectué par *Lee et Al.* [43] qui synthétise 14 modèles de prédiction, dont une partie est présentée plus en détail dans le Chapitre 2. Ceux-ci sont classés en 5 catégories :

1. Basés sur les contraintes,
2. Basés sur les déformations plastiques,
3. Basés sur les déformations en fluage,
4. Basés sur l'énergie,
5. Basés sur l'endommagement et empiriques.

Dans l'article, le tableau de synthèse comporte également une colonne qui liste les constantes et variables requises pour chaque modèle. La fatigue à peu de cycles (oligocyclique) se situe généralement en-dessous de 1000 cycles, au-delà on considère qu'il s'agit de fatigue à grands nombres de cycles.

Modèles de prédiction [67] Un modèle est basé sur les contraintes si le chargement appliqué est une force ou une contrainte. Un modèle est basé sur les déformations si le chargement appliqué est un déplacement ou une déformation. Dans le cas du test de chute une accélération est appliquée au circuit imprimé, cela peut donc être assimilé à une force. Par contre, la déflexion du circuit imprimé impose un déplacement aux interconnexions des

³FIB = Focused Ion Beam (Faisceau à ions focalisés)

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

WL-CSP. Dans le cas des modèles basés sur les déformations, une déformation est appliquée entraînant l'apparition d'une contrainte dans le composant. Les déformations provoquées par des différences de coefficients de dilatation thermique appartiennent à cette catégorie. Cette dernière peut être scindée en deux sous-catégories, l'une dans le cas de la plasticité indépendante du temps et l'autre dans le cas dépendant du temps. Ainsi, on parlera de déformation plastique et de déformation de fluage ou viscoplasticité. Le modèle de Coffin-Manson est le plus connu et le plus utilisé mais aussi un des plus simples car il décrit le nombre de cycles à rupture comme une fonction puissance de la déformation plastique, il utilise 2 constantes. Les modèles basés sur l'énergie reposent sur le calcul de la surface de la courbe contrainte – déformation du système ou du joint de brasure. La figure 4.18 montre l'énergie liée à la déformation élastique et plastique, cette énergie étant quantifiée par l'aire sous la courbe ainsi décrite. R_m correspond à la résistance mécanique du matériau, R_u à la contrainte à la rupture et R_y à la limite élastique.

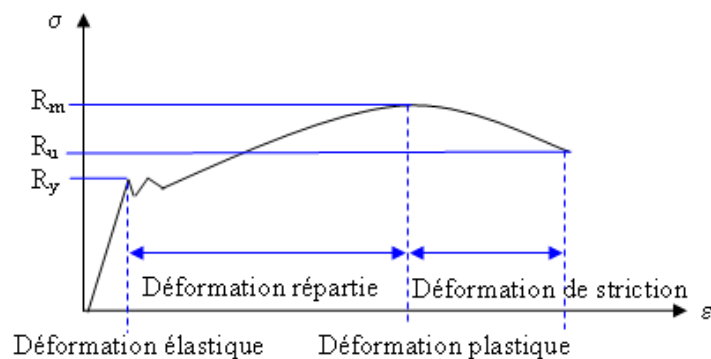


FIG. 4.18 – Schéma de la courbe de plasticité d'un métal

Les modèles basés sur l'énergie ont une limitation, ils ne permettent pas de prédire le nombre de cycles à rupture mais seulement le temps d'initiation, à l'exception du modèle de Darveaux. Les modèles reposant sur l'endommagement calculent l'endommagement causé par la propagation d'une fissure à travers le joint de brasure. Ces modèles ont été développés sur la base de la mécanique de la rupture. Ils peuvent être intéressants dans la mesure où les équations de la mécanique de la rupture induisent généralement un « effet seuil », caractérisé par la concentration critique de contraintes K_{c0} , effet seuil que l'on retrouve dans les distributions de Weibull à 3 paramètres.

Pour estimer la durée de vie des WL-CSP il faut utiliser un modèle pour lequel toutes les informations peuvent être déterminées. On choisit d'utiliser la relation de Coffin-Manson basée sur la déformation plastique du matériau. Cette relation permet de prendre en compte à la fois le temps d'initiation et le temps de propagation, ce qui est assimilé à la durée de vie extraite de l'analyse de Weibull. D'autre part, on considère que la déformation plastique est une grandeur représentative des chargements supportés par chacun des éléments de la structure (IMC, passivation, Al), ce qui conduit à considérer cette déformation comme critère pour l'estimation de la durée de vie de l'ensemble du composant. Les constantes du modèle de fatigue doivent être déterminées en croisant des résultats expérimentaux et de simulations pour les mêmes cas.

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

4.2.1.4 Détermination des constantes

On considère l'équation de Coffin-Manson sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' \times (2N_f)^c \quad (4.3)$$

ε_f' est le coefficient de ductilité et c l'exposant de fatigue ductile. $\Delta \varepsilon_p$ est la variation de déformation plastique au cours d'un cycle et N_f est le nombre de cycles à la rupture. Pour déterminer les constantes on utilise des essais de chute dits « de références ». Ceux-ci appartiennent aux structures de types A et B ainsi qu'à la technologie C. L'emploi de l'équation ci-dessus signifie que l'on considère la déformation plastique calculée dans la brasure représentative de la variation de déformation plastique au cours d'un cycle stabilisé. Par ailleurs on considère que la durée de vie statistique (η) discutée précédemment correspond au nombre de cycles à la rupture, en conséquence l'équation précédente devient :

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' \times (2\eta)^c \quad (4.4)$$

Structure	Disposition des billes	Pas entre billes	Diamètre des billes	Alliage des billes	η	ε_p
A	5x5	500 μm	250 μm	SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni	837	2.51 %
A	7x7	400 μm	250 μm	SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni	746	2.47 %
A	5x5	400 μm	250 μm	SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni	1003	1.87 %
B	5x5	500 μm	250 μm	SnAg ₄ Cu _{0.5}	647	2.79 %
B	5x5	500 μm	250 μm	SnAg ₁ Cu _{0.5}	727	2.45 %
B	7x7	400 μm	250 μm	SnAg ₄ Cu _{0.5}	577	2.68 %
B	7x7	400 μm	250 μm	SnAg _{1.2} Cu _{0.5} Ni	636	2.42 %
C	7x7	400 μm	250 μm	SnAg ₁ Cu _{0.5}	611	2.41 %

TAB. 4.3 – Description des cas de références et de leurs propriétés

Les résultats expérimentaux et numériques présentés dans le tableau 4.3 et la figure 4.19 utilisent 8 cas de références. Une forte dispersion est observée ainsi qu'un faible coefficient de corrélation, ce qui s'explique de deux manières :

- D'une part les structures 5x5 avec des diamètres de billes de 250 μm s'insèrent moins bien dans la tendance, lorsqu'on retire ces valeurs le coefficient de corrélation passe à 84 %.
- D'autre part, il y a plusieurs sources d'imprécision : imprécision liée à la répétabilité de l'essai de chute, liée au calcul numérique qui contient un certain nombre d'hypothèses et imprécision liée au design des différents circuits imprimés utilisés (donc à leurs caractéristiques mécaniques)

Ces données permettent de calculer $c = -0.49$ et $\varepsilon_f' = 0.218$ lorsque les huit cas de référence sont pris en compte. Ce modèle est ensuite utilisé pour estimer l'influence sur la durée de vie de paramètres qui ne peuvent pas être facilement testés. La méthode consiste à simuler le cas souhaité à l'aide du modèle décrit précédemment pour déterminer la valeur

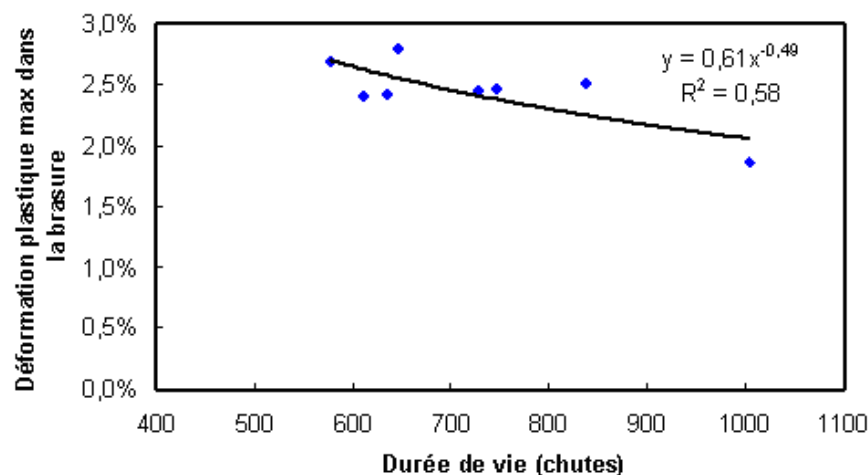


FIG. 4.19 – Relation entre la durée de vie des structures de références et la déformation plastique maximale calculée dans la brasure

de déformation plastique dans la bille de brasure. Cette valeur permet ensuite de calculer la durée de vie estimée avec l'équation suivante :

$$\eta = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\varepsilon_p}{2 \times \varepsilon'_f} \right)^{-c} \quad (4.5)$$

L'utilisation de cette méthode est détaillée dans les parties qui suivent.

4.2.2 Estimation de l'influence des paramètres de diffusion et d'assemblage

Les paramètres des étapes de diffusion et d'assemblage sont étudiés car on souhaite savoir si les variations dans les procédés de fabrication sont susceptibles d'induire des variations significatives sur la tenue des composants au test de chute. Aux quatre paramètres évalués s'ajoute l'influence du module d'Young du circuit imprimé car celui-ci peut varier en fonction de la répartition des pistes de cuivre à l'intérieur. D'autre part, la distribution des pistes dans le circuit imprimé va dépendre du nombre d'interconnexions dans un composant électronique. Ceci rend les comparaisons parfois compliquées entre composants de tailles différentes.

4.2.2.1 Influence de la géométrie

La géométrie de la structure sous la bille et celle de la bille elle-même sont importantes car deux aspects sont à prendre en compte :

- Certaines dimensions vont être imposées pour réaliser les propriétés électroniques souhaitées (la conductivité par exemple)

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

- La tendance est à la diminution de la taille des billes et des diamètres de la structure sous la bille ce qui, en contrepartie, diminue la tenue mécanique

L'étude de l'influence du diamètre de la couche d'adhésion, du diamètre du plot de cuivre (côté circuit imprimé) ainsi que du diamètre de la bille (avant refusion) va permettre d'optimiser les caractéristiques du composant électronique. Cette comparaison est effectuée pour deux alliages : le $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ et le $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$.

Disposition	Pas (μm)	Alliage	Diam. UBM (μm)	Diam. plot de Cu (μm)	Diam. bille (μm)	Durée de vie η
7x7	400	105	220	250	250	669
7x7	400	105	230	250	250	896
7x7	400	105	240	250	250	1252
7x7	400	105	250	250	250	1294
7x7	400	105	220	250	230	313
7x7	400	105	220	250	270	545
7x7	400	105	220	225	250	913
7x7	400	105	220	275	250	226
7x7	400	405	220	250	250	591
7x7	400	405	230	250	250	797
7x7	400	405	240	250	250	986
7x7	400	405	250	250	250	1124
7x7	400	405	220	250	230	313
7x7	400	405	220	250	270	538
7x7	400	405	220	225	250	1015
7x7	400	405	220	275	250	147

TAB. 4.4 – Influence du diamètre de la couche d'adhésion, du plot de cuivre et du diamètre des billes sur la tenue mécanique au test de chute

Les résultats du tableau 4.4 sont estimés à partir des résultats de la simulation numérique et des coefficients déterminés précédemment. D'après ce tableau, l'alliage avec une plus faible quantité d'argent apporte une plus grande durée de vie au composant, ce qui sera confirmé dans les parties suivantes.

4.2.2.2 Disposition des billes

Les composants testés dans le cadre d'essais de chute et de flexion sont tous des chaînes électriques simplifiées pour lesquels la matrice de billes est complète, par exemple un composant 7x7 contient effectivement 49 billes. Par contre, les produits sont plus spécifiques et ne nécessitent parfois que quelques interconnexions avec des dispositions de billes particulières. L'étude sur la disposition des billes est donc composée de deux étapes :

- Estimation de la durée de vie des composants avec des matrices pleines de plus en plus réduites

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

- Estimation de la durée de vie des composants avec des matrices auxquelles certaines billes sont retirées, les cas choisis étant considérés comme « représentatifs » des cas industriels effectifs

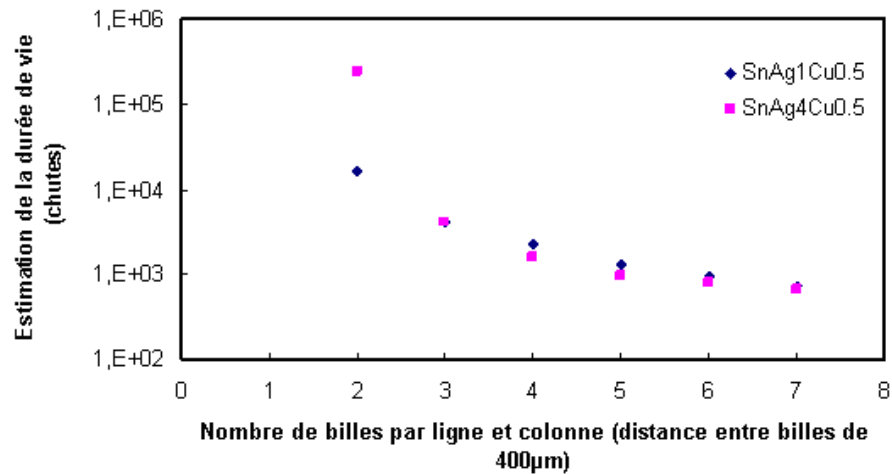


FIG. 4.20 – Estimation de la durée de vie des composants en fonction de la taille de la matrice de billes

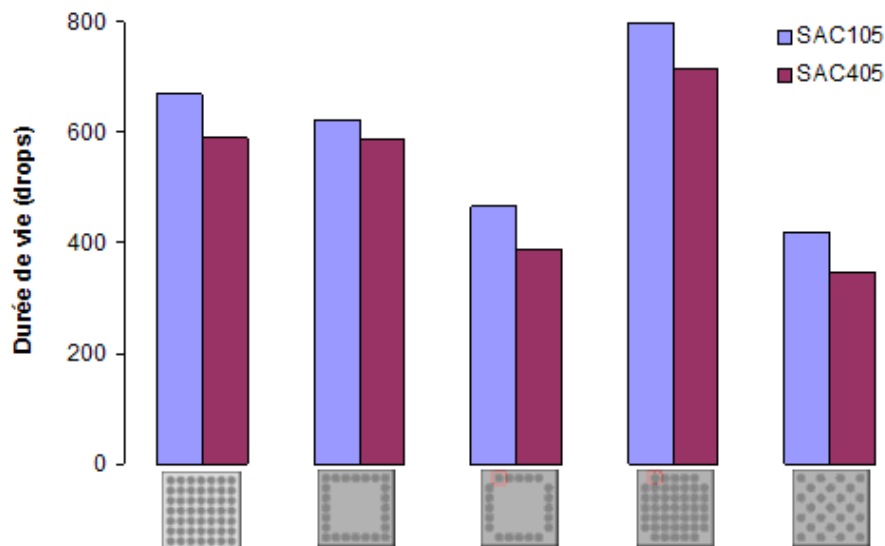


FIG. 4.21 – Estimation de la durée de vie en fonction de la disposition des billes sur le composant

