



HAL
open science

Fiabilité des composants enfouis dans les circuits imprimés

Mickael Balmont

► **To cite this version:**

Mickael Balmont. Fiabilité des composants enfouis dans les circuits imprimés. Electronique. Université de Bordeaux, 2019. Français. NNT : 2019BORD0229 . tel-02384102

HAL Id: tel-02384102

<https://theses.hal.science/tel-02384102>

Submitted on 28 Nov 2019

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE : Science Physique et de l'Ingénieur (SPI)

SPÉCIALITÉ : Electronique

Par Mickaël BALMONT

**Fiabilité des composants enfouis dans les circuits
imprimés**
**Les simulations thermomécaniques, un outil de fiabilisation d'un circuit dès sa
conception**

Sous la direction de : OUSTEN Yves
(Co-directeur : BORD MAJEK Isabelle)

Soutenue le 14/10/2019

Membres du jury :

| | | | |
|--------------------------|--|--------------|------------------------|
| M. PELLET Claude | Professeur des universités | IMS Bordeaux | Président |
| M. FORTUNIER Roland | Directeur | ISAE-ENSMA | Rapporteur |
| M. GOMES Samuel | Professeur des universités | UTBM | Rapporteur |
| Mme. MASSON Amandine | Spécialiste circuits imprimés et packaging | THALES | Examinatrice |
| M. OUSTEN Yves | Professeur des universités | IMS Bordeaux | Directeur de thèse |
| Mme. BORD MAJEK Isabelle | Maître de conférences | IMS Bordeaux | Co-directrice de thèse |

Remerciements

Après plus de 3 années à arpenter le domaine de la recherche me voilà à écrire ces quelques lignes d'une importance majeures dans ce manuscrit. Il est très difficile, en commençant, de concevoir tout ce que représente une thèse et toutes les personnes qui participent à l'accomplissement de ce travail. Par ces quelques lignes, je tiens donc à remercier ces derniers.

Les premiers qu'il est indispensable de remercier sont mes encadrants, Yves et Isabelle. Ils ont su me faire confiance pour effectuer cette thèse et m'ont aidé à garder le cap et la motivation au cours de ces 3 années. Yves, tes idées ont toujours été les bienvenues, que ce soit celles pour tes propres projets qui me sortaient de ma routine ou celles qui m'offraient de nouvelles voies et possibilités dans mes axes de recherche. Beaucoup des éléments de ce manuscrit n'existeraient pas sans toi. Isabelle, tu m'aidais davantage à revenir sur le chemin parcouru. Sans trop parler des corrections que tu t'es donnée la peine de faire dans l'ensemble de mes productions (et il y en a eu beaucoup), tu posais les bonnes questions pour m'aider justifier ou expliquer mes résultats. Tu m'as permis d'enchaîner dans de meilleures conditions chacune des productions en consolidant mes fondamentaux.

Je remercie également tous les membres du projet EDDEMA qui ont été d'une grande aide dans l'accomplissement des travaux. Notamment Nicolas pour sa direction du projet et Jonathan pour être le plus à l'écoute de mes besoins.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres de l'équipe EDMINA que j'ai rencontré au cours de ces 3 années. Ils ont été nombreux et ont eu différents rôles. Tout d'abord, les permanents, Laurent, Yannick et Simon qui m'ont accueilli et su écouter les premiers balbutiements d'un doctorant qui n'était pas sûr de ce qu'il avançait. Les post-doctorants, Western et Pauline savaient parfaitement rassurer sur le déroulement et l'achèvement d'une thèse. Enfin, les autres doctorants partageant parfois mes tourments, Pierre, Emmanuel et Achille, ont su me donner leur amitié, partager sur divers sujets scientifiques, me rappeler qu'il était leur de manger ou de faire une pause. J'ajouterais une pensée toute particulière à Zeineb qui a su être présente quand mes problèmes personnels empiétaient sur mon travail et qui s'inquiétait pour moi plus que nécessaire. Je te souhaite plein de bonnes choses pour ta vie professionnelle et avec ta fille.

Il reste une flopée d'amis en dehors du cadre du travail à remercier. Tout d'abord, Viva et Marine ont su me faire découvrir Bordeaux et ses environs. Vous conserverez une place dans mon cœur simplement pour ce que vous avez accompli durant les premiers mois. Merci à Antoine pour m'avoir sorti quelques fois. Pour ces tournois de Magic, ces soirées jeux de société ou encore pour me rappeler les dates du festival d'Angoulême (que j'ai raté cette année vu que tu n'étais plus là). Merci à Loré pour avoir été si souvent à l'écoute. Merci à mes anciens camarades, Romain, Romain, Fabien, Fabien et Bertrand, de parfois me supporter, de m'écouter et d'échanger avec moi. Plus généralement je remercie les amis de Lille car j'en oublie probablement beaucoup avec qui j'ai toujours plaisir à discuter malgré que nous n'ayons pas des contacts réguliers. La plus douée pour ça est sans doute Marie qui sait réapparaître dans les moments où j'ai le plus besoin d'elle. Marc car malgré nos désaccords certains la discussion est possible (sans forcément trouver de consensus). Merci aussi à Christophe, Nicolas, Stéphane, Romain et Odon qui ont eu l'occasion de m'héberger lors de mes pérégrinations du week-end. Ils me rappellent qu'on a toujours quelqu'un sur qui compter en temps de galère ou juste pour de petits besoins. Avec une pensée particulière pour cette colocation baptisée Tocardie qui avait toujours une place pour moi, même dans les moments de galère comme un vol annulé. Toujours accueillant et m'aidant à booster mon moral.

Si vous pensez avoir été oublié jusque-là c'est aussi parce que vous participez encore d'avantage à ma vie et à ma réussite. J'ai su trouver deux groupes d'amis majeurs dans ma vie que je considère comme ma famille. Ils savent être presque toujours présents. On peut se contenter de discuter ou de jouer ensemble. Parfois leur simple présence suffit. Je remercie donc tous ceux qui sont restés mes amis depuis le lycée malgré des moments pas toujours facile et un caractère exécrationnel : Tristan, Barth, Alice, Kev et toute la clique qui va désormais avec. J'ai toujours su où vous retrouver dans notre Haute-Savoie d'origine, malgré mes multiples pérégrinations. Et tous ceux qui sont restés depuis l'école d'ingénieur de Centrale Lille, Stéphane, Laure, Thomas, Quentin, Marc, Fabien, Aurélien et les Cageux de manière plus générale. Ils ont toujours été un tremplin pour m'aider à progresser et savent aussi me vider la tête de l'ensemble de mes tracas. Laure reçoit quelques remerciements supplémentaires pour toujours se montrer patiente avec nous lors de nos séances de JdR, d'avoir toujours une soif de jouer et pour ces vacances récurrentes mais bienvenues où j'ai l'occasion de cuisiner sans cesse auprès de Chef Fabien. Aurélien pour toi je te souhaite toujours de trouver un meilleur ami que moi car tu es celui sur qui je me défoule le plus souvent quand le besoin s'en fait ressentir.

Enfin une pensée à ma famille. Mes parents que j'oublie trop souvent de prévenir de mes déplacements et disponibilités et qui ont toujours accepté mes choix. Ma sœur et sa magnifique famille qui sont un véritable rayon de soleil lors de mes retours. Je remercie également mon Grand-père, René, qui est sans doute celui à qui je dois ma curiosité et mon envie d'apprendre. Il a su me communiquer une partie de ses connaissances puis écouter les miennes ensuite et parfois juste être présent et compréhensif. Je remercie également tout le reste de ma famille que j'ai plaisir à retrouver et à apprendre d'eux, même si, à l'inverse, j'ai parfois du mal à vulgariser mon travail pour vous.

Merci à tous et, comme on dit par chez moi, A'rvì pà.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | 2 |
| Liste des figures | 8 |
| Liste des tableaux | 14 |
| Introduction Générale..... | 16 |
| Chapitre I : Evolution et exigences des assemblages électroniques pour de nouvelles applications | 18 |
| Liste des figures : Chapitre I | 20 |
| I.1. Introduction..... | 22 |
| I.2. Packaging : assembler et connecter..... | 23 |
| I.2.1. Les interconnexions..... | 25 |
| I.2.2 La carte électronique : une architecture complexe | 32 |
| I.3. Technologie d'enfouissement dans le projet EDDEMA..... | 37 |
| I.3.1. Enjeux technologiques | 37 |
| I.3.2. Projet EDDEMA..... | 47 |
| I.4. Conclusion | 48 |
| I.5. Références bibliographiques | 50 |
| Chapitre II : Les matériaux et l'architecture : comportement, caractérisations et modélisations..... | 54 |
| Liste des figures : Chapitre II | 56 |
| Liste des tableaux : Chapitre II | 58 |
| II.1. Introduction..... | 60 |
| II.2. Les comportements thermomécaniques des matériaux | 60 |
| II.2.1. Comportements mécaniques | 61 |
| II.2.2. Comportements thermiques | 66 |
| II.2.3. La notion temporelle dans les déformations | 69 |
| II.2.4. Bilan..... | 70 |
| II.3. Définition des comportements thermomécaniques des matériaux étudiés | 72 |
| II.3.1. Silicium | 72 |
| II.3.2. Brasure eutectique sans plomb : Sn96,5Ag3Cu0,5 | 74 |

| | |
|--|------------|
| II.3.3. Résine époxy et pré-imprégnés..... | 76 |
| II.3.4 Résine époxy et pré-imprégnés..... | 78 |
| II.4. Modèles pour les simulations..... | 84 |
| II.4.1. Problématique..... | 84 |
| II.4.2. Modélisation 2D | 85 |
| II.4.3. Modélisation 3D | 86 |
| II.4.4. Possibilités supplémentaires dans la modélisation..... | 87 |
| II.5. Conclusion | 89 |
| II.6. Références bibliographiques | 91 |
| | |
| Chapitre III : Résultats généraux de simulations locales et complexification progressive | 96 |
| | |
| Liste des figures : Chapitre III | 98 |
| Liste des tableaux : Chapitre III | 100 |
| III.1. Introduction..... | 102 |
| III.2. Etude sur des joints de brasure : Sn96,5Ag3Cu0,5..... | 102 |
| III.2.1. Méthodologie de Darveaux..... | 104 |
| III.2.2. Influence du maillage et considérations géométriques | 108 |
| III.2.3. Composants enfouis | 110 |
| III.3. Etude 2D sur des vias..... | 112 |
| III.3.1. Méthodologie de Manson-Coffin-Basquin | 113 |
| III.3.2. Résultats de simulation | 116 |
| III.4. Etude 3D sur des vias..... | 126 |
| III.4.1. Résultats de simulation | 127 |
| III.4.2. Bilan comparatif entre le via 3D, le via 2D et la brasure | 133 |
| III.5. Résultats complémentaires..... | 135 |
| III.6. Conclusion | 139 |
| III.7. Références bibliographiques | 140 |
| | |
| Chapitre IV : Application au prototype d'EDDEMA..... | 142 |
| | |
| Liste des figures : Chapitre IV | 144 |
| Liste des tableaux : Chapitre IV | 146 |
| IV.1. Introduction | 148 |