La figure 4.20 montre clairement que la dimension de la matrice de billes a un impact majeur sur la tenue mécanique du composant. Plus la taille du composant est réduite, à taille de bille et pas entre bille constants, plus la tenue mécanique de celui-ci est élevée. Les valeurs pour les très petites matrices, notamment pour la dimension 2x2, sont incertaines car le niveau de déformation plastique est très faible et ne reflète plus forcément

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

l'état physique de l'alliage de brasure. De plus, il conviendrait de déterminer si le mode de défaillance est modifié. Par contre, sur des dimensions de l'ordre de 3x3 ou 4x4 la modélisation constitue un apport intéressant car un essai de chute de plusieurs milliers de cycles prendrait des jours voire des semaines pour obtenir 10 000 cycles. L'alliage $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ apporte une durée de vie supérieure au $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ pour les matrices de 7x7 à 4x4. Par contre, la tendance semble s'inverser pour les matrices de billes 3x3 et 2x2. Les composants n'ont pas toujours besoin d'avoir 25 ou 49 interconnexions (billes), certaines sont donc fréquemment retirées. L'influence de l'organisation des billes sur la figure 4.21 montre des variations significatives d'un cas à un autre. L'organisation des billes est illustrée sous chaque barre de l'histogramme. Lorsqu'une bille de coin est retirée il faut déterminer la bille critique à utiliser dans le modèle local, celle-ci est encadrée sur les schémas de la figure 4.21. L'interprétation que l'on peut proposer pour ces résultats est la suivante :

- La durée de vie est augmentée lorsqu'il y a une forte densité de billes (matrice de billes complète).
- Le retrait d'une bille de coin est favorable lorsque la matrice de billes est pleine car les billes de coins sont généralement les plus sollicitées.
- Le retrait d'une bille de coin est défavorable lorsque la matrice de billes est vide car les billes périphériques (des bords extérieurs) ne sont plus « protégées » par les billes intérieures.

4.2.2.3 Influence du diamètre de l'aluminium

On s'intéresse au diamètre du plot d'aluminium pour améliorer la tenue mécanique des composants.

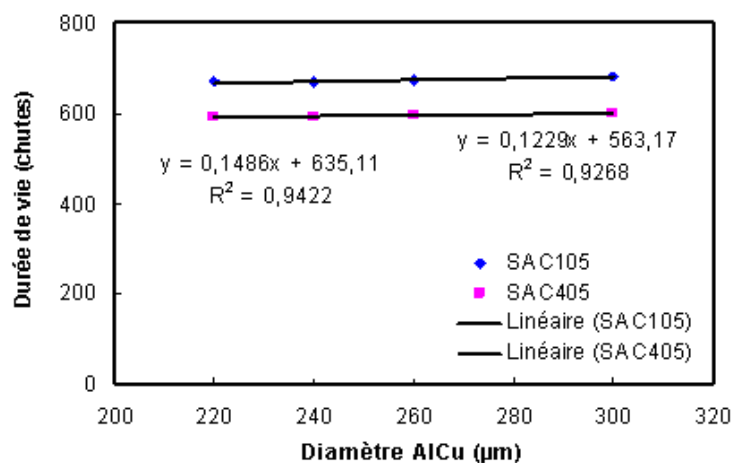


FIG. 4.22 – Influence du diamètre du plot d'aluminium sur la tenue au test de chute

Sur la figure 4.22 deux alliages sont comparés :

- La pente pour le $\text{SnAg}_1\text{Cu}_{0.5}$ est de 0.15 chutes par μm
- La pente pour le $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0.5}$ est de 0.12 chutes par μm

Cette figure montre clairement que l'augmentation de ce diamètre n'influence pas la

4.2. UTILISATION DU MODÈLE DE FATIGUE

tenue mécanique du composant. La seule limite à la réduction de ce diamètre est donc la réduction du diamètre de la couche d'adhésion (sous la bille). En effet des essais de chute ont montré que, si le diamètre du plot d'aluminium est inférieur à celui de la couche d'adhésion, alors le mode de défaillance est modifié et la durée de vie des composants est diminuée.

4.2.2.4 Épaisseur et module d'Young du silicium

Deux axes d'étude sont envisagés au niveau de la puce pour améliorer la tenue mécanique du composant :

- Soit réduire l'épaisseur du silicium
- Soit remplacer le silicium par un autre matériau

La réduction de l'épaisseur du silicium est possible via notamment les procédés d'amin-cissement et gravure chimique. Cette réduction s'accompagne généralement d'une augmentation de la courbure de la plaquette et de la fragilité de celle-ci au cours des différentes manipulations. Dans le cas des composants actifs et passifs intégrés, le silicium est un support qui doit répondre à un certain nombre de contraintes pour supporter l'ensemble des étapes industrielles. On évalue donc l'impact que pourrait avoir le remplacement du silicium par du verre. Du point de vue de la modélisation cela revient à changer le module d'Young, le coefficient de Poisson et la densité du matériau de la puce. Du point de vue industriel, ce changement implique d'autres modifications dans les procédés qui sont susceptibles d'influencer également la résistance mécanique du composant.

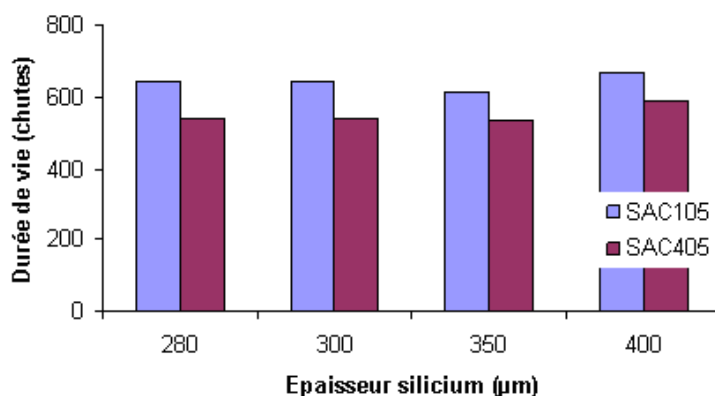


FIG. 4.23 – Influence de l'épaisseur de la puce en silicium sur la tenue mécanique du composant

La figure 4.23 montre l'estimation de la tenue mécanique en fonction de l'épaisseur de la puce en silicium. Il n'y a pas d'évolution significative d'après le modèle numérique, cela est également confirmé par une série d'essais de chute menés en interne. D'autre part, la figure 4.24 montre que les propriétés mécaniques de la puce n'ont pas d'influence sur la déformation plastique au niveau de la bille de brasure. On conclut donc que si une amélioration des performances des composants est observée, alors celle-ci serait principalement liée aux procédés utilisés et aux autres changements accompagnant la modification de matériau.

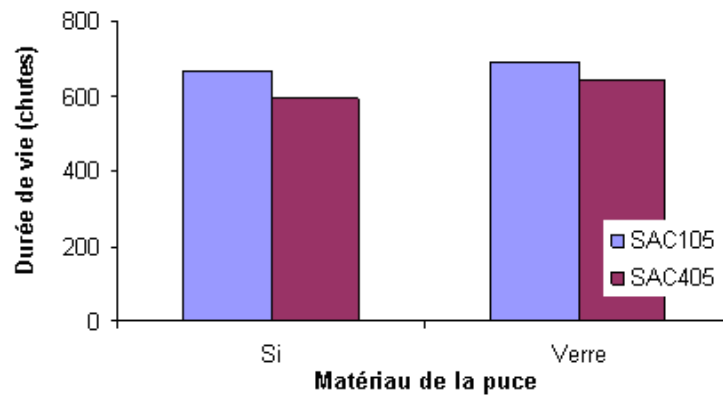


FIG. 4.24 – Influence du matériau utilisé pour la puce sur la tenue mécanique du composant

4.2.2.5 Module d'Young du circuit imprimé

Les mesures de caractérisation sur le circuit imprimé ont montré que son module d'Young est susceptible de varier d'une conception à une autre (*i.e.* selon le nombre d'interconnexions du composant). Cette étude paramétrique a pour objectif de mieux comprendre dans quelle mesure les résultats des tests de chute sont affectés par cette propriété.

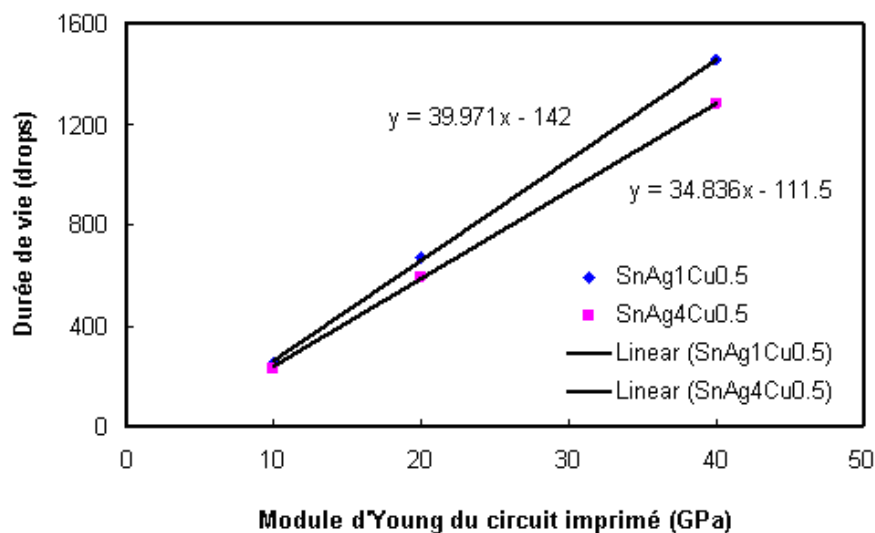


FIG. 4.25 – Estimation de l'influence du module d'Young du circuit imprimé sur la tenue mécanique des WL-CSP au test de chute

Les simulations sont effectuées en modifiant le module d'Young du circuit imprimé à la fois dans le modèle global et dans le modèle local. La figure 4.25 montre que ce paramètre influence significativement la tenue mécanique des composants quel que soit l'alliage de brasure utilisé. La gamme étudiée est large par rapport à ce qui a été mesuré, par contre cela constitue une première étape pour mieux comprendre comment le circuit influence la

tenue au test de chute.

4.3 Conclusions sur le modèle numérique et perspectives

Un ensemble d'hypothèses a été présenté suite à la caractérisation des matériaux constitutifs des WL-CSP, des circuits imprimés et suite à des mesures sur le banc du test de chute. Un choix concernant ces hypothèses est proposé de manière à modéliser la réponse mécanique des composants électroniques lors de l'essai de fatigue. Les hypothèses concernent :

- La géométrie utilisée
- La modélisation de chacun des matériaux
- La modélisation du chargement auquel est soumis l'ensemble « circuit imprimé et composants »

Une fois le modèle mis en place, il existe plusieurs niveaux de validation :

- Validation par les déplacements et déformations mesurables sur le circuit imprimé
- Validation par la localisation des fissures dans le composant
- Comparaison du modèle avec des cas évalués expérimentalement

Cette dernière comparaison fait intervenir deux éléments supplémentaires : un modèle de fatigue ainsi qu'un critère (*i.e.* une donnée qui puisse être extraite du modèle numérique) pour évaluer le nombre de cycles nécessaires pour conduire un composant à la rupture. Les déplacements et déformations du circuit imprimé ont été comparés en fonction du type de modélisation – statique ou dynamique – et la comparaison montre que le modèle statique peut conduire à sous-estimer le déplacement et la déformation du circuit imprimé. La localisation des contraintes dans les différents éléments de la structure du composant ont été comparés avec des analyses par microscopie acoustique et avec des observations issues de microsections. Une bonne concordance est trouvée entre le modèle et l'expérimentation. Le nombre de cycles à rupture d'un type de composant est relié à la déformation plastique maximale dans la bille de brasure. Cette déformation et l'équation associée permettent de retrouver des tendances effectivement observées lors de tests de chute. A partir de cette validation par l'expérience un certain nombre de paramètres sont étudiés :

- Des paramètres géométriques permettant d'optimiser l'emploi de ce type de boîtier électronique (*i.e.* laisser de l'espace pour les fonctions électroniques tout en maintenant un niveau de fiabilité minimum)
- Des paramètres matériaux qui évoluent en fonction des réglementations (par exemple pour bannir le Pb) ou encore une fois pour améliorer la tenue mécanique des composants

Parmi les paramètres étudiés certains, comme le diamètre du plot d'aluminium, se révèlent peu influents d'un point de vue numérique. En conséquence des axes d'améliorations plus prometteurs sont à envisager par la suite. Les perspectives qui se dégagent concernant ce modèle de prédiction de la durée de vie des composants WL-CSP se répartissent en deux axes :

- D'une part l'amélioration du modèle lui-même, avec la prise en compte de la plasticité du plot d'aluminium, la prise en compte de la décohésion observée entre certaines couches ou encore l'utilisation d'un modèle de fatigue plus complexe (ce dernier pourrait par exemple séparer le temps d'initiation et le temps de propagation des

4.3. CONCLUSIONS SUR LE MODÈLE NUMÉRIQUE ET PERSPECTIVES

fissures)

- D'autre part ce modèle peut être utilisé pour évaluer l'influence de solutions technologiques en cours de développement telles que l'utilisation d'une résine moulée autour des billes.

Conclusion

Les résultats des travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre plus général de l'amélioration de la fiabilité de composants électroniques de type WL-CSP. Les contraintes de temps, de coûts et de ressources en générale justifient un emploi de plus en plus étendu de la simulation numérique. Les efforts ont donc porté sur le développement de ce modèle numérique, dans l'optique de pouvoir faire varier :

- Des paramètres de test,
- Des paramètres matériaux,
- Des paramètres géométriques.

Pour réaliser cela, la stratégie mise en place s'articule autour de trois étapes. La première de ces étapes a été d'approfondir la connaissance sur les matériaux constituant le composant et le circuit imprimé. Des mesures de caractérisation par analyse mécanique dynamique (DMA) ont été possibles sur plusieurs conceptions de circuits imprimés ainsi que sur les alliages des billes de brasure. Un procédé de fabrication des éprouvettes a été développé pour pouvoir étudier ces alliages de brasures en SnAgCu. Les autres matériaux constituant les composants électroniques sont très fins, de l'ordre du micromètre ou moins. La nanoindentation a été utilisée car il s'agit d'une technique qui permet de travailler sur de telles épaisseurs. Cette technique a permis de déterminer le module d'Young de plusieurs passivations. D'autre part, une analyse des courbes de charge-décharge et l'observation des empreintes d'indentations ont montré le comportement particulier des métallisations en aluminium. Ce comportement particulier est attribué à leur grand niveau de pureté ainsi qu'à un comportement de type visqueux. Ces différences de comportements ont servi de base pour comparer qualitativement deux alliages à base d'aluminium et l'effet de différentes conditions de dépôts. La deuxième étape a consisté à étudier les essais mécaniques de chute et de flexion et à analyser les fissures sur les composants. Les analyses par microsections ont montré que, consécutivement à l'essai de chute, les fissures sont initiées dans la passivation puis se propagent soit à une interface, soit dans la métallisation en aluminium ou dans les intermétalliques. Un faciès de rupture a montré après l'essai de chute des stries de fatigue au niveau de la passivation. L'essai de flexion a porté sur la structure nommée « Techno C », le chemin de propagation des fissures varie moins que pour l'essai de chute. Celles-ci sont initiées dans la passivation, puis elles se propagent à l'interface entre l'aluminium et l'oxyde de silicium et, parfois, dans l'aluminium lui-même. En complément de ces analyses, des essais de cisaillement ont été menés. Ces expériences ont montré que les essais de cisaillement ne peuvent pas fournir une indication de la durée de vie des composants. De plus, l'étude des outils statistiques montre que la durée de vie (paramètre η de la distribution de Weibull) constitue le critère le plus pertinent pour la

CONCLUSION

simulation numérique. Une tendance peut être dégagée pour déterminer un temps d'initiation et un temps de propagation si la taille d'échantillon et la structure permettent une distribution de Weibull à 3-paramètres. La 3ème et dernière étape a consisté à modéliser le comportement des composants montés sur circuits imprimés. Un ensemble d'hypothèses a été posé, celles-ci étant justifiées soit par des éléments de l'état de l'art soit par des calculs pour évaluer leurs influences. Ces hypothèses portent notamment sur la modélisation du comportement des matériaux. En particulier, un comportement élasto-plastique isotrope a été attribué aux métallisations, sur la base notamment des mesures DMA dans le cas des brasures. Un modèle de fatigue a été choisi pour corréler les résultats des calculs numériques avec les données statistiques des performances des WL-CSP. Ce modèle de fatigue contient des constantes déterminées avec les durées de vie de plusieurs cas de références. Enfin, la simulation et le modèle de fatigue ont été utilisés conjointement pour évaluer l'influence de plusieurs paramètres matériaux et géométriques.

Les perspectives concernant la modélisation sont nombreuses et se répartissent selon deux axes : exploitation du modèle mis en place ou approfondissement de celui-ci. L'exploitation du modèle vise à améliorer la fiabilité des composants, on peut par exemple évaluer :

- De nouveaux alliages de billes,
- D'autres propriétés matériaux,
- Des caractéristiques géométriques actuellement envisagées.

L'approfondissement du modèle peut passer par les points suivants :

- Prise en compte du comportement élasto-plastique de la métallisation en aluminium,
- Corrélation avec le 3ème paramètre de la distribution de Weibull, selon les résultats.

Un modèle analogue pour l'essai de flexion est également envisagé. Celui devrait se baser sur les essais de flexion pour choisir ou établir le modèle de fatigue le plus approprié ainsi que poser les hypothèses adéquates pour le modèle numérique.

Annexes

Annexe A

Annexe 1 : Comparaisons entre PCB

En raison du contexte industriel et de l'historique du test de chute certains paramètres des PCB ont changé, tels que :

- La référence qui est soit ST soit Client (influence sur la répartition du cuivre),
- Le design qui dépend de l'organisation des puces (par exemple du 5x5) ainsi que du pitch,
- Le fournisseur, Aspocomp ou Ibiden.

Les résultats qui suivent ont pour objectif de mesurer l'écart relatif entre :

1. Les différentes parties du circuit imprimé, de manière à connaître l'écart entre la réalité et l'hypothèse d'un matériau homogène,
2. Plusieurs modèles, pour trouver par la suite un éventuel lien avec la tenue mécanique.

Un board Ibiden référence Client 5x5 pitch 500 μm est découpé en 6 zones selon le schéma ci-dessous.

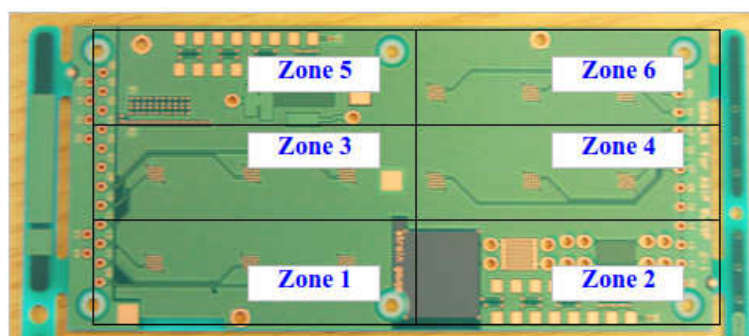


FIG. A.1 – Schéma de découpe du PCB Client

En moyenne, la rigidité du circuit imprimé est comprise en 22 GPa et 23 GPa. Le module dans la 6ème zone est significativement plus faible en raison de percages dans la structure. Au contraire, la 1ère zone est plus rigide que la moyenne car la densité de cuivre est plus élevée. Cette asymétrie est la principale cause d'hétérogénéité dans le PCB et provoque son gauchissement lorsqu'il est soumis à une forte accélération ; elle pourra être étudiée par la suite pour comprendre son influence sur la durée de vie des puces.

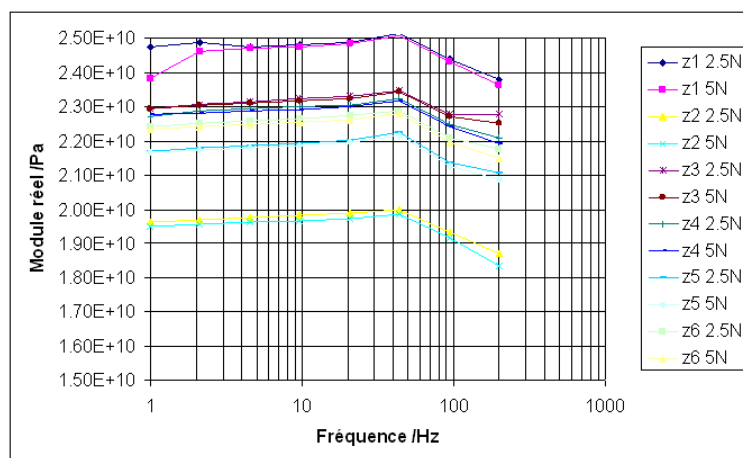


FIG. A.2 – Caractérisation du module réduit pour le PCB Client pitch 500 μm en fonction de la zone étudiée et pour deux forces de sollicitation dynamique

Note : Les représentations graphiques de durée de vie (distributions de Weibull) sont basées sur le fait que les 4 puces centrales subissent le même niveau et le même type de contraintes.

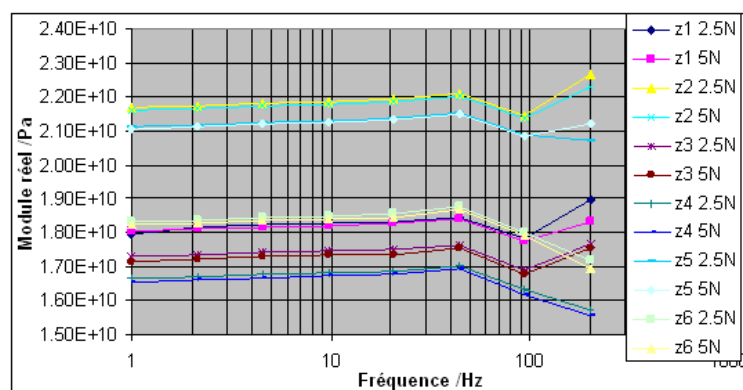


FIG. A.3 – Caractérisation du module réduit pour le PCB ST Microelectronics pitch 500 μm en fonction de la zone étudiée et pour deux forces de sollicitation dynamique

Dans le cas des circuits fabriqués en interne, deux cas bien distincts se présentent :

- Les zones 2 et 5 qui possèdent un module E_r compris entre 21 GPa et 22 GPa
- Les zones 1, 3, 4 et 6 pour lesquelles E_r est situé entre 16 GPa et 19 GPa

A partir de ces résultats on observe plusieurs tendances :

- Le PCB Ibiden pitch 500 est nettement plus rigide – au globale – que les autres,
- Les boards Aspocomp ont en moyenne un module plus faible,
- Il n'y a pas de différence entre un Ibiden design Client et un Ibiden design ST pitch 400 alors que ces deux références sont très différentes en pitch 500.

Découpage selon ε_{yy} .

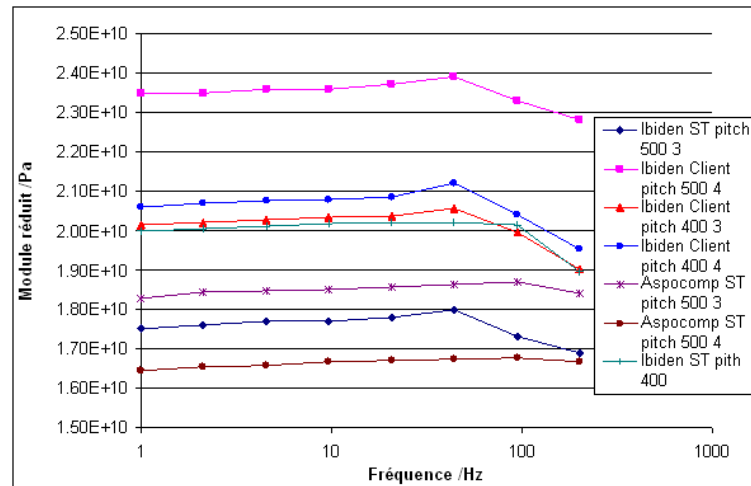


FIG. A.4 – Comparaison des PCB en fonction du design, du fournisseur et de la référence

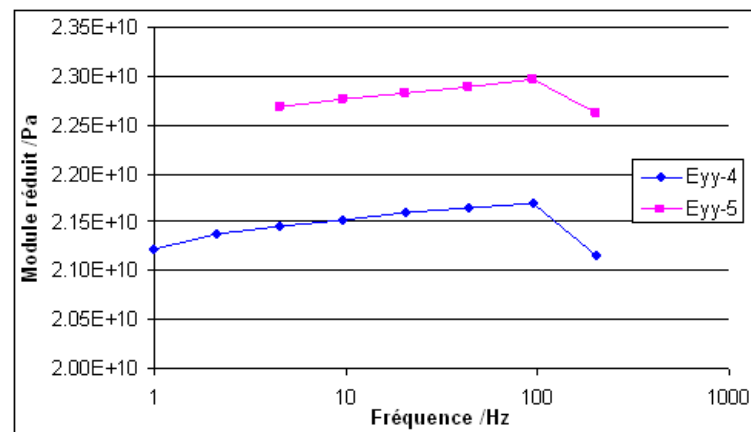


FIG. A.5 – Découpage d'un PCB Client pitch 500 perpendiculairement au découpage précédent

Annexe B

Annexe 2 : Fabrication des éprouvettes métalliques

Afin de rester dans le domaine de raideur du visco-analyseur la section doit être faible (module élevé) et la forme doit être élancée. La forme en « os à chien » permet une bonne tenue au niveau de mors tout en reportant la contrainte au centre de l'éprouvette plutôt qu'à l'interface mors/métal. C'est pourquoi les dimensions retenues sont les suivantes :

- Hauteur = 25 mm
- Largeur = 2 mm
- Epaisseur = 0.6 mm

Sa fabrication a lieu dans un moule en graphite qui permet de ne pas utiliser de produit pour démouler. On procède selon les étapes suivantes :

- Etalement de flux sur le graphite pour faciliter la fusion de l'alliage et limiter l'oxydation Versement des billes de SnAgCu dans le moule.
- Application d'une masse (en graphite) sur l'ensemble afin d'éviter que le métal ne « démouille » (sous forme liquide les billes tendent fortement à se regrouper pour limiter la surface de contact avec le moule).
- Pour le suivi en température un thermocouple est glissé dans un perçage, dans le moule.
- Passage dans le four sous atmosphère neutre (N₂H₂).



FIG. B.1 – Moule graphite



FIG. B.2 – Eprouvette moulée vue aux Rayons X

Annexe C

Annexe 3 : Procédure de retrait pour nano-indentation

Retraits effectués par le LAT.

Avant retrait :

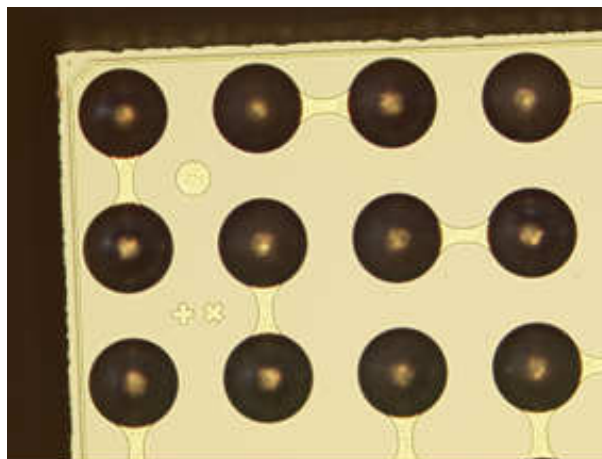


FIG. C.1 – Techno B

Retrait brasure 1 : Retrait avec acide acétique et ultrasons pendant 4 heures.

Retrait passivation 1 : Retrait avec attaque plasma. Nettoyage avec O₂ 20 cm³/min et 40 W durant 2 minutes. Retrait USG-PSG avec CHF₃ 15 cm³/mn et 25 W pendant 20 minutes.

Retrait métal 1 : Retrait par attaque plasma. Nettoyage avec O₂ à 20 cm³/mn et 40 W pendant 2 minutes. Retrait du SiN avec SF₆ à 50 cm³/mn et 70 W pendant 25 minutes.