| | |
|--|------------|
| IV.2. Description du prototype | 148 |
| IV.2.1. Les composants enfouis | 148 |
| IV.2.2. La fabrication du prototype | 151 |
| IV.2.3. Les conditions de fonctionnement..... | 153 |
| IV.3. Simulations sur les bases du prototype | 154 |
| IV.3.1. Positionner les composants | 154 |
| IV.3.2. Complexification de l'architecture | 160 |
| IV.3.3. Sous-modèle de simulation..... | 164 |
| IV.4. Mesures de fiabilités sur le prototype | 167 |
| IV.4.1. Evaluation de la fiabilité..... | 167 |
| IV.4.2. Résultats expérimentaux | 169 |
| IV.5. Conclusion | 177 |
| IV.6. Références bibliographiques..... | 178 |
| Conclusion Générale | 180 |
| Annexes | 186 |
| Résumés | 189 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| <i>Figure I-1 Mise en évidence de la loi de Moore avec l'exemple de processeur Intel [Moo-65]</i> | 22 |
| <i>Figure I-2 Evolution des assemblages électroniques selon « More Moore » et « More than Moore » [Itr-07].</i> | 23 |
| <i>Figure I-3 Niveaux de packaging électronique [Ban]</i> | 24 |
| <i>Figure I-4 Photo (recto/verso) d'un circuit imprimé prototype conçu par AT&S dans le cadre du projet EDDEMA.</i> | 25 |
| <i>Figure I-5 Exemple de câblage filaire [Fir]</i> | 26 |
| <i>Figure I-6 Illustration d'un « wire bonding » connecté à gauche par la technique « ball-bonding » (a) et à droite par du « wedge-bonding » (b) [Cha-14].</i> | 27 |
| <i>Figure I-7 Connexion de type TAB [Vas-05]</i> | 27 |
| <i>Figure I-8 Schéma d'une puce connecté par (a) wire bonding, (b) TAB et (c) Flip-Chip [Hal-95]</i> | 28 |
| <i>Figure I-9 Controlled Collapse Chip Connection Flip-Chip technology [Deh-94]</i> | 29 |
| <i>Figure I-10 Assemblage Flip-Chip basé sur la thermocompression [Gle]</i> | 29 |
| <i>Figure I-11 Collage Flip-Chip (a) avec un adhésif conducteur isotrope et (b) avec un conducteur anisotrope [Kri-98].</i> | 30 |
| <i>Figure I-12 Schémas de complexification du circuit imprimé pour assurer une haute densité de connexions avec en (1) via traversant, (2) via enterré et (3) via borgne</i> | 31 |
| <i>Figure I-13 Vue en coupe d'un assemblage avec des TSVs et schéma d'un TSV [Mah-17]</i> | 31 |
| <i>Figure I-14 Evolution du premier niveau de packaging ces dernières décennies [Rah-17]</i> | 32 |
| <i>Figure I-15 Exemple de puce nue montée (CoB) [Ees]</i> | 33 |
| <i>Figure I-16 Comparaison entre un assemblage SoC (System on Chip) et MCM (Multi-Chip Module) [Min-05]</i> | 33 |
| <i>Figure I-17 Comparaison entre (a) un assemblage MCM traditionnel et (b) un assemblage 2,5D utilisant un interposeur en silicium [Max-12]</i> | 34 |
| <i>Figure I-18 Schéma de différents assemblage SiP : (a) 2D SiP de type MCM et (b) 3D SiP utilisant du wire bonding (gauche) et des TSVs (droite) [Ble-17].</i> | 35 |
| <i>Figure I-19 Vue en coup d'un assemblage SoP utilisant la technologie films minces [San-09]</i> | 35 |
| <i>Figure I-20 Schéma d'un assemblage PoP [Val-08]</i> | 36 |
| <i>Figure I-21 Procédé basique d'enfouissement d'un composant dans un PCB [Sta-13]</i> | 36 |
| <i>Figure I-22 Deux principales méthodes d'interconnexion (a) Flip-Chip et (b) Via [Yan-15]</i> | 37 |
| <i>Figure I-23 Trois procédés basiques d'assemblage avec composants enfouis (a) sur un substrat d'accueil, (b) dans des cavités creusées dans le substrat d'accueil, et (c) Sans substrat cœur [Yan-15]</i> | 38 |
| <i>Figure I-24 Exemple (a) d'un circuit avec composants enfouis montés sur les deux faces d'un substrat d'accueil et (b) d'un circuit multicouches avec plusieurs méthodes pour enfouir les composants [Yan-15]</i> | 39 |
| <i>Figure I-25 Exemple de profil de laminage typique de température et de pression pour enfouir un composant.</i> | 39 |
| <i>Figure I-26 Cas de stress thermique dans les couches laminées [Sta-18]</i> | 40 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure I-27 Brevet de Motorola sur l'enfouissement de composants verticaux utilisant une couche intermédiaire de résine [Zol-05]</i> | <i>41</i> |
| <i>Figure I-28 Brevet de Samsung sur l'utilisation de plots prédisposés avant le pressage d'une couche isolante avec cavité avant le remplissage par une résine de cette cavité [Mok-08] ...</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-29 Brevet de Matsushita sur l'utilisation de vias pré-intégrés à la couche isolante avant le pressage [Sug-04]</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-30 Brevet d'Unimicron Technology Corp. sur l'enfouissement d'un composant disposant d'une surface active, des limiteurs (couche d'arrêt) empêchent la surface active d'être recouverte par la résine lors du pressage [Tse-15]</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-31 Illustration des problèmes de compatibilité électromagnétique [Dub-09]</i> | <i>43</i> |
| <i>Figure I-32 Vue en coupe d'une soudure présentant une fissure s'étant propagée sur l'ensemble de la zone de contact [Lar-03].....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure I-33 Observation d'une fissure dans la résine après un test de cycles thermiques (de 125°C à -55°C) [Lar-03]</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure I-34 Résultats de simulation mis en avant par [Alt-12] (a) vue en coupe schématique d'une capacité et d'une résistance enfouie, (b) Stress thermique induit par les étape de laminage, (c) Distribution du stress normal avant et après l'essai de flexion.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Figure I-35 Résultats de simulation mis en avant par [Kpo-16] (a) Vue en coupe du modèle avec h la hauteur et w la distance entre le composant et le bord de la cavité (b) Stress (MPa) dans le composant à la fin de la fabrication pour deux hauteur de cavité i) h = 325µm et ii) h = 145µm</i> | <i>45</i> |
| <i>Figure I-36 Impact de l'épaisseur de la couche sur la fabrication [Osm-13].....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure I-37 Nombre normalisé de cycles avant défaillance pour un package BGA en fonction de l'épaisseur du PCB [Sta-13]</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure I-38 Composition du dispositif de caméra actuellement utilisé</i> | <i>47</i> |
| <i>Figure II.1 Courbe de traction nominale [For].....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure II.2 Courbe de contrainte-déformation avec traction cyclique sur U75V-2 avec les cycles de chargement 1-19 [Bao-16]</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure II.3 Evolution du volume massique en fonction de la température pour trois structures de matériaux [Cal-07].....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure II.4 Evolution du module de Young en fonction de la température selon la structure du polymère [Inj]</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure II.5 Courbes force-déplacement obtenues par essai de compression sur 4 matériaux de référence : V_i étant la vitesse cinématique de l'essai [Rab-15].....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure II.6 Réponse d'un matériau à une sollicitation de déformation cyclique (a) cas de durcissement, (b) cas d'adoucissement [UNI-10].....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure II.7 Illustration de l'effet favorable d'un chargement cyclique dans le cas d'un acier inoxydable [ENS].....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure II.8 Exemple d'un circuit imprimé 6 couches [Ray]</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure II.9 Module de Young en fonction de la température selon les mesures de [Sha-01], [Mic-95], [Kah-98], [Met-70]</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure II.10 Coefficient de dilatation thermique du silicium en fonction de la température [Swe-09].....</i> | <i>74</i> |

| | |
|---|-----|
| <i>Figure II.11</i> Courbe de contrainte déformation typique pour du cuivre électrodéposé en nanograin (nano-twin Cu), du cuivre en grains grossiers (coarse-grained Cu) et du cuivre nanocristallin (nc Cu) [Son-11]..... | 75 |
| <i>Figure II.12</i> Module de Young en fonction de la porosité du Cu nanocristallin (rouge) et du Pb nanocristallin (bleu) [Son-11]..... | 75 |
| <i>Figure II.13</i> Exemple de pré-imprégné [Tut] (a) 106, 56x56, épaisseur : 0,038mm (b) 1506, 46x45, épaisseur : 0,140mm (c) 1080, 60x47, épaisseur : 0,064mm (d) 7628, 44x32, épaisseur : 0,173mm | 79 |
| <i>Figure II.14</i> Caractéristiques et descriptions de l'empilage des échantillons pour les essais de traction fabriqués par AT&S..... | 80 |
| <i>Figure II.15</i> Courbes moyennes contraintes-déformations des trois matériaux..... | 82 |
| <i>Figure II.16</i> Courbes moyennes contraintes-déformations du cœur R1577 pour les trois empilages..... | 82 |
| <i>Figure II.17</i> Courbes moyennes contraintes-déformations selon la température | 83 |
| <i>Figure II.18</i> Composition des couches du prototype (10 couches) réalisé dans le cadre du projet EDDEMA 3 composants actifs (STV, L5965 et Flash) et des capacités de 150µm et 330µm..... | 84 |
| <i>Figure II.19</i> Exemple de maillage sur des vias 3D sous un composant Flash | 85 |
| <i>Figure II.20</i> Exemple de maillage d'un (a) modèle de composant enfoui 2D : (b) maillage de la résine entre le composant et la couche cœur et (c) maillage d'un via..... | 86 |
| <i>Figure II.21</i> Exemple d'un maillage simple sur une structure 3D (a) sans résine autour du composant (b) avec résine autour du composant..... | 87 |
| <i>Figure II.22</i> Illustration du principe de modèles avec sous-structures [Voo-12] | 88 |
| <i>Figure II.23</i> Principe de sous-modèle [Ram-14]..... | 88 |
| <i>Figure II.24</i> Principe de l'homogénéisation [Ait-99]..... | 89 |
| <i>Figure III-1</i> Composant Flip-chip enfoui [Boe-08]..... | 103 |
| <i>Figure III-2</i> Vue (a) du composant monté en surface, (b) du composant enfoui, (c) 1/4 du modèle selon les symétries et (d) vue en coupe d'une géométrie simplifiée de la brasure.... | 103 |
| <i>Figure III-3</i> Profil de température des simulations thermomécaniques | 105 |
| <i>Figure III-4</i> Mise en avant de la zone critique de rupture dans le cas d'un composant monté en surface | 106 |
| <i>Figure III-5</i> Extraction des résultats de simulation (maillage grossier 10 µm)..... | 107 |
| <i>Figure III-6</i> Vue de dessus de l'énergie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface avec un maillage de (a) 10µm et (b) 5µm et (c) illustration de la différence entre un maillage de 5µm et 10µm..... | 108 |
| <i>Figure III-7</i> Energie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface en fonction de la géométrie de la brasure : (a) cubique, (b) sphérique et leur maillage associé..... | 109 |
| <i>Figure III-8</i> Energie de déformation à la fin du troisième cycle (a) vue du dessus de la brasure montée en surface (b) vue du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-700G et (c) vu du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-770G..... | 111 |
| <i>Figure III-9</i> Réponse d'un matériau à des cycles de déformation imposée [Uni-10] | 114 |
| <i>Figure III-10</i> Réponse d'un matériau à des cycles de contrainte imposée [Uni-10] | 114 |

| | |
|--|------------|
| <i>Figure III-11 Courbe schématique de la réponse d'un matériau à une déformation imposée en fonction du nombre de cycles [Uni-10].....</i> | <i>114</i> |
| <i>Figure III-12 Courbes schématiques des lois de Basquin (déformation élastique), de la loi de Manson-Coffin (déformation plastique) et de la loi totale de la déformation en fonction du nombre de cycles à la rupture [Fat]</i> | <i>115</i> |
| <i>Figure III-13 Courbes de Manson-Coffin-Basquin de différents alliages de cuivre</i> | <i>116</i> |
| <i>Figure III-14 Modélisation des couches concernées par l'enfouissement de la mémoire Flash</i> | <i>116</i> |
| <i>Figure III-15 Déformation linéaire élastique sur le via à +80°C et -40°C.....</i> | <i>117</i> |
| <i>Figure III-16 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime linéaire.....</i> | <i>118</i> |
| <i>Figure III-17 Déformation totale sur le via à +80°C et -40°C en linéaire et en non-linéaire au 25^{ème} cycle</i> | <i>119</i> |
| <i>Figure III-18 Résultats de simulation centrés sur la zone à risque en régime linéaire et non-linéaire à 80°C aux 5° et 25° cycles.....</i> | <i>119</i> |
| <i>Figure III-19 Résultats de simulation de la déformation par cycle en fonction du cycle</i> | <i>120</i> |
| <i>Figure III-20 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime non-linéaire</i> | <i>120</i> |
| <i>Figure III-21 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du cycle de température en régime non linéaire.....</i> | <i>123</i> |
| <i>Figure III-22 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du composant</i> | <i>125</i> |
| <i>Figure III-23 Schéma du fléchissement du composant et mise en avant des différences de déformation des différents vias du composant STV du via central sous le composant (a) au via extérieur (d).....</i> | <i>125</i> |
| <i>Figure III-24 Structure 3D de la mémoire Flash, via cylindrique droit et double symétrie..</i> | <i>126</i> |
| <i>Figure III-25 Déformation sur les vias et le composant à +80°C.....</i> | <i>127</i> |
| <i>Figure III-26 Déformation à +80°C dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe le sens de dans la largeur.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Figure III-27 Déplacement (en m) en mètre selon l'axe z du composant</i> | <i>129</i> |
| <i>Figure III-28 Résultats en non-linéaire de la déformation à +80°C au 25^{ème} cycle dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe dans le sens de la largeur.....</i> | <i>130</i> |
| <i>Figure III-29 Vue en coupe de la déformation sur le via extérieur dans le sens de la largeur du composant Flash au 25^{ème} cycle</i> | <i>131</i> |
| <i>Figure III-30 (a) Répartition des vias sur le composant STV (1/4 de la structure) et (b)Vue du dessus de la déformation des vias à +80°C au 10^{ème} cycle avec encadré les vias étudiés</i> | <i>132</i> |
| <i>Figure III-31 Vue en coupe de la déformation (a) dans les 4 premiers vias (encadré précédemment) de la diagonale du composant (b) dans le via formant le coin.....</i> | <i>133</i> |
| <i>Figure III-32 Localisation des points critiques pour chacun des cas simulés.....</i> | <i>134</i> |
| <i>Figure III-33 Répartition de l'énergie de déformation de la brasure enterrée et de la déformation du via enterré.....</i> | <i>134</i> |
| <i>Figure III-34 Déformation des via intérieurs et extérieurs selon l'écart entre les vias</i> | <i>137</i> |
| <i>Figure III-35 Déformation sur le via extérieur en fonction de la longueur du composant ...</i> | <i>138</i> |
| <i>Figure IV-1 Schéma du prototype avec en orange le couche de cuivre et en jaune les couches de pré-imprégnés : (a) Simplification prévue usant de la technologie d'enfouissement, (b)</i> | |