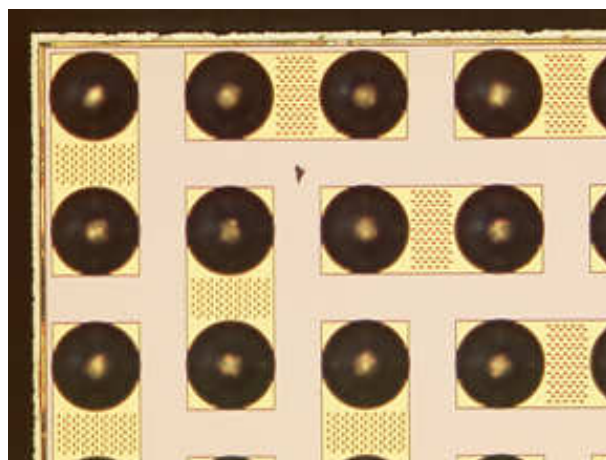


FIG. C.2 – Techno D

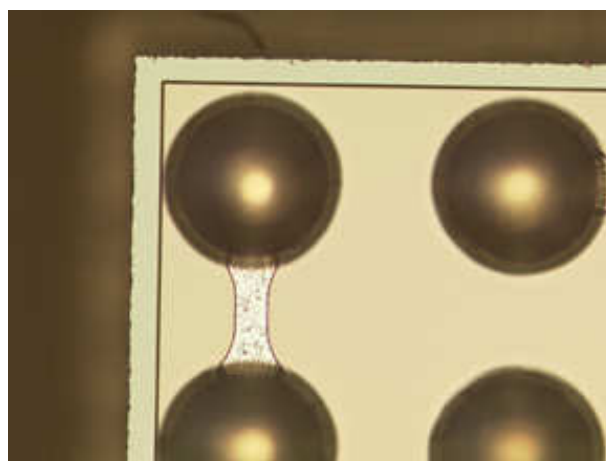


FIG. C.3 – Techno C

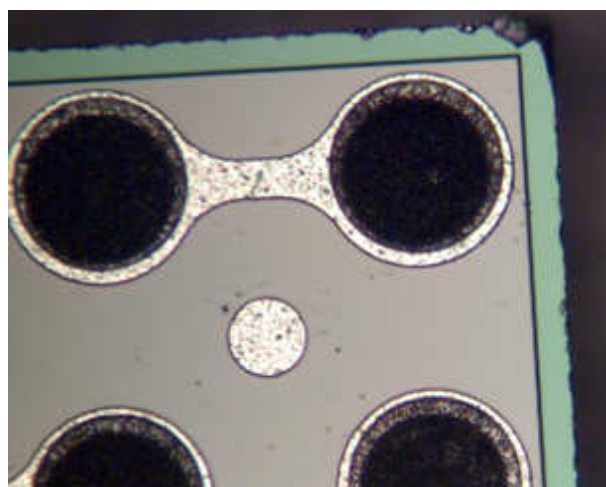


FIG. C.4 – Techno C

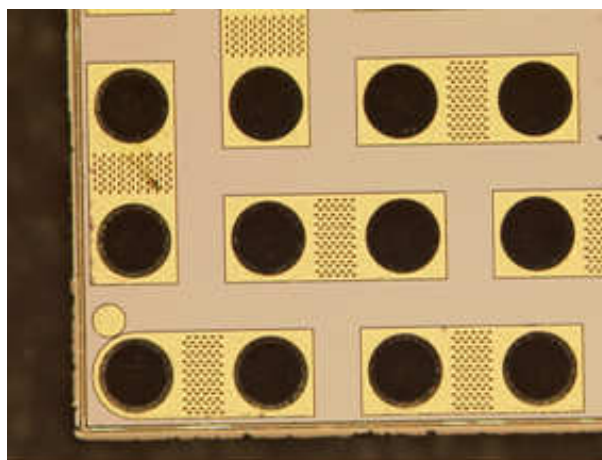


FIG. C.5 – Techno D

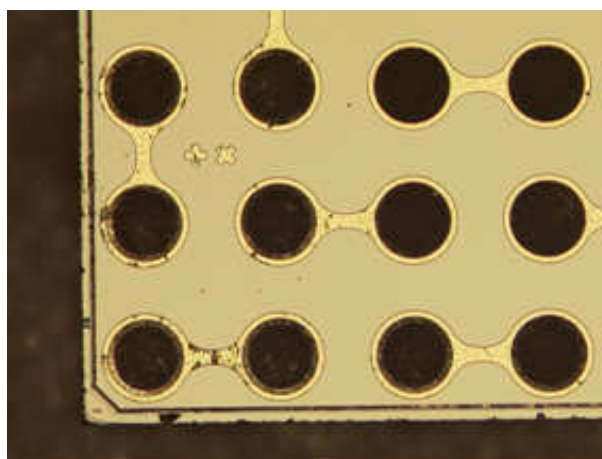


FIG. C.6 – Techno B

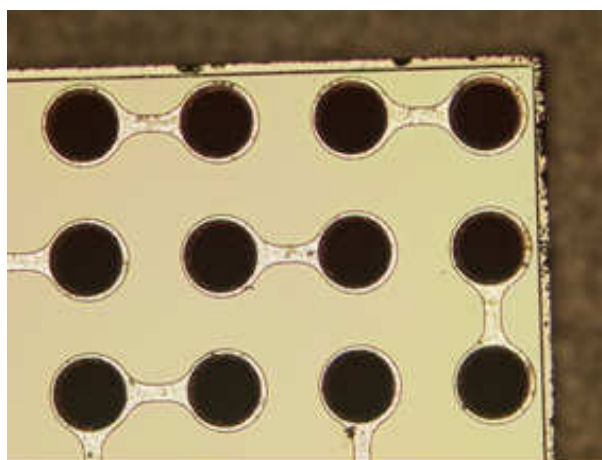


FIG. C.7 – Techno B

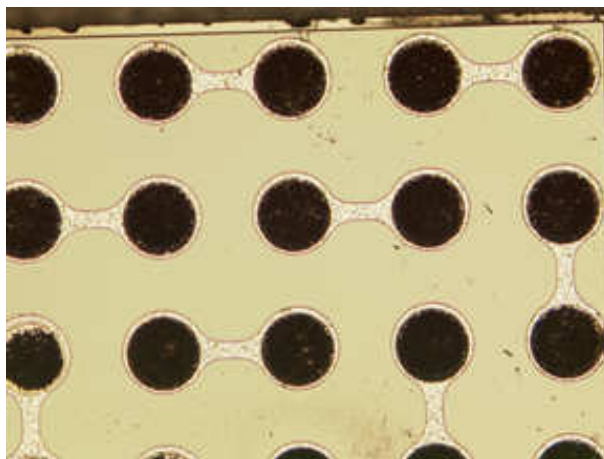


FIG. C.8 – Techno C

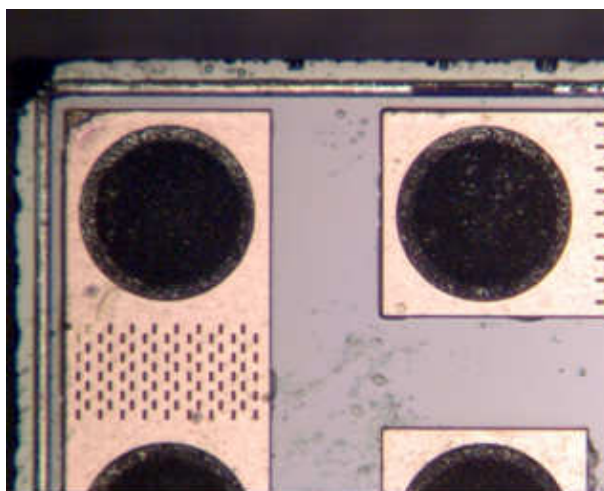


FIG. C.9 – Vérification du retrait par tests électriques sur les pistes.

Annexe D

Annexe 4 : Observations sur métallisations Al et Al-Cu

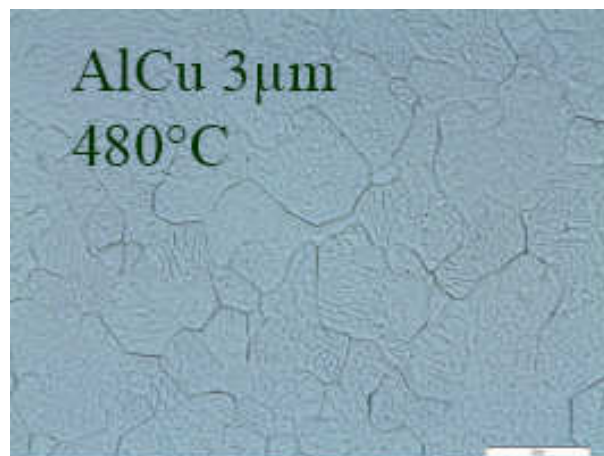


FIG. D.1 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C

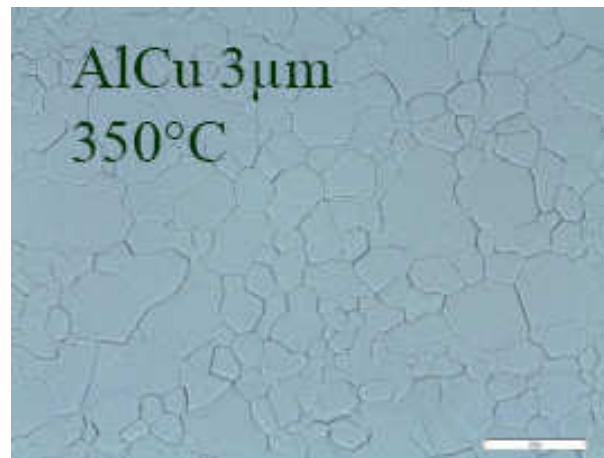


FIG. D.2 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C



FIG. D.3 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C et ayant vu le budget thermique de la passivation

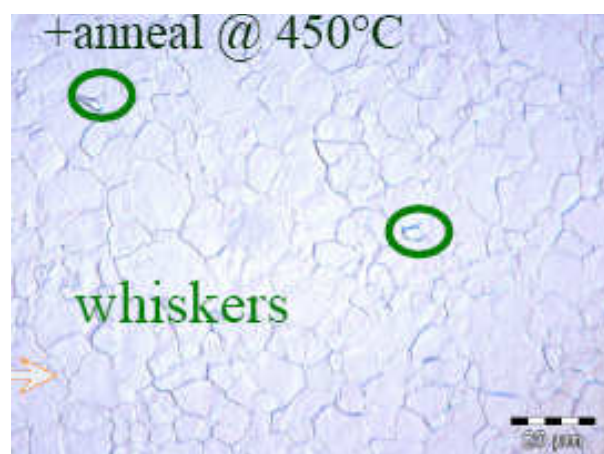


FIG. D.4 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C et recuit à 450 °C

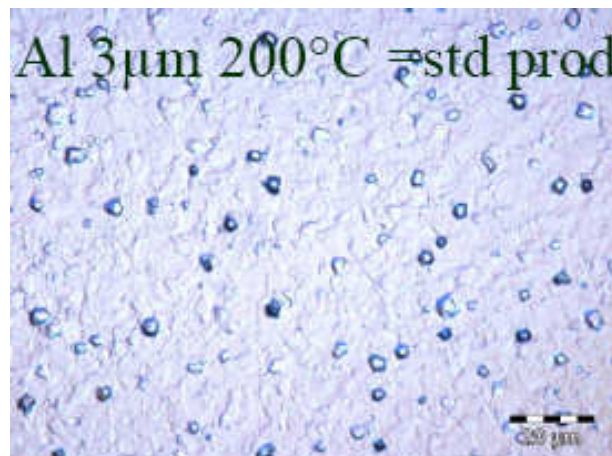


FIG. D.5 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 200 °C

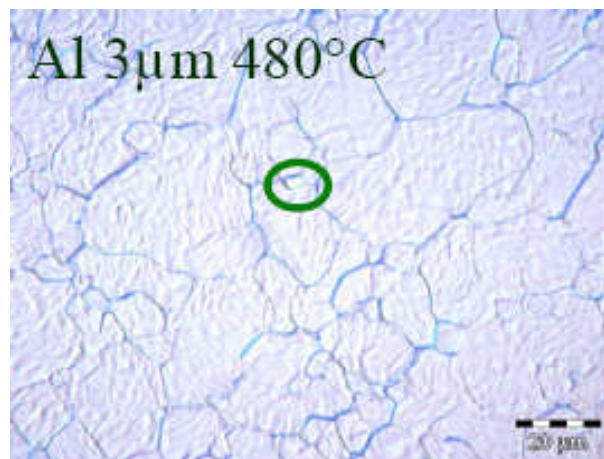


FIG. D.6 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C

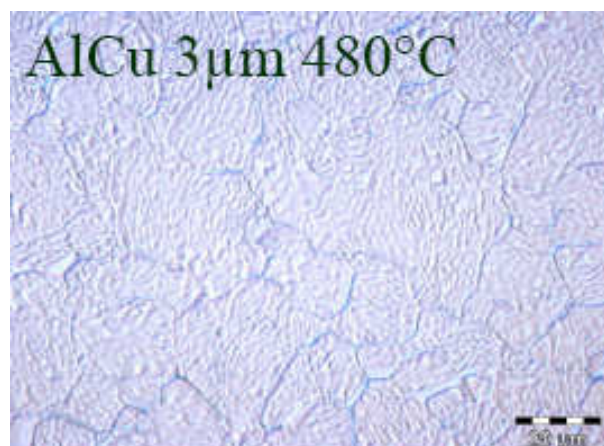


FIG. D.7 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 480 °C recuit à 450 °

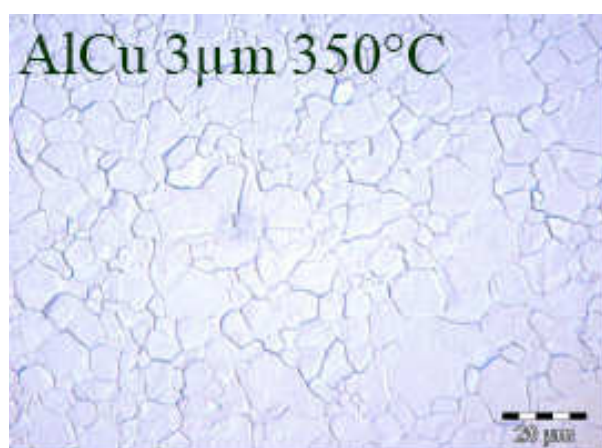


FIG. D.8 – AlCu d'épaisseur 3 μm déposé à 350 °C recuit à 450 °

Annexe E

Annexe 5 : Distributions de Weibull

Essais de répétabilité à 1N, 1Hz avec le système d'enregistrement analogique , 3 populations de 25 pièces.

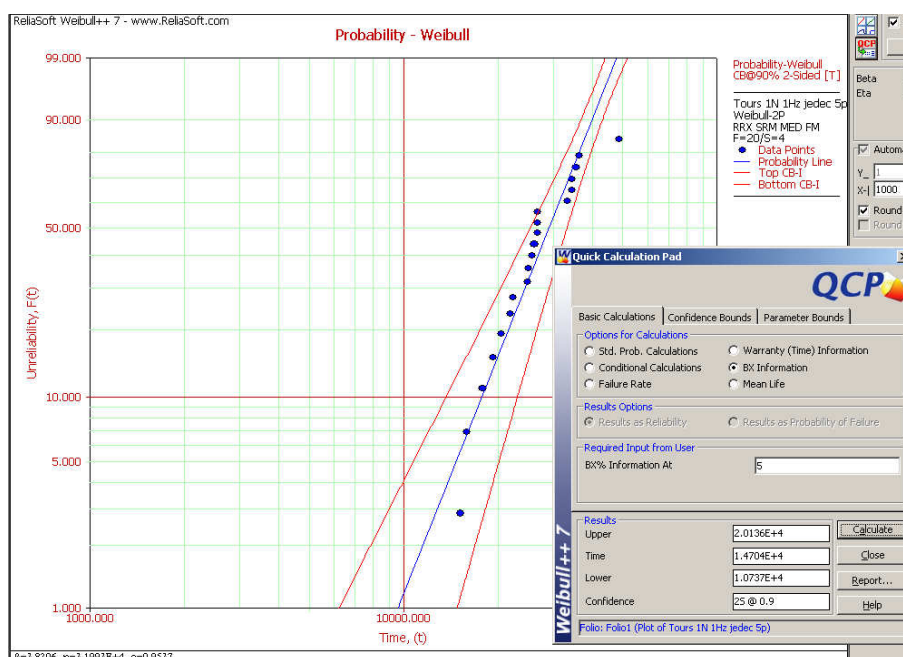


FIG. E.1 – Essai de répétabilité du test de flexion dans les conditions JEDEC avec 1 N de pré-charge et une fréquence de sollicitation de 1 Hz

Les 3 figures suivantes présentent les mêmes distributions mais avec les intervalles de confiance à 90 % ainsi que le nombre de chute à 5 % de défaillance sur l'intervalle de confiance inférieur. Note : la valeur à 5 % ne peut être obtenue que pour une distribution à la fois avec le logiciel Weibull++

ANNEXE 5 : DISTRIBUTIONS DE WEIBULL

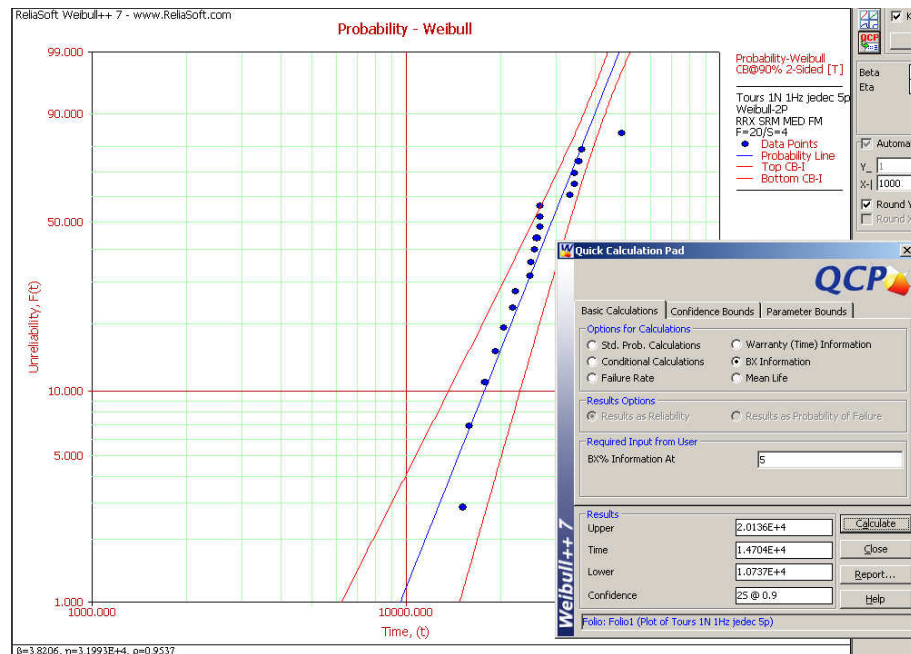


FIG. E.2 – Distribution 1 avec les intervalles de confiance

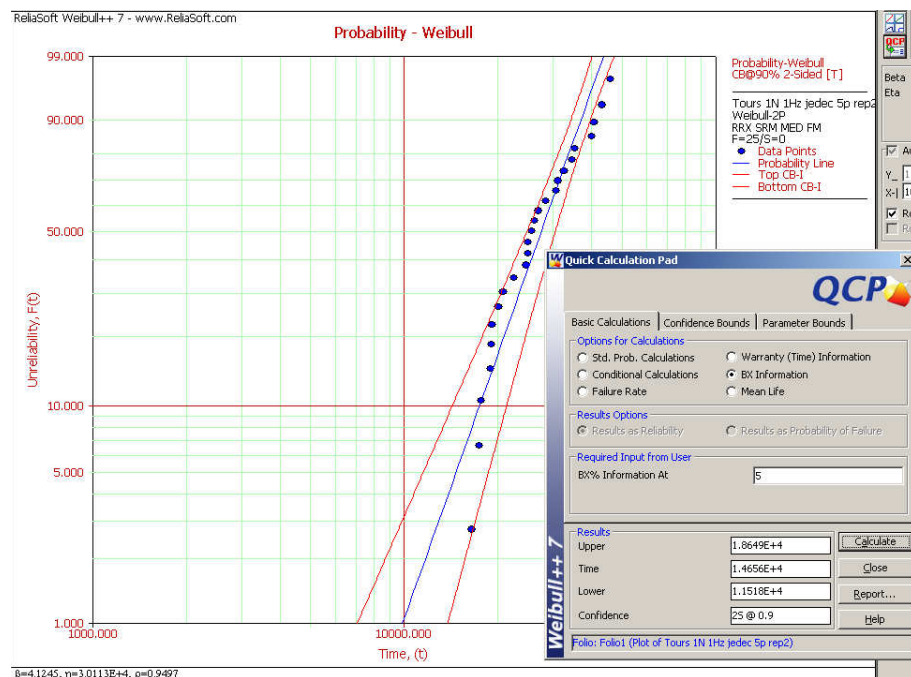


FIG. E.3 – Distribution 2 avec les intervalles de confiance

ANNEXE 5 : DISTRIBUTIONS DE WEIBULL

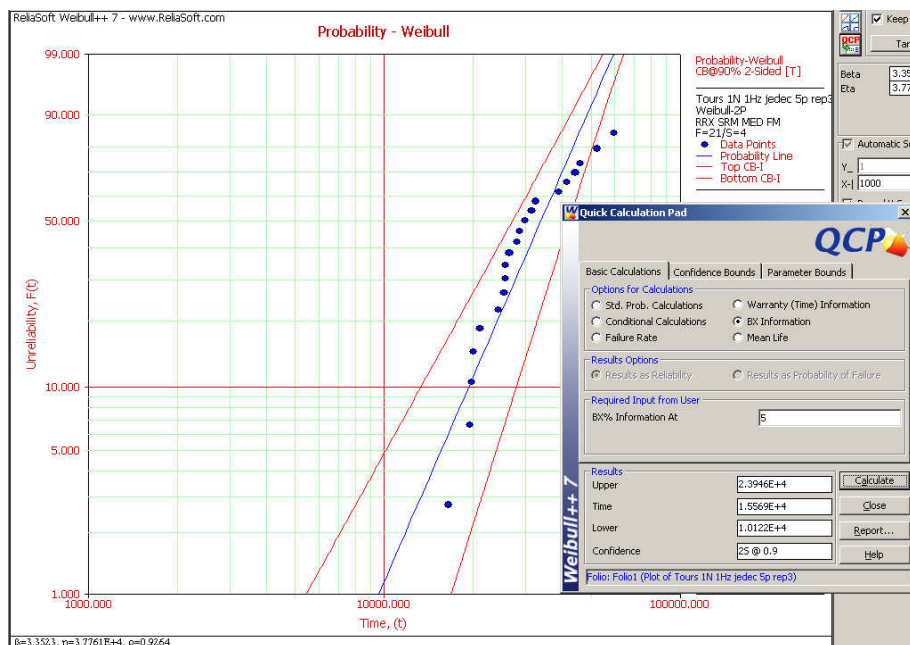


FIG. E.4 – Distribution 3 avec les intervalles de confiance

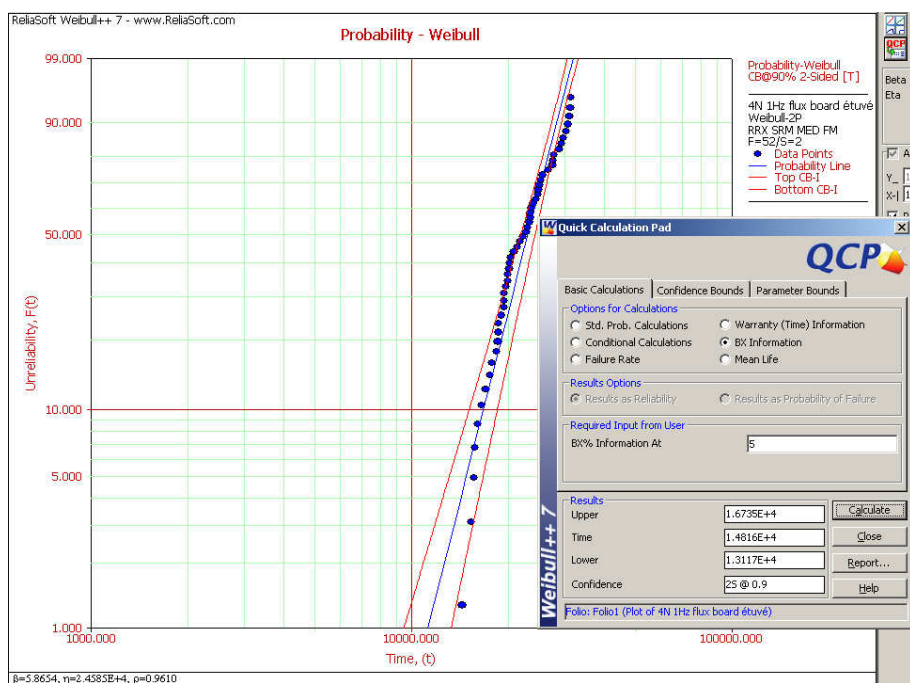


FIG. E.5 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 13117 cycles

ANNEXE 5 : DISTRIBUTIONS DE WEIBULL

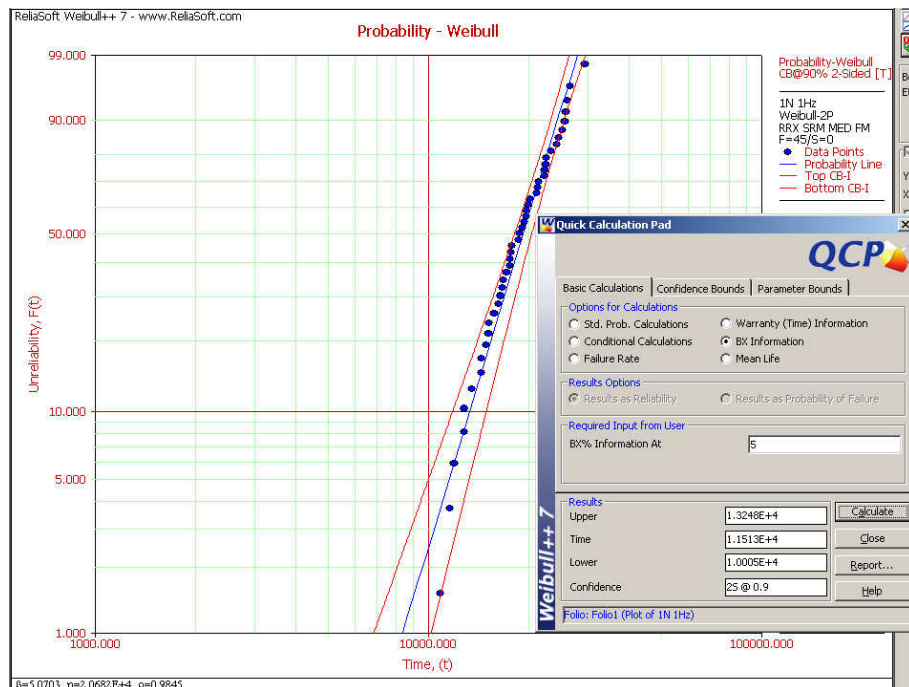


FIG. E.6 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 1 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10005 cycles

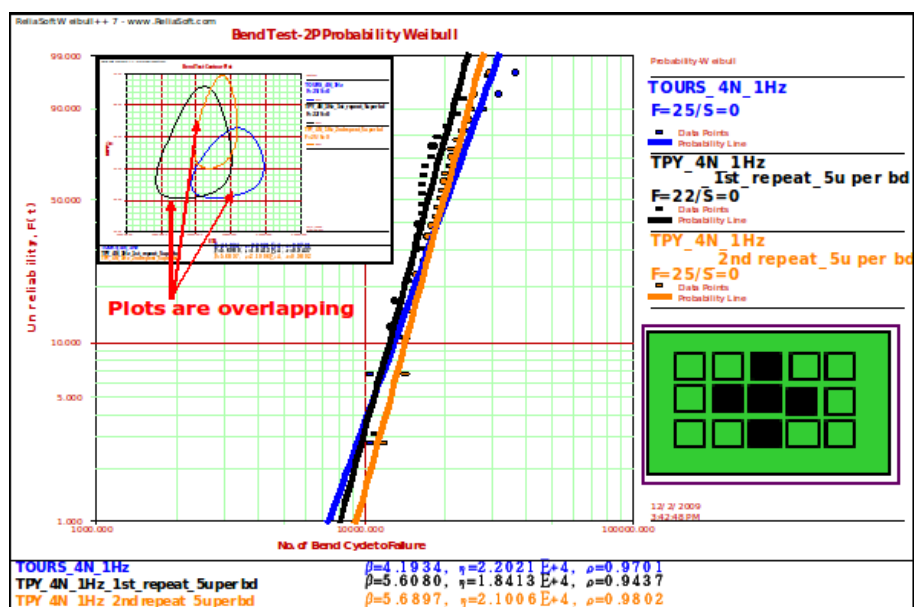


FIG. E.7 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, enregistreur

ANNEXE 5 : DISTRIBUTIONS DE WEIBULL

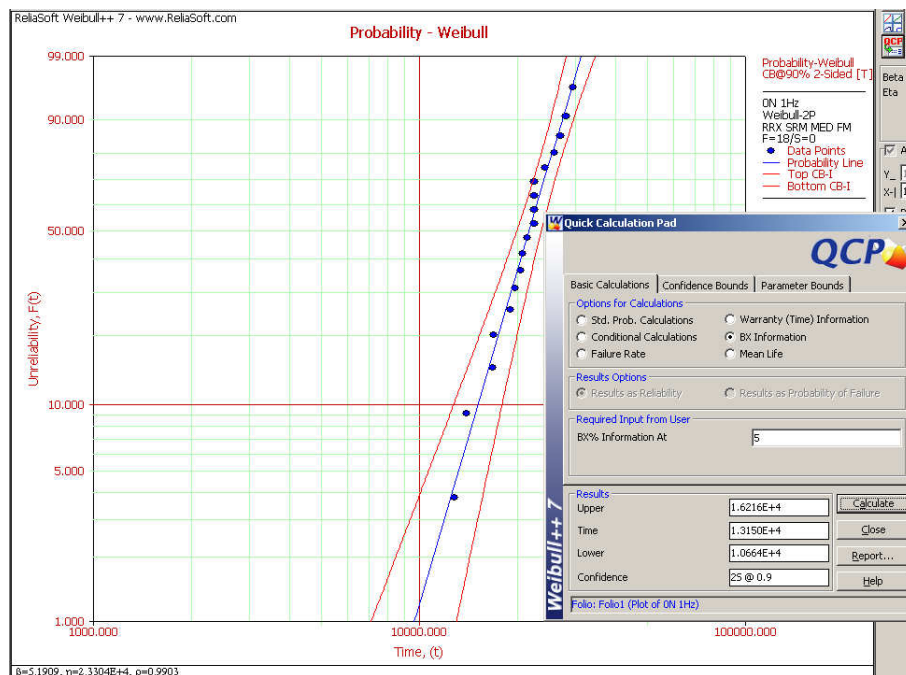


FIG. E.8 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 0 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10664 cycles