| | |
|---|------------|
| <i>Schéma d'empilement du circuit 12 couches dans le cadre du projet EDDEMA avec deux couches d'accueil pour les composants enfouis.....</i> | <i>149</i> |
| <i>Figure IV-2 Etapes d'enfouissement des composants du projet avec les caractéristiques en température et en pression.....</i> | <i>151</i> |
| <i>Figure IV-3 Distribution des contraintes équivalentes dans le composant (a) à 20°C après le premier procédé d'enfouissement (sans via) (b) à 20°C après le second procédé d'enfouissement (avec via).....</i> | <i>152</i> |
| <i>Figure IV-4 (a) Plan d'expériences basé sur les simulations pour évaluer l'influence de la position des composants actifs entre eux (b) Architecture préliminaire pensée pour la couche d'accueil.....</i> | <i>155</i> |
| <i>Figure IV-5 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 1 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>156</i> |
| <i>Figure IV-6 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 2 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>156</i> |
| <i>Figure IV-7 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 3 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>157</i> |
| <i>Figure IV-8 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 4 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>157</i> |
| <i>Figure IV-9 Déformation de la couche cœur (a) en l'absence de composant et de cavité (référence) (b) en l'absence de composants mais avec les cavités et (c) avec les composants et (d) une autre disposition avec les trois composants.....</i> | <i>158</i> |
| <i>Figure IV-10 Simulation du procédé d'enfouissement de la structure avec passifs (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>160</i> |
| <i>Figure IV-11 (a) Architecture finale de la couche d'accueil, en rouge les composants passifs (b) Simplification avec des blocs de céramique.....</i> | <i>161</i> |
| <i>Figure IV-12 Résultats de simulation du procédé d'enfouissement de la structure avec passifs (a) contraintes dans la couche cœur (Pa), (b) contraintes sur les composants, (c) déformation selon l'axe z au niveau de la couche cœur (m) et (d) déformation selon l'axe z avec toutes les couches considérées (m).....</i> | <i>161</i> |
| <i>Figure IV-13 Résultats de simulation : (a) Modèle 2D de composants 2D enfouis alignés, (b) Déformation verticale dans la couche d'accueil avec composants (gauche) et sans composant (droite) (c) Déformation verticale à la fin du procédé de fabrication (m).....</i> | <i>163</i> |
| <i>Figure IV-14 Architectures alternatives imaginées dans le développement du prototype avec une couche supplémentaire de composants enfouis.....</i> | <i>164</i> |
| <i>Figure IV-15 Principe de sous-modèle appliqué au circuit EDDEMA.....</i> | <i>165</i> |
| <i>Figure IV-16 Contraintes résiduelles à la fin des étapes de fabrication dans le prépreg autour des vias après les étapes de fabrication (Pa).....</i> | <i>165</i> |
| <i>Figure IV-17 Déformation totale équivalente sur les vias après cinq cycles de températures (a) par modèle isolé, (b) par sous-modèle.....</i> | <i>166</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figure IV-18 Déformation totale équivalente dans les vias diagonaux après 5 cycles de température +80°C/-40°C en tenant compte de la fabrication.....</i> | <i>166</i> |
| <i>Figure IV-19 Inspection au rayon X d'un échantillon test du prototype 1 réalisée par SERMA technologies.....</i> | <i>169</i> |
| <i>Figure IV-20 Vue d'une microsection d'un composant passif dans le prototype 1</i> | <i>170</i> |
| <i>Figure IV-21 Evolution temporelle de la valeur de résistance du composant passif R209 enfoui.....</i> | <i>170</i> |
| <i>Figure IV-22 Vue de la microsection autour d'un composant concerné par le phénomène de réduction de résistance après les chocs thermiques</i> | <i>171</i> |
| <i>Figure IV-23 Vue d'une microsection après le bain thermique.....</i> | <i>171</i> |
| <i>Figure IV-24 Schéma du principe de TDM utilisé par Insidix [Ins].....</i> | <i>172</i> |
| <i>Figure IV-25 Mesures de déformation et de topographie en 11 étapes d'un cycle de température entre -50°C et +200°C sur (a) un échantillon sans composant et (b) un autre avec composants et cavité et leur image par rayon X respective.....</i> | <i>173</i> |
| <i>Figure IV-26 Comparaison de l'aspect de la déformation entre (a) les mesures sur un prototype non fonctionnel, (b) la déformation estimée dans la couche cœur et (c) la déformation en présence de l'ensemble des couches</i> | <i>174</i> |
| <i>Figure IV-27 Identification de la zone principale de défaillance : (a) Position attendue des composants et cavités dans le PCB, (b) défaillance observée à 200°C par TDM, (c) Image par rayon X de l'échantillon et (d) Image acoustique à 15MHz</i> | <i>176</i> |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau II-1 Tableau récapitulatif des symétries matérielles dans les matériaux composites usuels [Che-88]..... | 63 |
| Tableau II-2 Relations entre les différentes propriétés élastiques d'un matériau isotrope linéaire | 64 |
| Tableau II-3 Principales caractéristiques thermomécaniques mise en avant dans les fiches descriptives..... | 71 |
| Tableau II-4 Comparaison de mesures du module de Young du silicium polycristallin | 73 |
| Tableau II-5 Différentes valeurs du module d'élasticité pour le silicium [Hop-09] | 73 |
| Tableau II-6 Propriétés générales du silicium..... | 74 |
| Tableau II-7 Propriétés élastiques du cuivre [Son-11], [Civ]..... | 74 |
| Tableau II-8 Propriétés plastiques du cuivre électrodéposé [Son-11], [Civ] | 75 |
| Tableau II-9 Paramètres du modèle viscoplastique d'Anand pour une brasure Sn _{96,5} Ag ₃ Cu _{0,5} | 77 |
| Tableau II-10 Propriétés mécaniques élastiques de la brasure Sn _{96,5} Ag ₃ Cu _{0,5} [Mys-09] | 77 |
| Tableau II-11 Propriétés thermomécanique du PCB FR-4 « classique » [Mul-14]..... | 78 |
| Tableau II-12 Propriétés des pré-imprégnés de Hitachi envisagés [Hit-16] | 79 |
| Tableau II-13 Propriétés du cœur R-1577 de Panasonic [Pan-17]..... | 79 |
| Tableau II-14 Bilan des résultats de traction sur 9 échantillons..... | 81 |
| Tableau II-15 Propriétés élastiques et coefficient de dilatation thermique de la résine époxy en fonction de la température [Mac-14] | 83 |
| Tableau II-16 Bilan des propriétés principales retenues pour les simulations pour les différents matériaux des assemblages | 90 |
| Tableau III-1 Caractéristiques géométriques du modèle..... | 104 |
| Tableau III-2 Constantes de Darveaux dans le cas d'une brasure Sn _{96,5} Ag ₃ Cu _{0,5} [Dar-00]. | 105 |
| Tableau III-3 Estimation de la durée de vie selon le modèle de Darveaux pour un composant monté en surface avec des joints de brasure pour différents maillages et géométries | 110 |
| Tableau III-4 Propriétés thermoélastiques sélectionnées pour deux types de pré-imprégnés | 111 |
| Tableau III-5 Estimation de la durée de vie selon la méthodologie de Darveaux en fonction de la technologie (surface ou enfouissement) | 112 |
| Tableau III-6 Paramètres de Manson-Coffin-Basquin pour différents types de cuivre et certains alliages de cuivre [Vin-11][Har-17]..... | 115 |
| Tableau III-7 Divers résultats selon le nombre de cycles simulés..... | 121 |
| Tableau III-8 Evaluation de la durée de vie en fonction du cycle appliqué | 122 |
| Tableau III-9 Mise en avant des différences entre les cycles de température (résultats à échelle identique) | 122 |
| Tableau III-10 Spécifications des composants..... | 124 |
| Tableau III-11 Résultats de simulation selon le composant et le régime considéré..... | 124 |
| Tableau III-12 Résultats de simulation selon l'axe d'étude..... | 129 |
| Tableau III-13 Comparaison des résultats Linéaire (L) et Non-linéaire (NL) selon l'axe d'étude..... | 130 |
| Tableau III-14 Résultats de simulation en mode non-linéaire selon les cycles de température | 132 |

| | |
|--|------------|
| <i>Tableau III-15 Bilan des résultats de simulation pour le composant STV selon la méthode employée.....</i> | <i>133</i> |
| <i>Tableau III-16 Comparaison des méthodes d'interconnexion.....</i> | <i>135</i> |
| <i>Tableau III-17 Paramétrages des simulations complémentaires.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Tableau III-18 Résultats de simulation en fonction de l'écart entre les vias.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Tableau III-19 Résultats de simulation en fonction de la longueur du composant.....</i> | <i>138</i> |
| <i>Tableau IV-1 Caractéristiques clés des principaux composants enfouis.....</i> | <i>150</i> |
| <i>Tableau IV-2 Données matériaux du matériau de pré-imprégné initialement prévu (E770G) et de son remplaçant (R1570).....</i> | <i>150</i> |
| <i>Tableau IV-3 Conditions de température et pression des étapes clés de l'enfouissement.....</i> | <i>152</i> |
| <i>Tableau IV-4 Profil de mission du prototype.....</i> | <i>153</i> |
| <i>Tableau IV-5 Bilan selon les architectures (en rouge le cas le moins favorable, en vert le cas le plus favorable).....</i> | <i>159</i> |
| <i>Tableau IV-6 Comparaison entre l'architecture optimisée avec 3 composants actifs et l'architecture finale.....</i> | <i>162</i> |
| <i>Tableau IV-7 Coefficient de dilatation thermique considéré pour les pré-imprégné lors des simulations.....</i> | <i>167</i> |
| <i>Tableau IV-8 Comparaison des mesures de TDM à plusieurs températures clés.....</i> | <i>175</i> |

Introduction Générale

L'électronique, en tant qu'une des branches les plus importantes de la physique appliquée, est une science de l'ingénieur qui étudie et conçoit les structures pour le traitement des signaux électriques. Les progrès dans cette science ont mené au développement de la micro-électronique, étude et fabrication de composants électroniques à l'échelle micrométrique. Ces composants sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs (comme le silicium) au moyen de diverses technologies. Un composant électronique est un élément qui, assemblé avec d'autres selon un schéma électronique, permet de réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques. Le développement des objets électroniques suit deux voies principales : tout accumuler en un seul appareil pouvant réaliser toutes les fonctions ou proposer des fonctions pour compléter d'autres structures, l'électronique embarquée.

L'exemple le plus juste d'accumulation est le smartphone qui s'est éloigné de son simple rôle de permettre des appels vocaux et intègre un appareil photo, des applications, une connexion internet, une géolocalisation, etc... Tandis que la complétion se manifeste bien mieux dans le secteur automobile avec le travail des équipementiers. Historiquement, ce rôle remonte aux origines de l'automobile qui nécessitait d'être équipée de pneus, de systèmes de frein, d'allumage, etc... Aujourd'hui, ce rôle a su évoluer et dans l'intégration des fonctions électroniques telles que le GPS, les conduites assistées, les caméras de recul, etc.... Dans tous les cas, cette électronique embarquée est parfois dispensable mais participe au confort des utilisateurs.

Un système embarqué, de nature électronique ou informatique, est un système autonome, souvent temps réel, spécialisé dans une tâche bien précise. Les contraintes techniques d'intégration de tels systèmes sont généralement d'ordre spatial (encombrement réduit, poids, ...) et énergétique (consommation restreinte, puissance disponible, ...). Un système électronique comprend plusieurs composants électroniques assemblés autour d'un élément support, le PCB. L'assemblage de ces composants autour de ce support se fait avec diverses techniques dont l'enfouissement des composants dans le PCB.