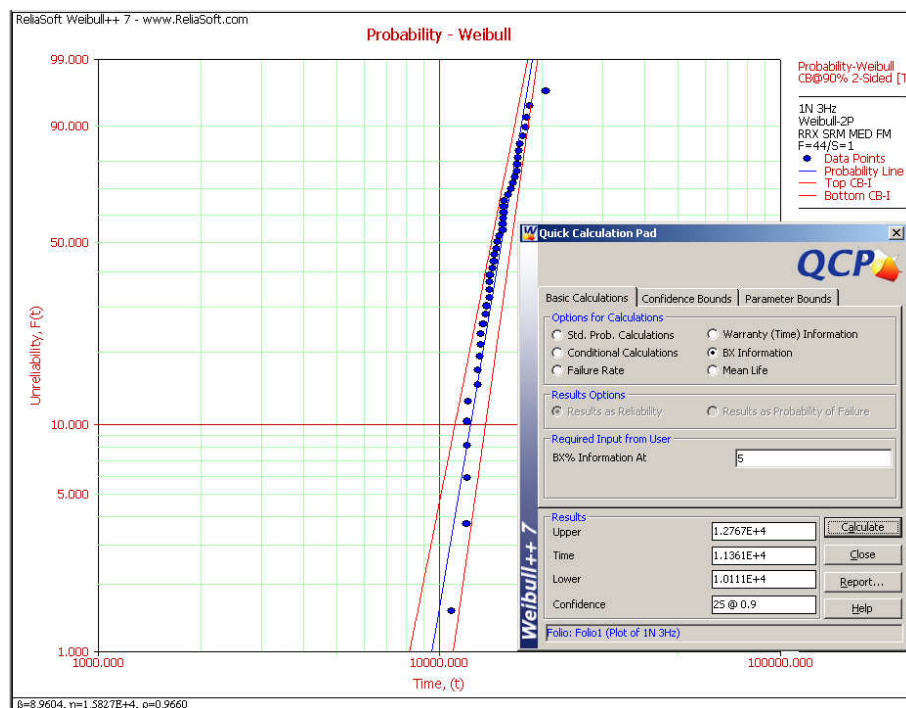


FIG. E.9 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 1 N, fréquence 3 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 10111 cycles

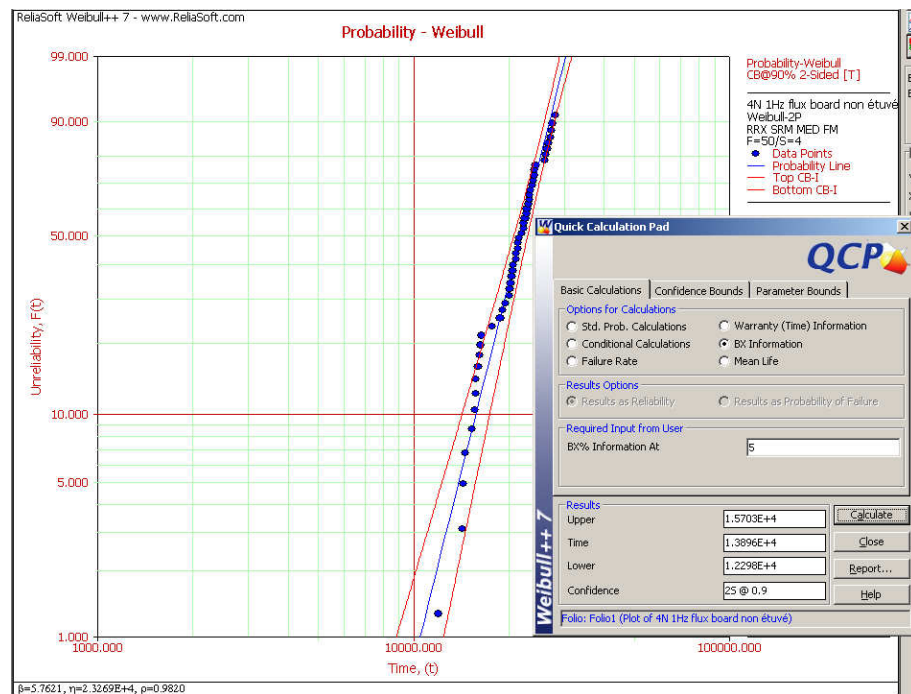


FIG. E.10 – Essai de flexion, conditions JEDEC, pré-charge 4 N, fréquence 1 Hz, détecteur d'événement avec intervalle de confiance et LCB à 5 % = 12298 cycles et assemblage par flux

Annexe F

Annexe 6 : Notions de fiabilité

F.0.1 Définition

Aussi appelée « Fonction de survie », la fonction de fiabilité décrit la probabilité qu'un dispositif n'ait pas de défaillance en fonction du temps [72].

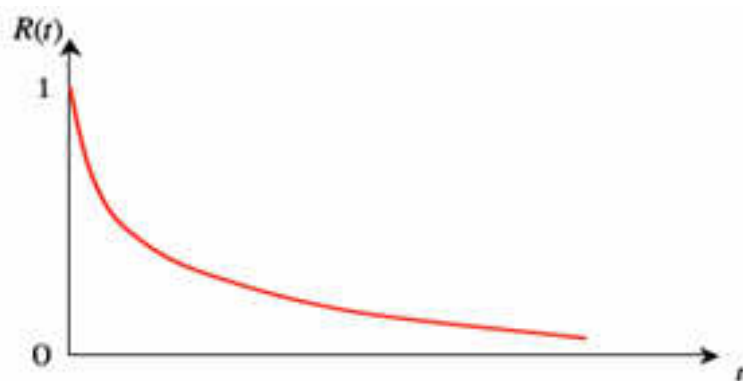


FIG. F.1 – Fonction de fiabilité

En pratique on mesure plutôt la probabilité de défaillance $P(t) = 1 - R(t)$ à la sollicitation. Les principales lois utilisées en fiabilité sont :

- Loi exponentielle,
- Loi normale (Laplace-Gauss),
- Loi Lognormal (Galton),
- Loi de Weibull.

La densité de probabilité de la loi exponentielle est :

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda.t) R(t) = \exp(-\lambda.t) \quad (\text{F.1})$$

Sa principale propriété est d'être sans mémoire : après un temps t de fonctionnement sans panne, l'objet étudié a la même probabilité de survie qu'au départ. On dit qu'il est « comme neuf ». La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. Elle est utilisée pour représenter la distribution des

durées de vie des dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. Sa densité de probabilité (*pdf*) s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{F.2})$$

μ est la moyenne et σ est l'écart-type. La loi Lognormale est largement utilisée pour modéliser des durées de vie et en particulier des défaillances par fatigue en mécanique. Une variable est distribuée selon une loi lognormale si son logarithme népérien est distribué selon une loi normale :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma.t\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{F.3})$$

Le domaine de définition n'étant jamais négatif, il n'y a aucune limitation à l'emploi de la distribution lognormale en fiabilité. La loi de Weibull est utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique, etc.). Elle permet en particulier de modéliser de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans les 3 phases de vie : jeunesse, vie utile et période d'usure ou de vieillissement. Dans sa forme la plus générale la loi de Weibull dépend de 3 paramètres et sa densité de probabilité (*pdf*) s'écrit :

$$f(t) = \frac{\eta}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right) \quad (\text{F.4})$$

β est le facteur de forme, η le facteur d'échelle et γ le paramètre de position. Si $\beta < 1$ alors le taux de défaillance est décroissant (période de jeunesse), si $\beta = 1$ ce taux est constant (vie utile) et pour $\beta > 1$ il est croissant.

F.0.2 Spécificités de la fiabilité en mécanique

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la *courbe en baignoire* (« bathtub curve »). On rappelle que le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de vieillissement (taux de défaillance croissant).

De nombreux éléments tels que les composants électroniques ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière là. Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la figure F.2; la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps, et ceci dans chaque phase de sa vie comme l'illustre la figure F.2.

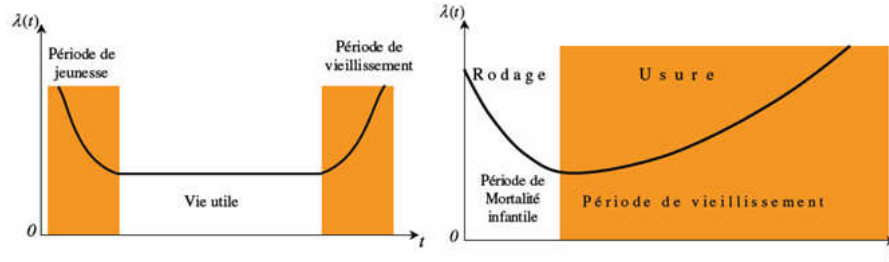


FIG. F.2 – Comparaison de l'évolution du taux de défaillance en électronique (à gauche) et en mécanique (à droite)

F.0.3 Fiabilité à l'échelle d'un système

La détermination de la fiabilité d'un système (électronique ou mécanique) nécessite de connaître la loi de fiabilité de chacun des composants intervenant dans le système. La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits « responsables » ou « critiques » contribuant presque totalement à la probabilité de défaillance de l'ensemble. La fiabilité $R(t)$ d'un système mécanique non réparable est le produit des fiabilités des composants « critiques », la défaillance de l'un de ces éléments entraîne la défaillance du système :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (\text{F.5})$$

Le taux de défaillance $\Lambda(t)$ du système est approximativement égal à la somme des taux de défaillance individuels :

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (\text{F.6})$$

Ainsi, avec la connaissance de $R(t)$ pour chacun des éléments, on peut en déduire la tenue mécanique de l'ensemble. Cet aspect peut se révéler intéressant dans le cas du test de chute puisque l'on observe la rupture d'une minorité de matériaux dans la structure : en général la passivation est craquée ainsi qu'une couche métallique. Ainsi on pourrait exprimer notre système comme la combinaison de la fiabilité des éléments suivants : bille, passivation, couche d'adhésion et plot métallique. A ceci pourrait éventuellement s'ajouter la tenue de la piste de cuivre côté circuit imprimé.

F.0.4 Statistique appliquée à l'essai de chute

Il s'agit d'un cas particulier de la statistique de Weibull : une modélisation à 2 paramètres, donc pour laquelle $\gamma = 0$. Si on revient à l'équation de sa densité de probabilité, alors cela revient à supposer $t \gg \gamma$, autrement dit le temps d'initiation est petit devant le

nombre de chutes (ou inexistant). Sur les graphiques ci-dessous, *pdf* signifie Probability Density Function : fonction de densité de probabilité.

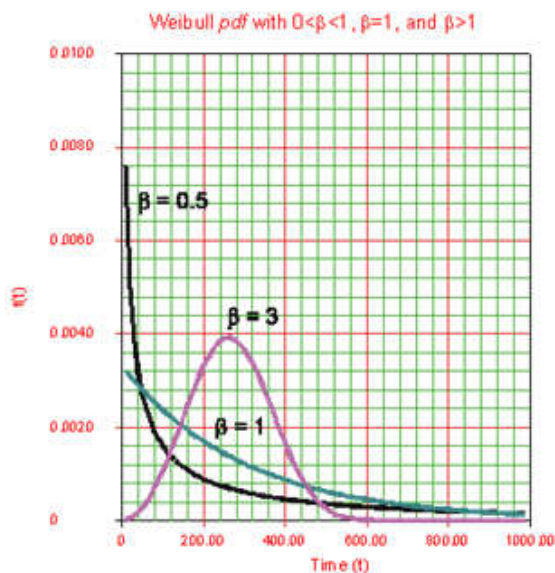


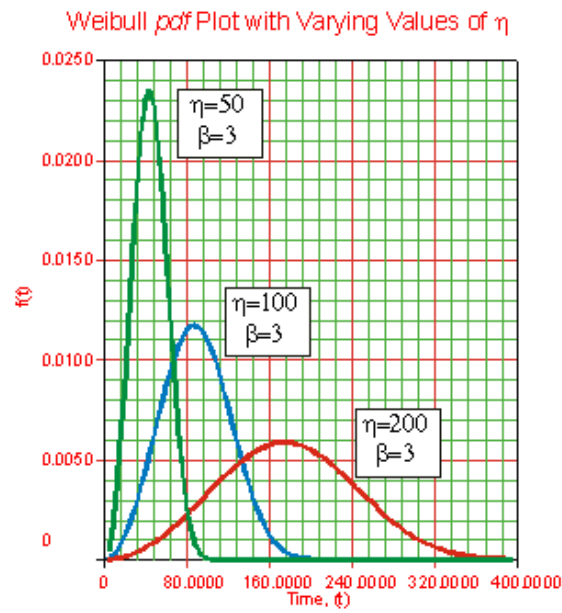
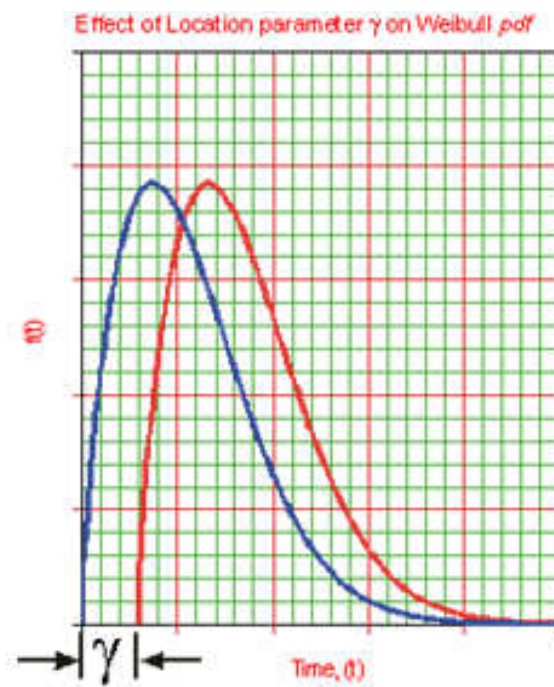
FIG. F.3 – Effet du facteur de forme β sur la densité de probabilité

Quand $\gamma = 0$ la distribution démarre à $t = 0$, l'origine. Ce paramètre apporte une estimation du temps à la rupture le plus tôt. S'il est négatif, alors cela peut indiquer que les défauts sont apparus avant le début du test, c'est-à-dire durant la production, en stockage, en transit par exemple. Il a la même unité que t , c'est-à-dire un nombre de chutes ou de cycles de flexion. La fonction du taux de défaillance dans le cas du test de chute est calculée par la méthode « du maximum de vraisemblance » (Maximum Likelihood) et ajustée selon l'axe horizontal (RRX) tandis que les calculs avec le logiciel Excel sont plus simplement effectués selon l'axe vertical (RRY). Les arguments physiques derrière la statistique de Weibull sont les suivants :

- Cette distribution peut modéliser des temps de défaillances dans le cas où plusieurs mécanismes de dégradation sont en compétition et le 1er correspond au temps à la défaillance observé
- Il existe de nombreux cas pour lesquels le défaut a lieu au niveau du maillon faible parmi un grand nombre de processus de dégradation

Une propriété intéressante de ce type d'analyse est que l'on peut distinguer plusieurs populations. Ces populations peuvent se distinguer soit par le mode de dégradation, soit par le niveau de contrainte.