L'assemblage par enfouissement qui est au cœur de la présente étude est issu d'une réflexion poussant les limites de l'espace utilisable dans un système électronique. En effet, après avoir couvert la surface du support, développé des méthodes telles que le Flip-chip pour réduire les interconnexions, superposé les composants, le cœur du support restait un volume exploitable. Une telle configuration offre une nouvelle possibilité pour réduire l'encombrement. Mais aux contraintes techniques, il s'ajoute des contraintes économiques de fiabilité et de coût des systèmes embarqués. Or les composants enfouis sont soumis à des contraintes thermomécaniques sévères liées au procédé d'assemblage (laminage, température, compression) et aux conditions de fonctionnement (températures, vibrations). En effet, les différents comportements thermomécaniques des matériaux constitutifs des assemblages entraînent des altérations physiques du système. L'un des phénomènes les plus visibles est l'effet voilé de certains circuits électroniques pouvant affecter le fonctionnement des composants, des interconnexions ou du circuit. Ces considérations amènent à la définition des

contraintes économiques des systèmes embarqués, la fiabilité et le coût qui s'ajoutent aux contraintes techniques.

Développer un assemblage le plus fiable possible nécessite certains coûts qui peuvent être réduits par l'usage de méthodes d'analyses telles que la modélisation numérique. Compte tenu de la densité de composants et d'interconnexions dans le système, la modélisation numérique en 3 dimensions s'avère difficile à mettre en œuvre. Le principal objectif de cette thèse est de développer une méthodologie dans l'étude de systèmes enfouissant des composants électroniques. Il est proposé d'étudier le problème selon deux niveaux, une version simplifiée du système entier pour ce qui est de son comportement macroscopique et une étude des composants isolés pour des comportements microscopiques.

Le premier chapitre établit un état de l'art des diverses techniques d'interconnexions et d'assemblage en microélectroniques en aboutissant sur l'enfouissement de composants, des défaillances observables et du projet EDDEMA. Le second chapitre synthétise les propriétés des matériaux constituant le système et les techniques de modélisation employées. Le chapitre 3 étudie les avantages de la technologie selon les techniques d'assemblage à l'échelle des composants. Enfin, le chapitre 4 décrit un comportement plus macroscopique du système en s'appuyant sur un prototype réalisé au cours du projet et intègre les modèles précédents.

Chapitre I

L'évolution des assemblages électroniques vers le 3D pour de nouvelles applications et exigences

Sommaire

| | |
|---|----|
| Table des figures : Chapitre I | 20 |
| I.1 Introduction..... | 22 |
| I.2 Packaging : assembler et connecter | 23 |
| I.2.1 Les interconnexions | 25 |
| I.2.2 La carte électronique : une architecture complexe | 32 |
| I.3 Technologie d'enfouissement dans le projet EDDEMA | 37 |
| I.3.1 Enjeux technologiques | 37 |
| I.3.2 Projet EDDEMA | 47 |
| I.4 Conclusion | 48 |
| I.5 Références bibliographiques | 50 |

Table des figures : Chapitre I

| | |
|---|----|
| <i>Figure I-1 Mise en évidence de la loi de Moore avec l'exemple de processeur Intel [Moo-65]</i> | 22 |
| <i>Figure I-2 Evolution des assemblages électroniques selon « More Moore » et « More than Moore » [Itr-07]</i> | 23 |
| <i>Figure I-3 Niveaux de packaging électronique [Ban]</i> | 24 |
| <i>Figure I-4 Photo d'un circuit imprimé prototype conçu par AT&S dans le cadre du projet EDDEMA</i> | 25 |
| <i>Figure I-5 Exemple de câblage filaire [Fir]</i> | 26 |
| <i>Figure I-6 Illustration d'un « wire bonding » connecté à gauche par la technique « ball-bonding » (a) et à droite par du « wedge-bonding » (b) [Cha-14]</i> | 27 |
| <i>Figure I-7 Connexion de type TAB [Vas-05]</i> | 27 |
| <i>Figure I-8 Schéma d'une puce connecté par (a) wire bonding, (b) TAB et (c) Flip-Chip [Hal-95]</i> | 28 |
| <i>Figure I-9 Controlled Collapse Chip Connection Flip-Chip technology [Deh-94]</i> | 29 |
| <i>Figure I-10 Assemblage Flip-Chip basé sur la thermocompression [Gle]</i> | 29 |
| <i>Figure I-11 Collage Flip-Chip (a) avec un adhésif conducteur isotrope et (b) avec un conducteur anisotrope [Kri-98]</i> | 30 |
| <i>Figure I-12 Schémas de complexification du circuit imprimé pour assurer une haute densité de connexions avec en (1) via traversant, (2) via enterré et (3) via borgne</i> | 31 |
| <i>Figure I-13 Vue en coupe d'un assemblage avec des TSVs et schéma d'un TSV [Mah-17]</i> | 31 |
| <i>Figure I-14 Evolution du premier niveau de packaging ces dernières décennies [Rah-17]</i> | 32 |
| <i>Figure I-15 Exemple de puce nue montée (CoB) [Ees]</i> | 33 |
| <i>Figure I-16 Comparaison entre un assemblage SoC (System on Chip) et MCM (Multi-Chip Module) [Min-05]</i> | 33 |
| <i>Figure I-17 Comparaison entre (a) un assemblage MCM traditionnel et (b) un assemblage 2,5D utilisant un interposeur en silicium [Max-12]</i> | 34 |
| <i>Figure I-18 Schéma de différents assemblage SiP : (a) 2D SiP de type MCM et (b) 3D SiP utilisant du wire bonding (gauche) et des TSVs (droite) [Ble-17]</i> | 35 |
| <i>Figure I-19 Vue en coup d'un assemblage SoP utilisant la technologie films minces [San-09]</i> | 35 |
| <i>Figure I-20 Schéma d'un assemblage PoP [Val-08]</i> | 36 |
| <i>Figure I-21 Procédé basique d'enfouissement d'un composant dans un PCB [Sta-13]</i> | 36 |
| <i>Figure I-22 Deux principales méthodes d'interconnexion (a) Flip-Chip et (b) Via [Yan-15]</i> | 37 |
| <i>Figure I-23 Trois procédés basiques d'assemblage avec composants enfouis (a) sur un substrat d'accueil, (b) dans des cavités creusées dans le substrat d'accueil, et (c) Sans substrat cœur [Yan-15]</i> | 38 |
| <i>Figure I-24 Exemple (a) d'un circuit avec composants enfouis montés sur les deux faces d'un substrat d'accueil et (b) d'un circuit multicouches avec plusieurs méthodes pour enfouir les composants [Yan-15]</i> | 39 |
| <i>Figure I-25 Exemple de profil de laminage typique de température et de pression pour enfouir un composant</i> | 39 |
| <i>Figure I-26 Cas de stress thermique dans les couches laminées [Sta-18]</i> | 40 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figure I-27 Brevet de Motorola sur l'enfouissement de composants verticaux utilisant une couche intermédiaire de résine [Zol-05]</i> | <i>41</i> |
| <i>Figure I-28 Brevet de Samsung sur l'utilisation de plots prédisposés avant le pressage d'une couche isolante avec cavité avant le remplissage par une résine de cette cavité [Mok-08] ...</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-29 Brevet de Matsushita sur l'utilisation de vias pré-intégrés à la couche isolante avant le pressage [Sug-04]</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-30 Brevet d'Unimicron Technology Corp. sur l'enfouissement d'un composant disposant d'une surface active, des limiteurs (couche d'arrêt) empêchent la surface active d'être recouverte par la résine lors du pressage [Tse-15]</i> | <i>42</i> |
| <i>Figure I-31 Illustration des problèmes de compatibilité électromagnétique [Dub-09]</i> | <i>43</i> |
| <i>Figure I-32 Vue en coupe d'une soudure présentant une fissure s'étant propagée sur l'ensemble de la zone de contact [Lar-03].....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure I-33 Observation d'une fissure dans la résine après un test de cycles thermiques (de 125°C à -55°C) [Lar-03]</i> | <i>44</i> |
| <i>Figure I-34 Résultats de simulation mis en avant par [Alt-12] (a) vue en coupe schématique d'une capacité et d'une résistance enfouie, (b) Stress thermique induit par les étape de laminage, (c) Distribution du stress normal avant et après l'essai de flexion.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Figure I-35 Résultats de simulation mis en avant par [Kpo-16] (a) Vue en coupe du modèle avec h la hauteur et w la distance entre le composant et le bord de la cavité (b) Stress (MPa) dans le composant à la fin de la fabrication pour deux hauteur de cavité i) h = 325µm et ii) h = 145µm</i> | <i>45</i> |
| <i>Figure I-36 Impact de l'épaisseur de la couche sur la fabrication [Osm-13].....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure I-37 Nombre normalisé de cycles avant défaillance pour un package BGA en fonction de l'épaisseur du PCB [Sta-13]</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure I-38 Composition du dispositif de caméra actuellement utilisé</i> | <i>47</i> |

I.1 Introduction

Depuis le début du XX^{ème} siècle, l'électronique s'est beaucoup développée. Des fonctions toujours plus complexes sont ainsi obtenues par l'assemblage de composants électroniques de plus en plus petits tels que le transistor, composant fondamental de l'électronique.

Au fur et à mesure des découvertes de nouveaux besoins sont apparus Parmi ces besoins, il est possible d'identifier deux grands axes de perfectionnement : l'amélioration des composants, des circuits intégrés, avec par exemple la miniaturisation des composants ou le choix des matériaux de fabrication, et l'amélioration des connectiques entre composants avec notamment l'optimisation des circuits imprimés et de leurs méthodes de fabrication. Ces deux axes s'intègrent à ce que l'on appelle le « More Moore » et le « More than Moore », deux orientations héritières du postulat de Gordon Moore (Ingénieur de Fairchild Semiconductor, un des trois fondateurs d'Intel) qui annonçait que le nombre de transistors dans les microprocesseurs des ordinateurs doublerait chaque année suivant la tendance existante depuis sa création en 1959, qui a été énoncé pour la première fois en 1965 dans « Electronics Magazine » (cf. Figure I.1).

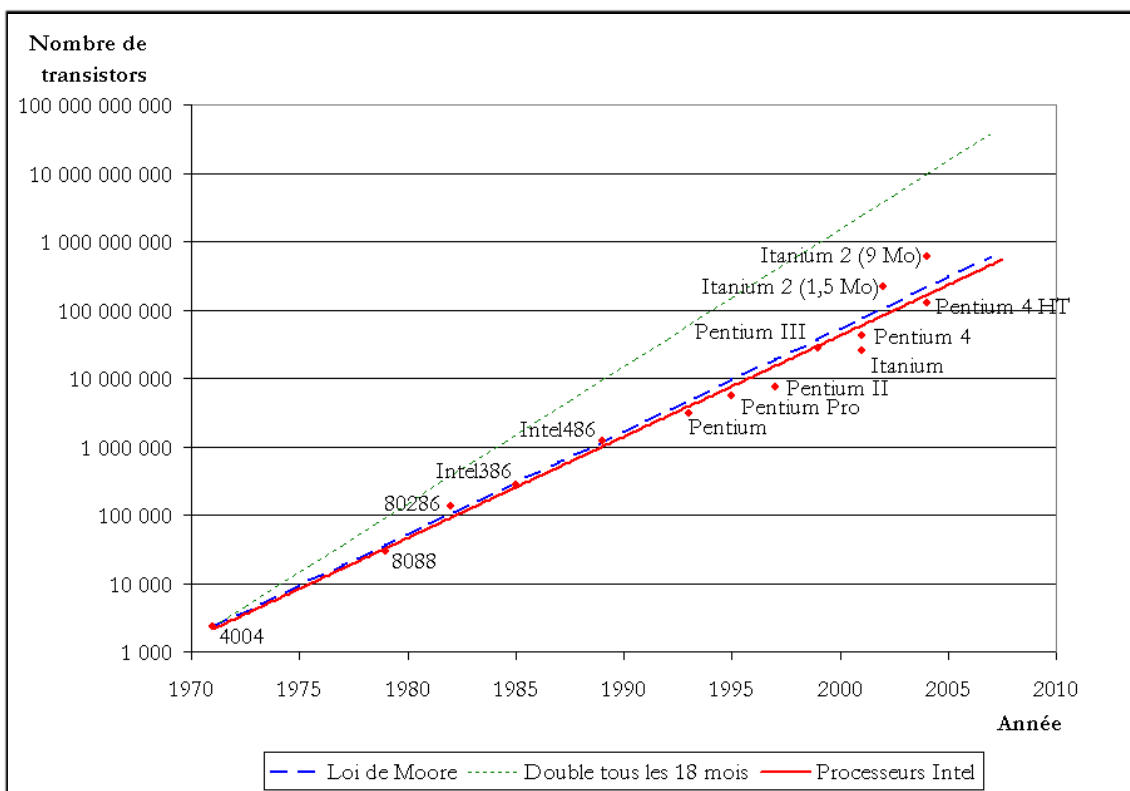


Figure I-1 Mise en évidence de la loi de Moore avec l'exemple de processeur Intel [Moo-65]

Le « More Moore » est la suite logique de la loi de Moore initiale en ce qui concerne le rythme de miniaturisation des composants électroniques alors que le « More than Moore » s'axe sur la complexification des assemblages et la multiplication des fonctions présentes sur une unique puce pour pallier aux limitations du postulat de base (Figure I.2). L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse se positionne dans la problématique du « More than Moore ».