Dans le cas où deux sous-populations apparaissent, il faut alors utiliser un modèle à 5 paramètres. Si deux modes de défaillances différents apparaissent, alors les 2 segments de droite doivent présenter 2 pentes distinctes. Une Weibull à 3 paramètres présente une courbure caractéristique. Cette courbure est plus ou moins marquée en fonction des 2 paramètres (η, β) . et du nombre de points constituant l'échantillon statistique. Ainsi, la courbure peut être très nette avec 40 points ou peu apparente avec 200 points.

FIG. F.4 – Effet du facteur d'échelle η sur la *pdf*FIG. F.5 – Effet du paramètre de position γ sur la *pdf*

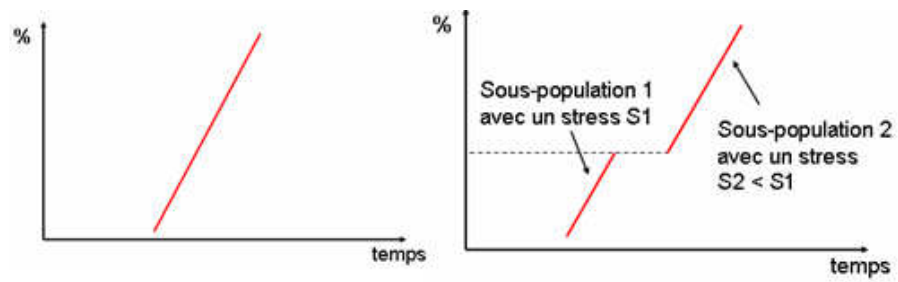


FIG. F.6 – Taux de défaillance dans le cas d'une seule population a) Un seul niveau de contraintes – b) Taux de défaillance dans le cas de deux niveaux de contraintes

Annexe G

Annexe 7 : Grandeurs utilisées pour estimer la durée de vie des WL-CSP

Grandeurs utilisées

Lorsqu'un modèle est uni-axial, alors la comparaison des contraintes et déformations avec une valeur seuil est instantanée. Par contre, dès lors qu'il y a plus d'une composante, celles-ci doivent être combinées en un seul nombre pour permettre une comparaison. Cette partie présente la méthode utilisée pour effectuer cette combinaison. Cette partie est relative aux relations pour les matériaux aux propriétés linéaires [71]. Ces relations permettent de définir le calcul des déformations équivalentes utilisées par la suite. La contrainte est reliée aux déformations par la relation :

$$\sigma = [D]\varepsilon^{el} \quad (G.1)$$

Où σ est le vecteur des contraintes tel que $[\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$. $[D]$ est matrice de rigidité élastique ou matrice d'élasticité. ε^{el} est le vecteur de déformation élastique, celui-ci est assimilé au vecteur de déformation totale. $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T$. Les déformations de cisaillement sont les déformations au sens de l'ingénieur, c'est-à-dire deux fois les déformations du tenseur de cisaillement.

L'équation initiale peut aussi être inversée :

$$\varepsilon^{el} = [D]^{-1}\sigma \quad (G.2)$$

$[D]^{-1}$ est la matrice de complaisance et peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_z} & \frac{-\nu_{yz}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix}$$

Les termes de la matrice sont :

- E_x module d'Young dans la direction x
- ν_{xy} coefficient de Poisson
- G_{xy} module de cisaillement dans le plan (x,y)

La matrice $[D]^{-1}$ est supposée symétrique. Dans le cas d'un matériau isotrope, on considère la relation suivante :

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x}{2 \times (1 + \nu_{xy})} \quad (\text{G.3})$$

La matrice $[D]$ doit être définie positive, lors d'un calcul le programme ANSYS vérifie pour chaque propriété matériau que celle-ci est effectivement définie positive. Les déformations principales sont calculées à partir des composantes de la déformation, suivant l'équation cubique :

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon_0 & \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \varepsilon_y - \varepsilon_0 & \frac{1}{2}\varepsilon_{yz} \\ \frac{1}{2}\varepsilon_{xy} & \frac{1}{2}\varepsilon_{xz} & \varepsilon_z - \varepsilon_0 \end{vmatrix} = 0$$

ε_0 sont les déformations principales solutions de cette équation, elles sont ensuite nommées $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ et ε_3 . A partir de ces 3 valeurs, on peut définir l'intensité de déformation de la façon suivante :

$$\varepsilon_I = \max(|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|, |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|, |\varepsilon_3 - \varepsilon_1|) \quad (\text{G.4})$$

La déformation équivalente au sens de Von Mises est formulée ainsi :

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1 + \nu'} \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (\text{G.5})$$

ν' est appelé "coefficient de Poisson effectif", celui-ci vaut le coefficient de Poisson effectif dans le cas de déformations élastiques et thermiques. Dans le cas de déformations plastiques, de fluage, ou hyperélastiques, ce coefficient devient 0.5. De la même manière on peut définir les contraintes principales, l'intensité de contrainte ainsi que la contrainte au sens de Von Mises. Ces grandeurs sont utilisées par la suite pour évaluer quantitativement les performances en fiabilité d'un boîtier.

Points d'intégration

Les contraintes sont évaluées aux points d'intégration. Les éléments surfaciques et volumiques fournissent normalement des résultats plus précis au niveau des nœuds et des points d'intégration. La localisation de ces données, qui incluent les contraintes mécaniques, les déformations élastiques et thermiques, les flux, peuvent être déplacées aux nœuds ou aux points d'intégration. Ceci est effectué par interpolation ou extrapolation, basé sur les fonctions de forme des éléments ou sur les fonctions de forme simplifiées données dans le tableau G.1. L'expression des fonctions de forme et leur fonction sera plus détaillée dans la partie suivante.

ANNEXE 7 : GRANDEURS UTILISÉES POUR ESTIMER LA DURÉE DE VIE DES WL-CSP

Géométrie	Nbre de points d'intégration	Fonction supposée des données
Triangle	3	$a + bs + ct$
Quadrilatères	4	$a + bs + ct + dst$
Tétraèdre	4	$a + bs + ct + dsr$
Hexaèdre	8	$a + bs + ct + dr + est + ftr + gsr + hstr$

TAB. G.1 – Variations supposées des données de contraintes

Où : a, b, c, d, e, f, g et h sont des coefficients s, t, r sont les coordonnées naturelles de l'élément

Par défaut une extrapolation est effectuée ou alors les résultats des points d'intégration sont simplement déplacés aux nœuds. Si des non-linéarités matériaux existent dans un élément, une extrapolation par les moindres carrés peut causer des imprécisions dans le calcul. Ces imprécisions sont normalement mineures pour la plasticité ou le fluage. Par défaut le logiciel Ansys utilise un nombre réduit de points d'intégration et recommande un minimum d'éléments dans l'épaisseur d'une couche. Dans le cas de la microélectronique certaines couches sont difficilement « maillables » avec plusieurs éléments dans l'épaisseur, aussi on évaluera par la suite l'influence du nombre de points d'intégration sur les résultats exploités.

Bibliographie

- [1] Nordic Electronics. *DELTA and Danish Electronics and Lights & Acoustics and The Swedish Institute of Production Engineering Research and Technical Research Center of Finland - Chapter A : Wire Bonding*. Nordic Electronics, 2000.
- [2] Tong-Yan Tee and Jing-En Luan. Modal analysis and spectrum analysis of pcb under drop impact. In *SEMICON Conference in Singapore*, 2004.
- [3] J.J.M. Zaal, W.D. van Driel, F.J.H.G. Kessels, and G.Q. Zhang. Correlating drop impact simulations with drop impact testing using high-speed camera measurements. In *9th EuroSimE International Conference*, 2008.
- [4] Yi-Shao Lai, Tong Hong Wan, Han-Hui Tsai, and Ming-Hwa R. Jen. Cyclic bending reliability of wafer-level chip-scale packages. *Journal of Electronic Reliability*, 47 :111–117, 2006.
- [5] John H. L. Pang and F. X. Che. Drop impact analysis of sn-ag-cu solder joints using dynamic high-strain rate plastic strain as the impact damage driving force. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2006.
- [6] Pradeep Lall, Sameep Gupte, Prakriti Choudhari, and Jeff Suhling. Solder joints reliability in electronics under shock and vibration using explicit finite-element sub-modeling. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 30 :74–83, 2007.
- [7] Tong-Yan Tee, Long Bin Tan, Rex Anderson, Hun Shen Ng, Jim Hee Low, Choong Peng Khoo, Robert Moody, and Boyd Rogers. Advanced analysis of wlcspp copper interconnect reliability under board level drop test. In *10th Electronics Packaging Technology Conference*, 2008.
- [8] Juha Lempinen, Aulis Tuominen, Timo Kerminen, and Ikka Tuoko. Reliability of sn/pb, sn/pb/ag, sn/ag/cu and sn/cu/ni solder joints in cyclic mechanical loading. In *International Conference on Electronic Packaging*, pages 289–292, 2006.
- [9] Ichiro HIRATA and Hirofumi NAKAMURA. Study of impact stress of csp solder joints using homogenization method and fem drop-simulation. In *International Conference on Electronic Packaging*, pages 214–219, 2006.
- [10] Tsung-Yueh Tsai, Yi-Shao Lai, Chang-Lin Yeh, and Rong-Sheng Chen. Structural design optimization for board-level drop reliability of wafer-level chip-scale packages. *Journal of Microelectronics Reliability*, 48 :1837–1848, 2008.
- [11] K.M. Chen, K.K. Ho, and D.S. Jiang. Impact of lead free solder materials on board level reliability for low-k wlcspp. *Packaging Assembly and Circuits Technology*, pages 243–248, 2007.

- [12] Tong-Yan Tee and Jing-En Luan. Novel numerical and experimental analysis of dynamic responses. In *Proceedings of EuroSimE Conference*, 2004.
- [13] Mikko Alajoki, Luu Nguyen, and Jormal Kivilahti. Drop test reliability of wafer level chip scale packages. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2005.
- [14] Hideo Nishiuchi and Takahiro Sogo. Estimate of drop impact reliability for bga solder joints. *Int Conf Electron Packag*, 2006 :141–146, 2006.
- [15] Ilho Kim and Soon-Bok Lee. Reliability and failure analysis of lead-free solder joints for pbga package under a cyclic bending load. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 31, 2008.
- [16] Yi-Shao Lai *et Al*. Cyclic bending reliability of wafer-level chip-scale packages. *Journal of Microelectronics Reliability*, 47 :111–117, 2007.
- [17] E.H. Wong, Y-W Mai, R. Rajoo, K.T. Tsai, F. Liu, S.K.W. Seah, and C-L Yeh. Micro impact characterisation of solder joint for drop impact application. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2006.
- [18] Tomoko Nakamura, Yoshimasa Miyamoto, Yoshihiro Hosoi, and Keith Newman. Solder joint integrity of various surface finished build-up flip chip packages by 4-point monotonic bending test. In *Electronics Packaging Technology*, 2005.
- [19] Yeong J. Lee, Paul Crosbie, Matt Brown, and Adam Zbrzezny. Reliability of wafer level chip scale packages (wl-csp) under dynamics loadings. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2008.
- [20] Junfeng Zhao and Luke J. Garner. Mechanical modeling and analysis of board level drop test of electronic package. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2006.
- [21] C.-L. Yeh *et Al*. Transient analysis of board-level drop response of lead-free chip-scale packages with experimental verifications. In *Proceedings of the 6th Electronics Packaging technology conference at Singapore*, pages 695–700, 2004.
- [22] Masamoto Tanaka, Tsutomu Sasaki, Takayuki Kobayashi, and Kohei Tatsumi. Improvement in drop shock reliability of sn-1.2ag-0.5cu bga interconnects by ni addition. In *56th Electronic Components Technology Conference*, pages 78–87, 2006.
- [23] G. Hénaff and F. Morel. *Fatigue des structures : Endurance critères de dimensionnement propagation des fissures rupture*. Ellipses, 2005.
- [24] W.C. Oliver and G.M. Pharr. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation. advances in understanding and refinement methodology. *J. Mater. Res.*, 19(1) :3–20, 2004.
- [25] Micro Materials Ltd. Technical information. Technical report, Micro Materials Ltd., 2008.
- [26] A.C. Fisher-Cripps. *Nanoindentation*. Springer.
- [27] Ola Bostrom. *Wafer shape control Study of the reactivity in TiAl dual layers and its effect on the stress*. PhD thesis, Université Paul Cézanne, 2001.
- [28] Pasi Nummila, Mikael Johansson, and Sanna Puro. Mechanical shock robustness of different wlcsps types. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2008.