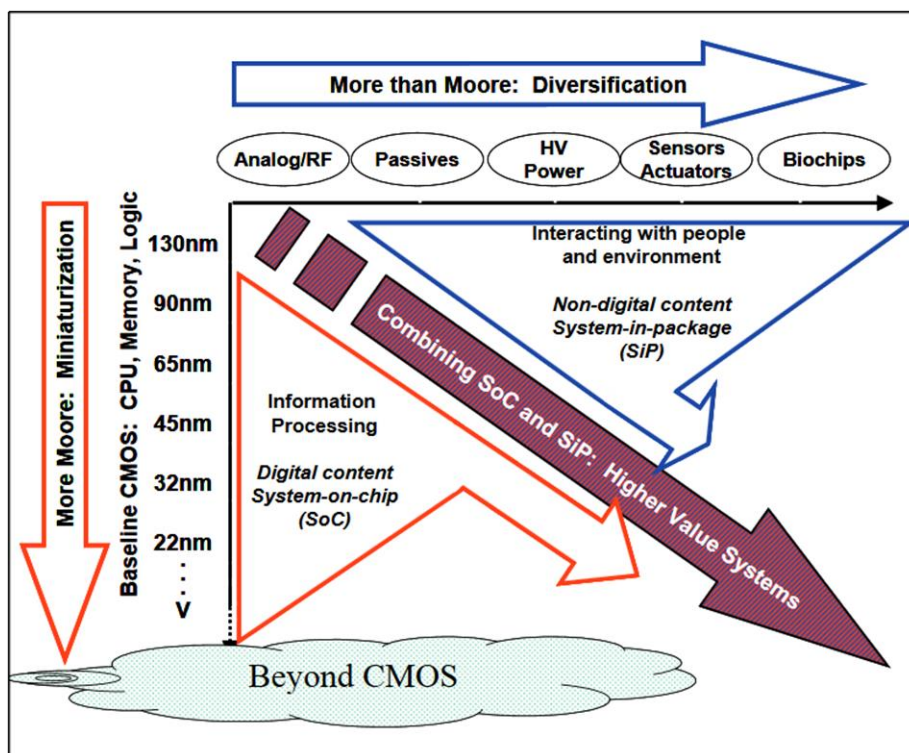


Figure I-2 Evolution des assemblages électroniques selon « More Moore » et « More than Moore » [Itr-07]

L'intérêt de ce premier chapitre est de positionner le travail de thèse dans le cadre de l'évolution incessante des assemblages électroniques en présentant les techniques d'assemblage et les technologies d'interconnexion afin de justifier l'intérêt porté à la technologie d'enfouissement des composants.

I.2 Packaging : assembler et connecter

Dans la réalisation de fonctions électroniques, le packaging permet « d'établir les interconnexions et l'environnement nécessaires aux circuits intégrés pour traiter ou stocker de l'information » [Dio-17]. L'importance du packaging est venue avec la complexification des fonctions et des besoins de production tels que la quantité, la reproductibilité et la fiabilité. Les préoccupations liées au packaging reposent sur les échanges et interactions du dispositif électronique avec son environnement. Le packaging doit répondre au besoin de la fonction électronique d'échanger électriquement, optiquement et/ou thermiquement avec l'extérieur mais aussi de la préserver d'altérations par le milieu extérieur telles que des chocs ou de l'humidité. Le principe de packaging intervient à plusieurs niveaux (cf. Figure I.3) dans la conception de dispositifs électroniques selon sa complexité :

- Niveau 0 : échelle de la puce
- Niveau 1 : conception du circuit intégré, mise en boîtier
- Niveau 2 : connexion sur un circuit imprimé, mise en relation de plusieurs circuits intégrés pour former une carte électronique
- Niveau 3 : interconnexion entre plusieurs cartes
- Niveau 4 : mise en boîtier principal pour finaliser le produit

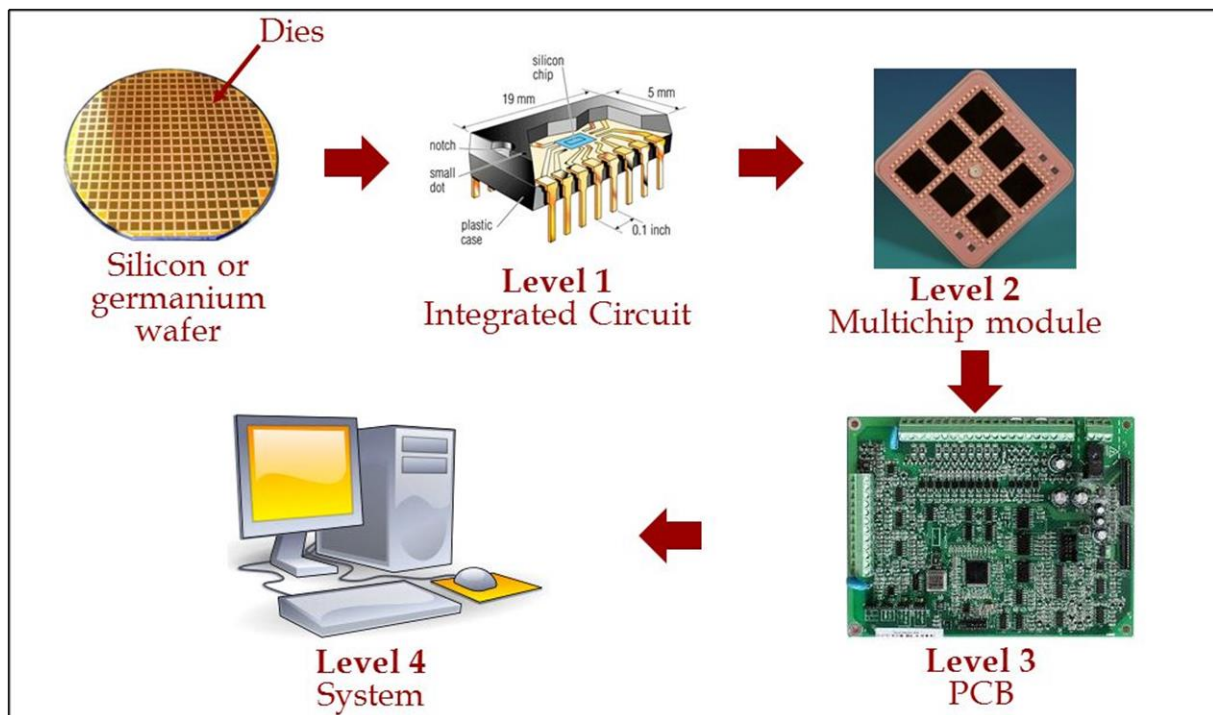


Figure I-3 Niveaux de packaging électronique [Ban]

Le nombre de niveaux de conception dépend grandement de la complexité du dispositif électronique. Le niveau 4 représente le produit final fonctionnel que l'utilisateur se procure et avec lequel il interagit. Il prend en compte les éléments les plus basiques pour communiquer avec l'extérieur tels que le câble d'alimentation, l'interrupteur de mise en service et tout périphérique nécessaire pour commander la machine.

Au niveau 3, la préoccupation est sur la mise en relation de plusieurs cartes électroniques destinées à une unique fonction dans le système global. Ce niveau de packaging n'existe que pour les produits les plus complexes nécessitant un partitionnement des fonctions.

L'architecture d'une simple carte électronique et la connexion entre le circuit intégré dans son boîtier et le circuit imprimé concernent le niveau 2. Le circuit imprimé, désigné par l'abréviation PCB qui signifie Printed Circuit Board, est un support mécanique pour les composants électroniques qui les relie électriquement par l'intermédiaire de pistes conductrices généralement en cuivre [Gil-99]. Il représente la base du circuit électronique, c'est pourquoi il est souvent appelé par abus de langage carte électronique. La structure générale visible d'un circuit imprimé est constituée d'un matériau isolant utilisé comme support, d'une ou plusieurs couches gravées de cuivre qui servent de pistes conductrices et d'une couche protectrice pour prévenir toute oxydation ou destruction de ces couches de cuivre (cf. Figure I.4). Son origine remonte au début du XX^e siècle avec le dépôt d'un brevet [Par-03] d'un système de fils conducteurs collés sur un papier de paraffine. Ce système ne consistait pas réellement en l'impression d'un circuit conducteur sur un support solide mais il représente les prémices de ce que sont les circuits imprimés d'aujourd'hui.

Enfin, le niveau 1 est la réalisation d'un boîtier permettant d'utiliser la fonction primaire présente sur la puce, qui représente le niveau 0.

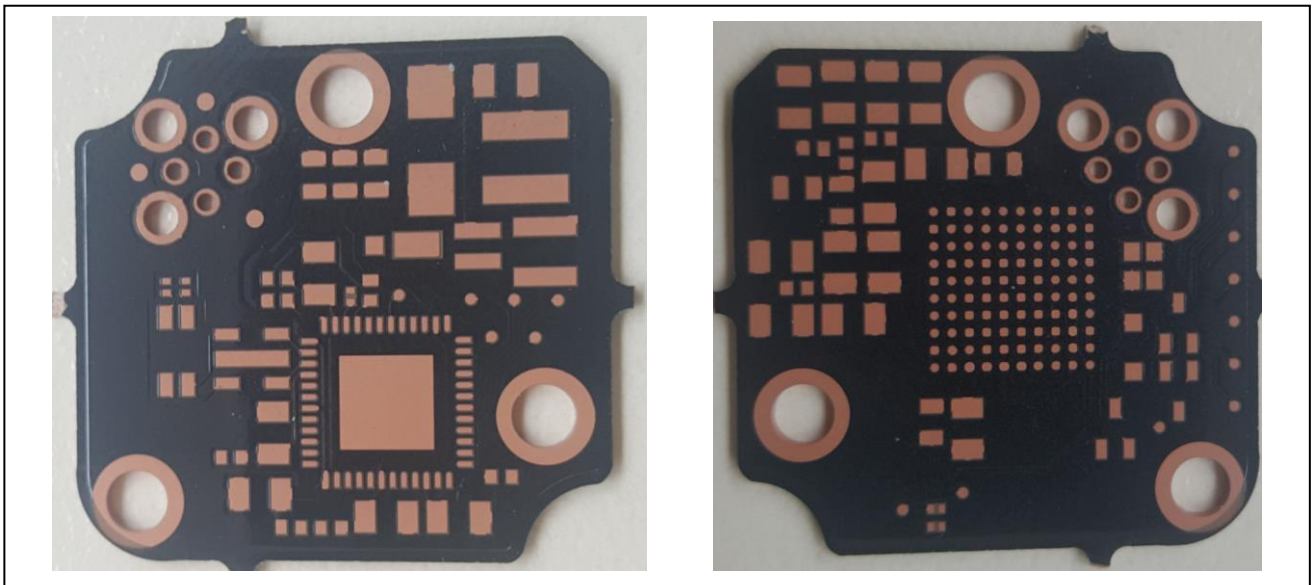


Figure I-4 Photo (recto/verso) d'un circuit imprimé prototype conçu par AT&S dans le cadre du projet EDDEMA

Chaque niveau de conception entraîne des contraintes de qualité et de fiabilité sur le dispositif final. Les enjeux technologiques de miniaturisation et de complexification des composants et des cartes ont naturellement apporté de nouveaux besoins dans l'assemblage des circuits électroniques. La résolution de ces questionnements passe par deux problématiques : les choix architecturaux de l'assemblage et les interconnexions reliant les différents niveaux d'assemblage.

I.2.1 Les interconnexions

Dans la réalisation du packaging il est nécessaire de lier électriquement les composants entre eux et avec l'environnement : ce sont les interconnexions [Usg-05]. Les caractéristiques d'une interconnexion sont liées à son rôle dans le circuit, à la nature de l'information qu'elle fait transiter et à l'échelle de fabrication, toutes les méthodes ne sont pas toujours applicables et les contraintes physiques peuvent être différentes. Il entre également en compte un aspect économique à la réalisation d'interconnexions. Les challenges majeurs des interconnexions apparaissent donc principalement avec l'échelle de fabrication et donc le niveau 1 de packaging et la place disponible.

En télécommunication hyperfréquence, de nombreux circuits intégrés sont réalisés sur des semi-conducteurs monolithiques. Il est alors nécessaire de connecter le substrat au corps de la puce. En effet, ces connexions doivent suivre la réduction d'échelle des transistors tout en gardant leur qualité de conduction. L'objectif est donc de limiter les pertes en parvenant à fabriquer des connexions précises qui tolèrent de forte densité de courant, capables de dissiper efficacement la chaleur et qui suivent la diminution de taille des circuits tout en libérant de la place pour connecter plus de composants.

On mettra en avant 3 méthodes pour connecter les composants : l'accès direct au composant, les techniques dites Flip-Chip où le composant est retourné pour faire face au support de connexion, et les méthodes plus intrusives.

I.2.1.1 Wire bonding et Tape-Automated Bonding (TAB)

Comme précédemment mentionné, le corps d'une carte électronique repose sur le circuit imprimé qui consiste en une couche de cuivre gravée sur un support isolant. Outre leur liaison, la disposition des composants sur la surface du PCB est cruciale dans la conception d'un dispositif électronique.

L'une des connexions de base les plus anciennes est le « wire bonding », réalisée à l'aide de fils métalliques comme l'illustre la figure I.5. Le fil assure le lien entre le composant et le circuit imprimé. Des connexions de ce type réalisées communément avec de l'or, du cuivre ou de l'aluminium, ne sauraient supporter la réduction d'échelle et utiliser le « wire bonding » en hautes fréquences entraînerait une inductance élevée [Har-10]. En effet, la qualité de la connexion s'altère grandement pour des petites tailles (dans les limites du réalisable), le système se fragilise et le « wire bonding » occupe une surface relativement grande sur le support.

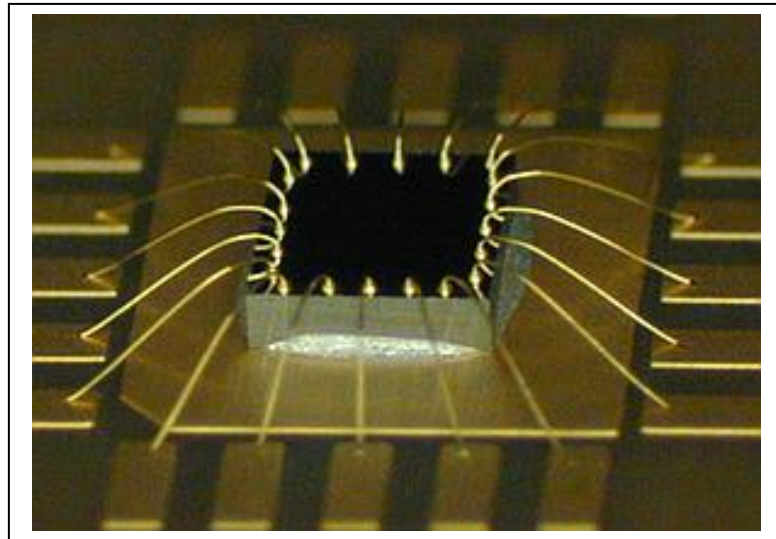


Figure I-5 Exemple de câblage filaire [Fir]

Pour réaliser la connexion filaire, deux techniques de soudure sont possibles pouvant être réalisées selon trois moyens :

- la thermocompression, durant laquelle la soudure se fait à température élevée et par application d'une force de pression
- la pression ultrasonique, méthode qui combine l'application de vibrations ultrasoniques et la pression mécanique,
- la thermo sonique qui permet de réaliser une jonction à plus faible température en reprenant les méthodes de thermocompression et de pression ultrasonique.

Les méthodes utilisant la thermique pour la réalisation de la soudure permettent la technique dite du « ball-bonding » alors que les méthodes ultrasoniques permettent le « wedge-bonding ».

- Le « ball-bonding » consiste à déformer l'extrémité du fil en une bille par l'effet de la température qui sera écrasée sur un plot de connexion.

- Le « wedge-bonding » consiste à faire épouser le plan à l'extrémité du fil. Le plus courant aujourd'hui est la réalisation d'un « ball-bonding » à une extrémité du fil et un « wedge-bonding » à l'autre (cf. Figure I.6).

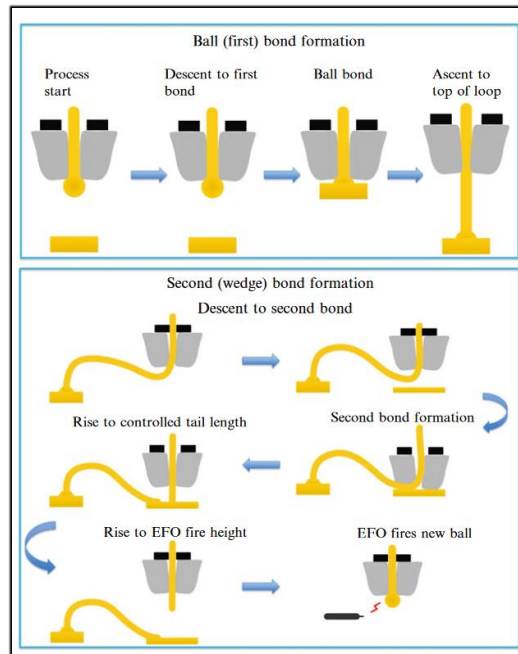


Figure I-6 Illustration d'un « wire bonding » connecté à gauche par la technique « ball-bonding » (a) et à droite par du « wedge-bonding » (b) [Cha-14]

Dans l'optique d'accéder directement aux connexions de la puce, il existe la technologie Tape Automated Bonding (TAB). Des pattes de connexion sont fixées à la puce nue qui a subi un traitement adapté pour la réalisation des soudures. La figure I.7 est un exemple de l'assemblage formé par les pattes et la puce sur un circuit complet.

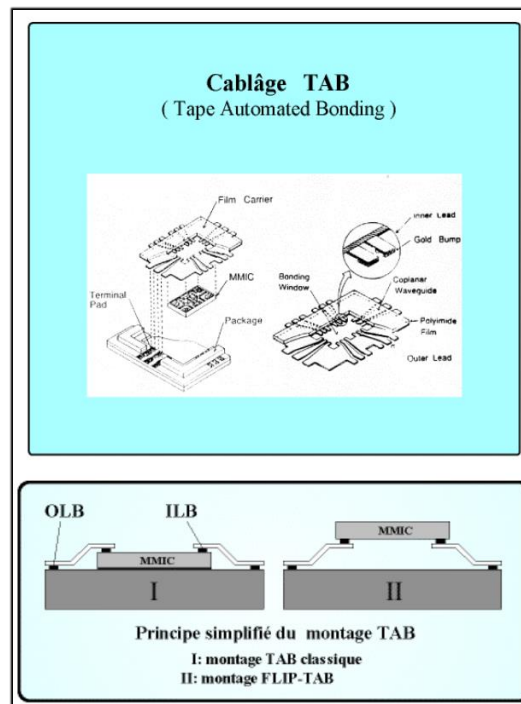


Figure I-7 Connexion de type TAB [Vas-05]

Les deux types d'interconnexion exposés Figure I.7 permettent à tout moment d'accéder aux entrées et sorties des composants au niveau du circuit, rendant possible un contrôle ou une modification de l'interconnexion sans toucher au composant et au circuit, mais entraîne un besoin d'espace autour du composant. La solution apportée pour réduire l'espace occupé est de retourner la puce pour réaliser des connexions plus directes avec le circuit, la méthode Flip-Chip.

I.2.1.2 Flip-Chip

L'assemblage Flip-Chip consiste à retourner la puce pour réaliser des connexions plus directes avec le substrat sous la puce [Ton-13]. La figure I.8 illustre parfaitement l'avantage que représente le Flip-Chip en termes de densité d'intégration de composant par rapport aux interconnexions précédentes. En effet, cet assemblage, en plus de réduire la longueur de la connexion et donc le temps de réponse, assure un encombrement minimum puisque la surface d'intégration n'excède plus celle de la puce. De plus, cette technique assure la connexion simultanée de l'ensemble des connexions et n'est plus soumise à un travail point par point comme pour le « wire bonding » [Ele-00]. Les billes utilisées dans certains cas de Flip-Chip peuvent même être déposées sur l'ensemble du wafer avant découpage en composant individuel et les sorties n'ont plus à être en périphérie du composant, ce qui est un plus par rapport au TAB. Le Flip-Chip est très dépendant de sa fabrication pour assurer une fiabilité de montage que ce soit pour l'alignement des connexions ou pour assurer la tenue mécanique des connexions. En effet, l'assemblage requiert des conditions de pression et de température globale. Trois grandes méthodes de fabrication se dégagent : la brasure de microbilles, la thermocompression et le collage.

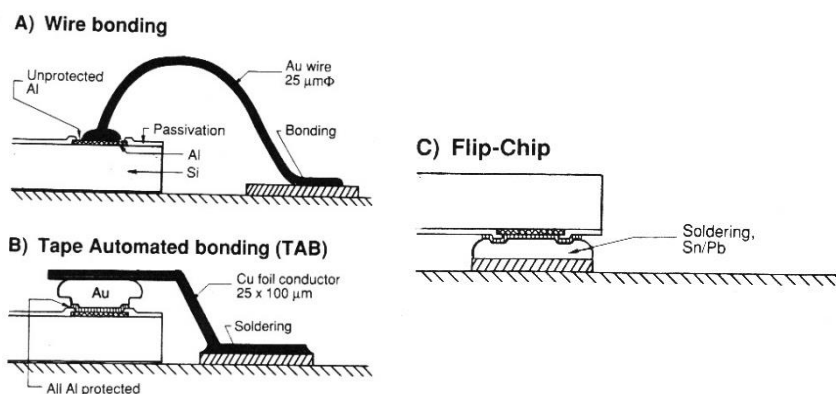


Figure I-8 Schéma d'une puce connectée par (a) wire bonding, (b) TAB et (c) Flip-Chip [Hal-95]

Dans un objectif de productivité et de coût, IBM a introduit une technologie d'assemblage Flip-Chip reposant sur une matrice de microbilles de brasure sous le nom de Control Collapse Chip Connection (C4) [Rao-89]. Cette technique demande une préparation spécifique des sorties de la puce pour déposer au-dessus une bille d'alliage fusible (cf. figure I.9). Les billes assurent une liaison électrique et mécanique entre le composant et le substrat. Originellement la bille était en SnPb mais dans l'optique de réalisation de circuit sans plomb, le SnAgCu est utilisé. De nombreuses variantes de cette technique se sont développées au cours du temps. Pour pallier aux problèmes de tenue mécanique et de fiabilité liés aux

différences de dilatation thermique des différents matériaux présents dans l'assemblage, une résine non conductrice dite « underfill » peut être injectée entre la puce et le substrat. Cette résine permet de limiter la déformation des billes et de renforcer le maintien de la puce sur le substrat.

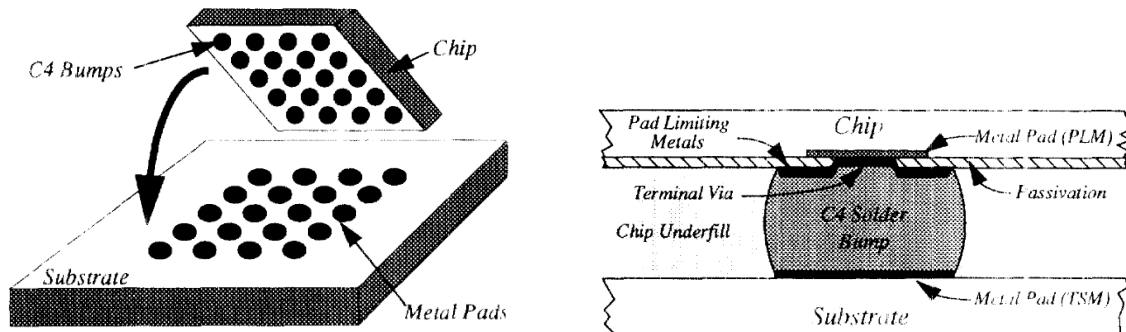


Figure I-9 Controlled Collapse Chip Connection Flip-Chip technology [Deh-94]

Le second procédé d'assemblage Flip-Chip repose sur la thermocompression. A la place de microbilles de brasure, ce sont des billes métalliques, typiquement en or, qui sont disposées sur les plots de connexion de la puce ou du substrat. La liaison s'effectue alors par l'application d'une force de compression et d'une température élevée – environ 300°C pour l'or) (cf. figure I.10). Là encore, une résine « underfill » peut être rajoutée.