- [29] Hélène Frémont *et Al.* Impact of the pcb design on the crack risk of csp assemblies subjected to temperature cycling and drop-tests. In *13ème conférence IPFA à Singapour*, 2006.
- [30] S. Shetty *et Al.* Three- and four-point bend testing for electronic packaging. *Journal of Electronic Packaging*, 125 :556–561, 2003.
- [31] S.H. Ho *et Al.* On the reliability and failure of pbga interconnects under bending cyclic test. In *International Symposium Microelectronics (IMAPS)*, pages 247–252, 2000.
- [32] J.D. Wu *et Al.* An experimental study of failure and fatigue life of a stacked csp subjected to cyclic bending. In *Proceedings of 51st Electronic Components and Technology Conference*, pages 1081–1086, 2001.
- [33] L.L. Mercado *et Al.* Use-condition based cyclic bend test development for handhled components. In *Proceedings of the 54th Components and technology Conference*, 2004.
- [34] Y. Chen *et Al.* The experimental study for the solder joint reliability of high i/o fcbgas with thermal loaded bend test. *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, 29, 2006.
- [35] S.K.W. Seah *et Al.* High speed bend test method and failure prediction for drop impact reliability. In *Proceedings of the 56th Components and Technology Conference*, 2006.
- [36] Chang-Lin Yeh, Yi-Shao Lai, and Chin-Li Kao. Evaluation of board-level reliability of electronic packages under consecutive drops. *Journal of Electronic Reliability*, 46 :1172–1182, 2006.
- [37] Weiping Liu, Paul Bachorik, and Dr. Ning-Cheng Lee. The superior drop test performance of sac-ti solders and its mechanism. In *Electronic Components and Technology Conference*, 2008.
- [38] Cédric Le Coq, Abdellah Tougui, Marie-Pascale Stempin, and Laurent Barreau. Experimental study of wl-csp reliability subjected to 4-point bend-test in journal of microelectronics reliability. *Journal of Microelectronics Reliability*, 50 :1007–1013, 2010.
- [39] Walloddi Weibull *et Al.* A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18 :292–297, 1951.
- [40] Bret A. Zhan. Solder joint fatigue life model methodology for 63sn37pb and 95.5sn4ag0.5cu materials. In *Proceedings of the Electronics Components and Technology Conference*, pages 89–94, 2003.
- [41] Franck Alexandre. *Aspects Probabilistiques et Mircrostructuraux de l’Amorçage des Fissures de Fatigue dans l’Alliage INCO 718*. PhD thesis, ENSMP Mines Paritech, Centre des Matériaux P.M. Fourt, 2004.
- [42] G.Gerald Stoney. The tension of metallic films deposited by electrolysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, A, 1909.
- [43] W.W. Lee, L.T. Nguyen, and G.S. Selvaduray. Solder joint fatigue models : review and applicability to chip scale packages. *Journal of Microelectronics Reliability*, 40 :231–244, 2000.
- [44] A. Syed. Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for snagcu solder joints. In *Electronic Components and technology Conference*, pages 737–746, 2004.

- [45] JW Morris and HL Reynolds. The influence of microstructure on the mechanics of eutectic solders. In *Proceedings of Advances in Electronic Packaging*, 1997.
- [46] H. Hakay *et Al.* Experimental correlations of an energy-based fatigue life prediction method for solder joints. In *Advances in Electronic Packaging*, pages 1567–1574, 1997.
- [47] G. Gustafsson. Finite element modeling of bga packages for life prediction. In *Proceedings of the 50th Electronic Components and Technology Conference*, 2000.
- [48] P. Lefranc *et Al.* Fracture of nano and engineering materials and structures. In *Proceedings of the 16th European Conference of Fracture*. Springer, 2006.
- [49] N. Gérard. *Etude du comportement des fissures courtes au fond d'une entaille mécanique sous sollicitation en fatigue*. PhD thesis, Université François Rabelais, Tours, 2003.
- [50] K. Vor *et Al.* Effect of prestrain on fatigue crack propagation in a 304l stainless steel. In *Proceedings des 12ème journées internationales de Printemps*, 2008.
- [51] F Schwarzl and AJ Staverman. Time-temperature dependence of linear viscoelastic behavior. *Journal of Applied Physics*, 1925.
- [52] 01db Metravib. *Guide d'utilisation du viscoanalyseur VA2000*, 2004.
- [53] Sébastien Roy. *Mesure de l'adhérence et des propriétés mécaniques de couches minces par des essais dérivés de la nanoindentation. Application à la microélectronique et au biomédical*. PhD thesis, ENSMP, 2008.
- [54] W.C. Oliver, R. Hutchings, and J.B Pethica. Measurement of hardness at indentation depths as low as 20 nanometers. *Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering*, pages 90–108, 1986.
- [55] M.F. Doerner and W.D. Nix. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *Journal of Materials Research*, 1986.
- [56] I.N. Sneddon. The relation between load and penetration in the axisymmetric bousinesq problem for a punch arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, 3 :47–57, 1965.
- [57] P. Laval. *Etude théorique et expérimentale de l'indentation des matériaux élastoplastiques homogènes ou revêtus*. PhD thesis, ENSMP, 1995.
- [58] C. Ramond-Angelelis. *Analyse mécanique des essais d'indentation sur matériaux élasto-plastiques homogènes ou multi-couches. Application à la caractérisation de la rhéologie et de la tenue mécanique des films minces*. PhD thesis, ENSMP, 1998.
- [59] D. Tabor. *The hardness of metals*. Clarendon Press, Oxford, 1951.
- [60] S. Timoshenko et J.N. Goodier. *Theory of Elasticity*. 2nd edition McGraw-Hill, 1951.
- [61] Paresh Limaye, Bart Vandeveld, Riet Labie, Dirk Vandepitte, and Bert Verlinden. Influence of intermetallic properties on reliability of lead-free flip-chip solder joints. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 31 :51–57, 2008.
- [62] D. Soulat and J-L. Daniel. *Simulation des Procédés de Mise en forme et du Crash – Fascicule du module MSE25*, 2002.
- [63] A. Dragon, L. Rota F. Hild, and H. Trumel. Modélisation du comportement et de la rupture des matériaux sous sollicitations dynamiques. *Mécanique et industries* 1, 1 :521–537, 2000.

- [64] M. Pei and J. Qu. Constitutive modeling of lead-free solders. In *International Symposium on Advanced Packaging Materials : Processes, Properties and Interfaces*, pages 45–49, 2005.
- [65] O. Rebuffet. Modélisation du comportement au crash des structures aluminium pour les applications automobiles. Technical report, Communication lors des premières journées du groupe de travail MECADYMAT à l'ENSMA Poitiers, 2000.
- [66] Wang Qiang *et Al.* Experimental determination and modification of anand model constants for pb-free material 95.5sn4.0ag0.5cu. In *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems*, pages 1–9, 2007.
- [67] S. Moreau. *Fiabilité environnementale des composants de puissance : le TRIAC*. PhD thesis, Université François Rabelais, Tours, 2005.
- [68] R. Hull. Properties of crystalline silicon. Technical report, IEE Publishing, 1999.
- [69] Gérard Coffignal. *Fascicule de cours Gérard ENSAM*, 2007.
- [70] Tong Yann-Tee and Jing en Luan. Modal analysis pcb bga drop test fea modeling. Technical report, STMicroelectronics CTL rapport technique, 2004.
- [71] Ansys. *Ansys Inc. Theory Reference pour la version V10*, 2008.
- [72] Ouahiba Tebbi. *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés*. PhD thesis, Université d'Angers, 2005.

BIBLIOGRAPHIE

Glossaire

- *BCB : BenzoCycloButene* – Passivation utilisée sur les wafers pour lesquels le verre (Glass) remplace le Silicium. Ces couches de passivation permettent d’isoler entre elles les pistes métalliques, d’éviter leur corrosion, et d’assurer la passivation de la surface du composant. Elles permettent aussi de protéger le silicium des éléments extérieurs comme l’oxydation.
- *Back–End* : Assemblage, finition. Dans l’industrie des semi-conducteurs, le back-end correspond à la seconde phase de la fabrication au cours de laquelle le circuit en silicium est monté dans un boîtier conçu (assemblage) non seulement pour le protéger, mais aussi pour assurer des connexions avec l’extérieur par le biais de fils très fins. Cette opération est suivie des opérations suivantes : assemblage, finition et emballage.
- *Bending – test (test de flexion)* : Cet autre test défini par la norme JEDEC consiste à solliciter en flexion 4-points un PCB et les puces montées dessus. Il vise ainsi à simuler en accéléré l’appui répété des touches (par exemple sur un clavier de téléphone) ainsi que les grandes déflexions que subit le PCB à l’assemblage du produit final.
- *BGA : Ball Grid Array*– Composant monté sur circuit imprimé dont les interconnexions sont une matrice de billes. La puce est assemblée sur un substrat et reliée à celui-ci par des fils.
- *Bump (billes)* : Désigne une bille de soudure sur un CSP.
- *CSP : Chip-Scale Package* – Désigne l’ensemble des boîtiers (ou packages) dont les dimensions sont de l’ordre de grandeur de la puce. Parmi ceux-ci on trouve notamment les BGA (Ball Grid Array : matrices de billes) et les Flip-Chips.
- *DMA (ou DTMA) : Dynamic (Thermo-) Mechanical Analyser* – Couramment appelé Visco-Analyseur, cette technique de mesure consiste à solliciter un échantillon avec un signal périodique selon une amplitude connue et à déterminer des propriétés mécaniques de l’échantillon en fonction de la réponse mesurée.
- *DNP : Distance to Neutral Point* – Distance entre le centre de la bille la plus éloignée du centre de la puce et ce dernier.

- *Drop – Test (test de chute)* : Test mécanique consistant à appliquer sur des composants CSP une accélération proche de celle subie par un choc (par exemple le portable qui tombe d’une main), sur une durée de l’ordre de la milliseconde, de façon répétée jusqu’à obtenir la défaillance d’un composant.
- *ENIG : Electroless Nickel Immersion Gold* : Nickel déposé par électrolyse – Côté circuit imprimé, finition protégeant le plot en cuivre de l’oxydation.
- *FEM (ou FEA) : Finite Element Methode (ou Analysis)* - Désigne une méthode mathématique consistant à diviser une géométrie en petits volumes ou petites surfaces de manière à rendre possible la résolution des équations physiques du problème posé.
- *Flip – Chip* : Technologie consistant à connecter la puce au circuit imprimé par des billes de soudure plutôt que des fils et des « pattes », ceci permet de diminuer l’encombrement du composant.
- *Front – End* : Diffusion, fonderie. Dans l’industrie des semi-conducteurs, la diffusion correspond à la première phase du cycle de production, comprenant la fabrication des circuits sur les tranches de silicium, suivie du tri électrique des tranches et de la phase de back-end.
- *Gap/Stand – Off(cart)* : Distance entre la puce et le circuit imprimé
- *IMC : InterMetallic Compound* – Composé intermétallique qui se forme lors de la soudure de la bille d’alliage sur l’UBM. On peut en trouver de nombreux : Cu₆Sn₅, Cu₃Sn, CuNiSn, Ni₃Sn₄... Il existe également des intermétalliques complexes, par exemple le (Cu,Ni)₆Sn₅.
- *JEDEC : Joint Electron Device Engineering Council* – Comité international de standardisation dans le domaine de l’électronique. Celui-ci définit notamment les critères de tests mécaniques et thermiques, leurs cahiers des charges.
- *Layout (disposition)* : Disposition des billes sur un Flip-Chip. Celui-ci peut-être nommé par le nombre de billes en lignes et en colonnes (par exemples 5x5 ou 7x7). Un layout constitue également une empreinte (footprint) complémentaire de l’empreinte sur laquelle le composé sera monté.
- *Lead – Free (sans-plomb)* : Alliage contenant moins de 1000ppm de Plomb (Pb). Ce type d’alliage remplace les alliages au plomb, dits « Leaded » (typiquement du Pb₆₃Sn₃₇), interdits par la législation dans la micro-électronique pour des raisons environnementales.
- *Nanoindentation* : Technique comparable à un essai de dureté. La pointe en diamant de l’indenteur vient déformer plastiquement le matériau étudié sur des profondeurs

nanométriques pour en déterminer sa dureté. Une formule permet de relier cette valeur et le module d'Young de l'échantillon. Cette technique est particulièrement utile dans le cas de couches minces pour lesquelles des essais mécaniques classiques (tels qu'un essai de traction) sont impossibles.

- *OSP : Organic Solder Preservative* – Finition protégeant les plots de cuivre du circuit imprimé de l'oxydation.
- *Pad (plot)* : Sur un circuit imprimé, désigne l'emplacement en Cu où va reposer le bump.
- *PCB (circuit imprimé) : Printed Circuit Board* – Circuit imprimé sur lequel sont reportées les puces. Son design correspond à la disposition des pistes de cuivres et la superposition des couches de fibres de verre, matériaux qui le composent.
- *PE&D : Packaging Engineering and Development* – Service de STMicroelectronics dont les activités sont centrées sur la mise en boîtier, la finition et le conditionnement des composants. La mission de développement de ce service inclut l'amélioration de la fiabilité des composants à travers l'optimisation des boîtiers.
- *Pitch (pas)* : Plus petit écart entre le centre de deux billes.
- *PSG : Phosphorous doped Silicate Glass* – Couche de passivation en contact avec le Silicium.
- *SnAg₄cu_{0.5}(SAC405)* : Alliage permettant la soudure (brasure) entre la puce et le PCB. Il contient 4 % d'Argent, 0.5 % de Cuivre et 95.5 % d'Etain. Il peut être également désigné par le terme « alliage eutectique » bien que le NIST (organisme gouvernemental aux USA) ait déterminé le « vrai » eutectique à la composition SnAg_{3.8}Cu_{0.7}. Le fait d'être proche de l'eutectique provoque la création de composés définis tels que le Ag₃Sn. Celui-ci est présent sous forme d'aiguilles ou de plans dans les bumps.
- *TCT : Thermal Cyclic Test* – Test de cyclage thermique (variations de températures cycliques comprenant des temps de paliers) visant à simuler en accéléré les conditions réelles subies par un appareil portable (par exemple : téléphone ou PDA).
- *Top – Metal* : Plot métallique entre le Silicium et la couche d'adhésion. On peut le trouver en Al ou AlCu(+Ti) par exemple.
- *UBM : Bump Metallization* – Egalement appelée « couche d'adhésion », métallisation déposée entre le Silicium et l'alliage de brasure et constituée de plusieurs couches.
- *USG : Undoped Silicate Glass* – Couche de passivation déposée au-dessus de la couche de PSG.

- *Via* : Passage permettant de faire passer une piste de cuivre par l'intérieur du circuit imprimé puis de rejoindre une autre connexion. On parle de via-in-pad lorsque celui-ci se trouve au centre d'un pad. Par opposition on désigne les circuits imprimés qui ne possèdent pas ces passages par *no via in pad*.
- *Vibration – test (test de vibration)* : Ce troisième essai mécanique défini par JEDEC simule en accéléré les contraintes subies par les composants lors de la fabrication du produit et lors de la mise en service (vibreux du téléphone).
- *Wafer (Plaquette)* : Plaquette sur laquelle sont déposées puis gravées les couches constitutives des composants électroniques. Celles-ci peuvent être en Silicium, verre ou Saphir par exemple.
- *Weibull (distribution de)* : Traitement statistique des résultats de l'étude statistique d'un test de fatigue. Ce graphique représente en abscisse le temps à la rupture d'un composant (par exemple le nombre de chutes) et en ordonnée le taux de défaillances. A 100 % de défaillances tous les échantillons sont défectueux. Ces courbes sont couramment utilisées pour comparer les performances aux TCT et drop-test des boîtiers.