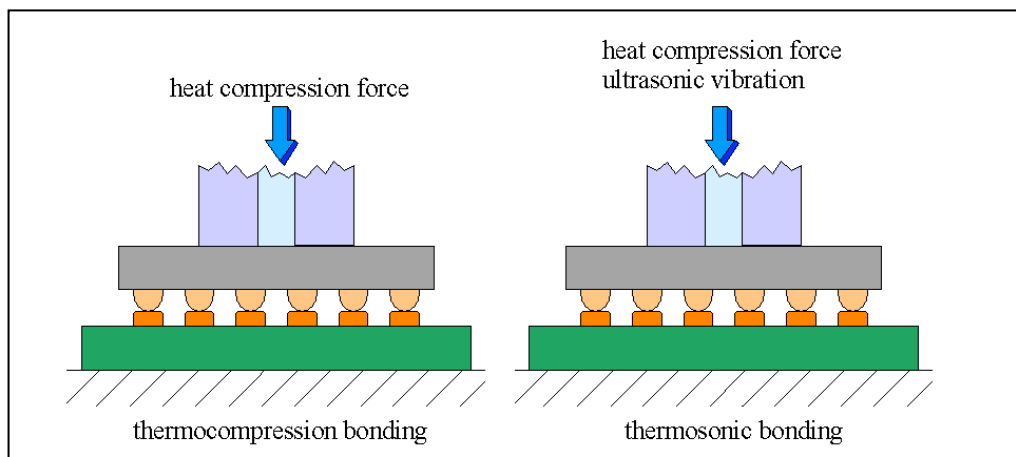


Figure I-10 Assemblage Flip-Chip basé sur la thermocompression [Gle]

Enfin la dernière technique, le collage repose sur le principe des matériaux adhésifs qui remplacent la résine « underfill ». Trois types d'adhésifs existent : les adhésifs non conducteurs, les adhésifs conducteurs isotropes et les adhésifs conducteurs anisotropes [Kri-98].

Dans l'utilisation d'un adhésif non conducteur, le plot assure la connexion électrique, il est donc nécessaire d'assurer la bonne pénétration à travers l'adhésif en réalisant des plots pointus. L'adhésif conducteur isotrope quant à lui comporte des particules métalliques le rendant conducteur : il est placé sur les supports de l'interconnexion pour assurer le lien entre électrique sans qu'il soit nécessaire au plot de pénétrer l'adhésif (cf. figure I.11.a).

Evidemment il est nécessaire que la distance entre deux interconnexions soit suffisamment grande pour éviter un court-circuit lorsque l'adhésif se répand lors de l'assemblage. Enfin l'adhésif conducteur anisotrope comporte lui aussi des éléments métalliques mais la dispersion de ceux-ci est faite telle que la connexion électrique est inexistante dans l'adhésif. La connexion électrique au niveau des zones d'interconnexion se fera lors de l'assemblage avec les éléments mécaniques qui seront piégés entre la puce et le circuit (cf. figure I.11.b).

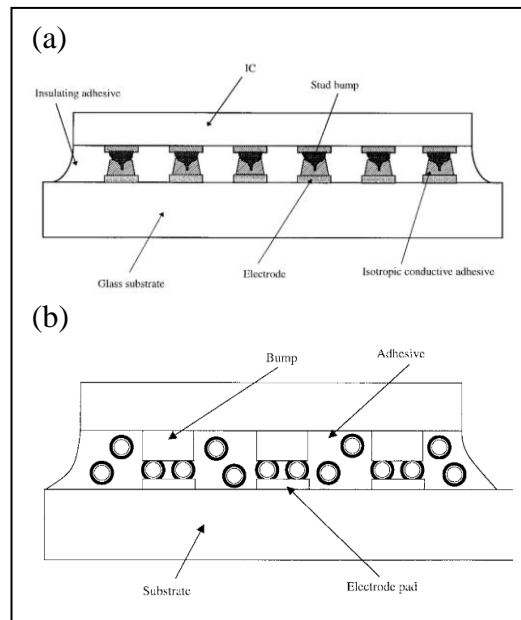


Figure I-11 Collage Flip-Chip (a) avec un adhésif conducteur isotrope et (b) avec un conducteur anisotrope [Kri-98]

Le collage permet de réduire la température lors de l'assemblage puisque la température de polymérisation de l'adhésif conducteur est plus basse que celle de la thermocompression. Même si la réalisation de plots pointus ajoute une difficulté à la fabrication, le collage réduit le nombre d'étapes puisqu'il n'y a besoin de résine underfill pour améliorer le maintien mécanique. Malheureusement, le collage voit généralement sa fiabilité diminuer en raison du vieillissement des adhésifs (détérioration due à l'humidité, aux chocs et vibrations) et, dans le cas d'un adhésif conducteur anisotrope, d'une surface de contact réduite et hétérogène car limitée par le nombre d'éléments conducteurs qui forment chacune des connexions.

L'assemblage Flip-Chip présente des avantages certains pour l'électronique et plusieurs possibilités de fabrication répondant aux besoins. Malheureusement, il n'est pas possible d'assurer une réparation sur une interconnexion spécifique ou d'effectuer un contrôle sur le composant directement. D'autre part le désassemblage requiert soit l'utilisation de solvants soit de détériorer le circuit. Il est donc souvent préférable de remplacer l'ensemble du circuit.

I.2.1.3 Via traversant (Through Silicon Via TSV)

L'utilisation de vias (interconnexions verticales entre les puces) est apparue avec la complexification des circuits électroniques. L'augmentation du nombre de connexions par

composant et le nombre de composants sur un circuit imprimé imposent des lignes de connexion sur plusieurs étages pour éviter qu'elles s'entrecroisent. La figure I.12 présente le principe de connexion des circuits double face et multicouches à l'aide de vias. Le via devient alors une interconnexion entre les couches du circuit imprimé.

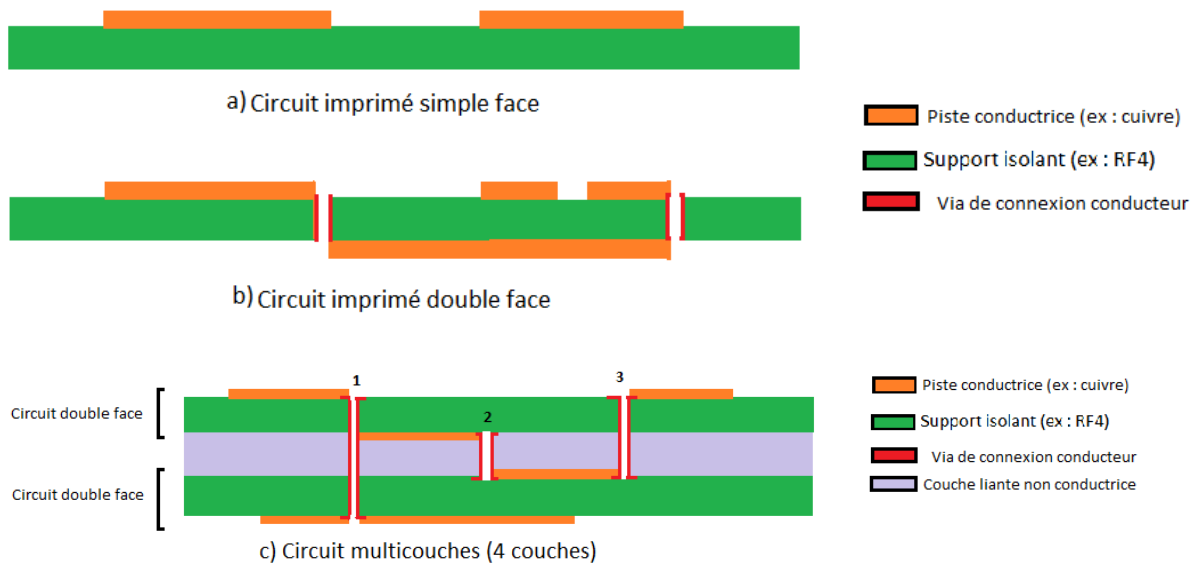


Figure I-12 Schémas de complexification du circuit imprimé pour assurer une haute densité de connexions avec en (1) via traversant, (2) via enterré et (3) via borgne

Pour aller plus loin, il est possible de réaliser des vias traversant les composants silicium, les Through Silicon Vias (TSVs) pour éviter le retournement imposé par l'assemblage Flip-Chip tout en bénéficiant du gain de place (cf. Figure I.13). A la différence des vias présents dans les circuits imprimés il est nécessaire de réaliser une couche isolante entre le silicium de la puce et le cuivre qui remplit le via pour la connexion électrique. Cette technique est très appréciée pour l'empilage de puces dans le cadre d'une architecture 3D (voir II.2.2.2).

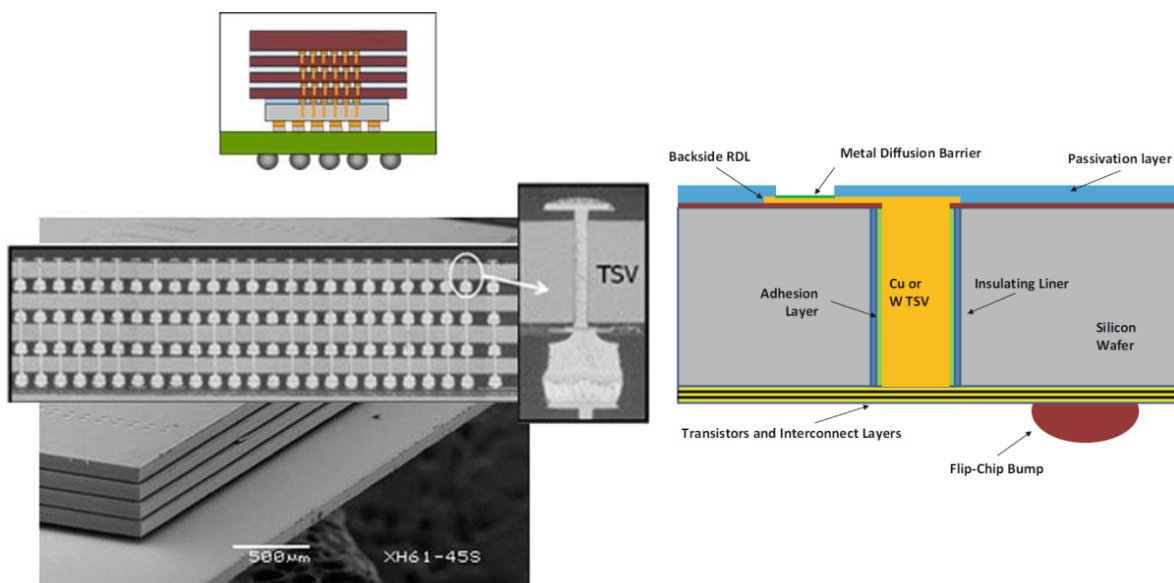


Figure I-13 Vue en coupe d'un assemblage avec des TSVs et schéma d'un TSV [Mah-17]

Le packaging ne se limite pas à la liaison entre les différents éléments mais repose également sur leur disposition judicieuse. Quelques points essentiels relatifs à l'architecture ont déjà été mis en avant comme l'augmentation de la densité d'intégration avec notamment le développement de circuits multicouches.

I.2.2 La carte électronique : une architecture complexe

La réalisation d'une carte électronique repose sur la conception du circuit et la disposition des composants. La miniaturisation des composants qui permet d'augmenter la densité d'intégration a nécessité de développer de nouvelles méthodes d'interconnexion. Les premières améliorations ont été faites au niveau du circuit imprimé avec le développement des circuits double faces et multicouches offrant la possibilité d'intégrer plus de composants. Les architectures qui se développent depuis quelques décennies reposent ainsi sur une intégration 2D plus poussée allant jusqu'à l'intégration 3D (cf. Figure I.14).

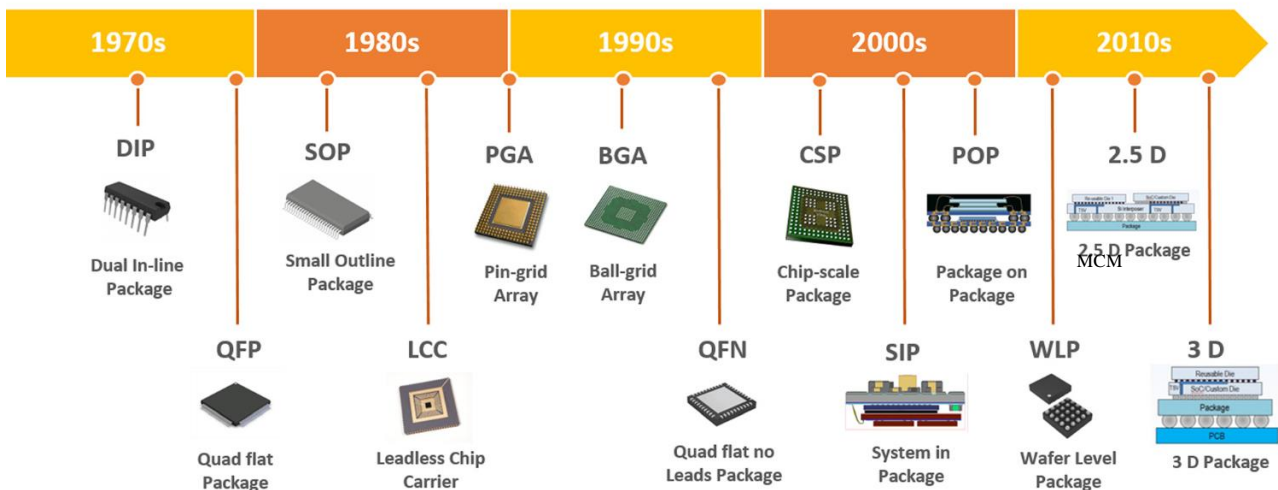


Figure I-14 Evolution du premier niveau de packaging ces dernières décennies [Rah-17]

I.2.2.1 Utiliser la surface plus intelligemment : l'intégration 2D

Les solutions d'intégration 2D plus poussées qui apparaissent sont :

- le System on Chip (SoC), premières technologies utilisant des pattes développées avant les années 2000 (DIP, SOP, QFP, PGA, BGA,...)
- le Chip on Board (CoB), l'objectif est de réduire le package initial autour de la puce et notamment de retirer les pattes (LCC, QFN,...)
- le Multi-Chip Module (MCM), l'assemblage 2,5D et le system in package repose à l'origine sur le principe de MCM

Originellement, une fonction unique est développée sur une puce silicium, le composant électronique, puis est intégrée sur un circuit imprimé qui reliera les fonctions entre-elles, le circuit électronique.

Le System on Chip reprend l'idée de base d'intégration horizontale des fonctions dans un même circuit intégré. Ce circuit intégré regroupera alors plusieurs fonctions électroniques.

Cette technique d'intégration est l'une des causes de l'augmentation du nombre d'entrées/sorties présentes sur un circuit intégré mais elle permet de réduire la consommation d'énergie et de limiter l'encombrement comparé à un système multi-puces rassemblant les mêmes fonctions [Ben-15]. En résumé, le packaging de niveau 2 est renvoyé au packaging de niveau 1 pour développer des circuits intégrés complexes.

Le Chip on Board repose sur l'élimination de niveau 1 de packaging (plus de boîtier) pour intégrer directement la puce sur le circuit imprimé (cf. figure I.15) ce qui simplifie le processus de conception de la carte.



Figure I-15 Exemple de puce nue montée (CoB) [Ees]

Le Multi-Chip Module ajoute un niveau de packaging pour réaliser un composant global à monter sur un circuit électronique à partir de plusieurs circuits intégrés et composants discrets. La conception est similaire à celle d'une puce comportant plusieurs fonctions comme le Chip on Board à la différence que l'assemblage se fait au niveau suivant. L'intérêt est de pouvoir varier la nature des substrats d'accueil des composants indépendamment du circuit électronique, ce qui va définir l'appellation du montage. Le laminé MCM (MCM-L) est un module monté sur un PCB multicouches, le MCM déposé (MCM-D) utilise une technologie couche mince pour déposer les modules sur le substrat de base et le MCM un substrat céramique (MCM-C). La figure I.16 montre la différence entre les assemblages SoC et MCM.

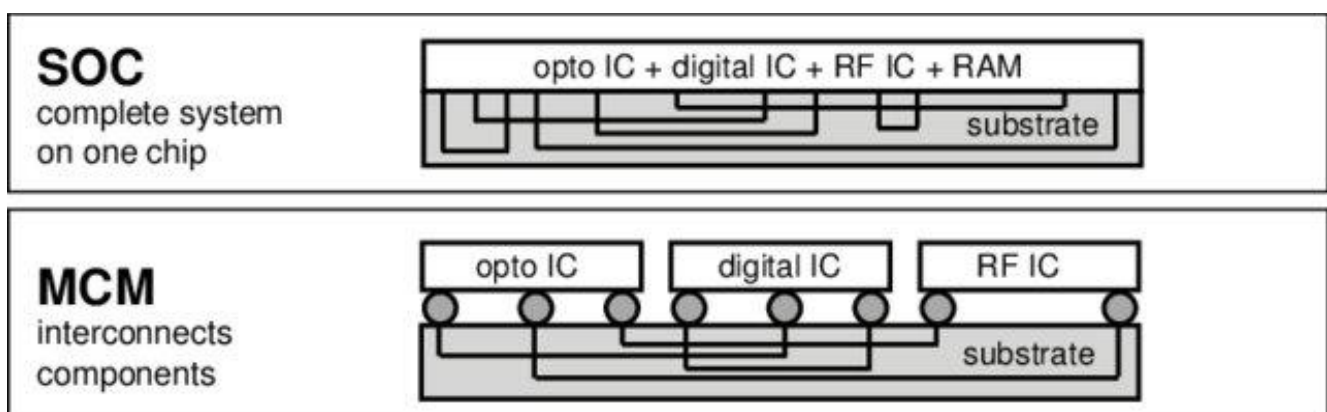


Figure I-16 Comparaison entre un assemblage SoC (System on Chip) et MCM (Multi-Chip Module) [Min-05]

Les limites de la loi de Moore impactent directement les solutions d'intégration horizontale. L'objectif est de réduire les distances de connexion et le nombre d'interconnexions nécessaire entre niveau de packaging.

I.2.2.2 L'intégration 2,5D

Avant de parvenir à des solutions utilisant l'entièreté de l'espace pour les composants, l'intégration 2,5D vient ajouter une solution pour augmenter la densité de pistes et proposer un moyen d'utiliser des composants avec de plus petites entrées/sorties. En effet, l'intégration 2,5D consiste à utiliser un interposeur en silicium dans un assemblage de type MCM pour augmenter la quantité de pistes métalliques dans le circuit conduisant à sa complexification (cf. Figure I.17). Le silicium étant préféré pour pouvoir utiliser les TSVs et le même procédé de fabrication que pour les pistes des puces et pallier au manque de place sur les substrats usuels dû à des pistes plus larges en plus d'une amélioration de la performance et de la consommation relativement à la taille.

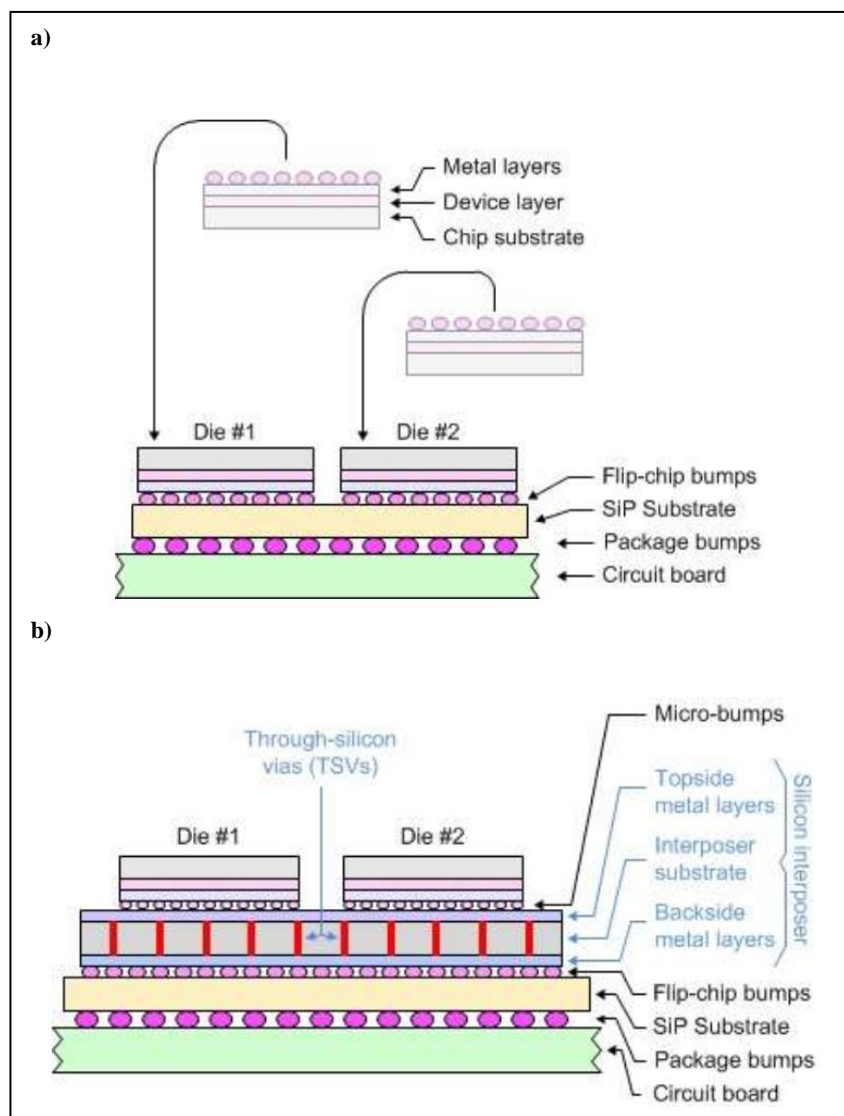


Figure I-17 Comparaison entre (a) un assemblage MCM traditionnel et (b) un assemblage 2,5D utilisant un interposeur en silicium [Max-12]

I.2.2.3 Une nouvelle dimension : l'intégration 3D

L'optimisation de la surface s'étant révélée insuffisante suite aux limitations imposées par la loi de Moore de nouvelles solutions d'intégration utilisant la 3^{ème} dimension de l'espace ont été proposées pour poursuivre l'effort de miniaturisation. Quatre types d'assemblage verticaux sont alors apparus : le System in Package (SiP), originellement assemblage 2D de type MCM qui a développé de nouvelles structures (cf. Figure I.18), le System on Package (SoP), le Package on Package (PoP) et la technologie d'enfouissement dites « embedded technology ».

Bien que la méthode MCM puisse être associée au System in Package, le SiP englobe en plus les assemblages comportant une intégration 3D des fonctions. Dans cet assemblage, l'empilement des fonctions permet d'augmenter encore la densité d'intégration. La figure I.18 présente l'évolution des assemblages du SiP MCM 2D au SiP 3D.

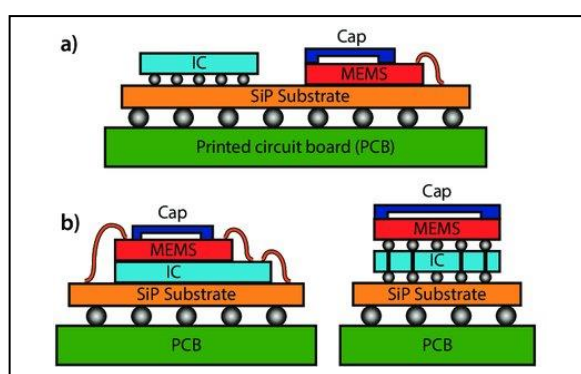


Figure I-18 Schéma de différents assemblage SiP :
(a) 2D SiP de type MCM et (b) 3D SiP utilisant du wire bonding (gauche) et des TSVs (droite) [Ble-17]

Le principe du System on Package reprend l'idée de Chip on Board : utiliser le substrat comme support de fonctions. La nature du substrat change pour certaines fonctions ajoutant un niveau d'assemblage. Sur la figure I.18, le circuit intégré remplace le substrat dans son rôle de support pour la fonction qui est ici dédiée à des MEMS. La technologie des films minces a permis l'intégration certaines fonctions passives, telles que les capacités jusqu'à des densités de capacité de l'ordre de $150\text{nm}/\text{cm}^2$ [Chi-11], les inductances avec des densité d'inductance de l'ordre d'une centaine de nH/mm^3 [Moa-15] ou encore les filtres, sur et dans le substrat. La figure I.19 représente une vue en coup schématique de fonctions intégrées dans le substrat dans le cas d'un assemblage System on Package.

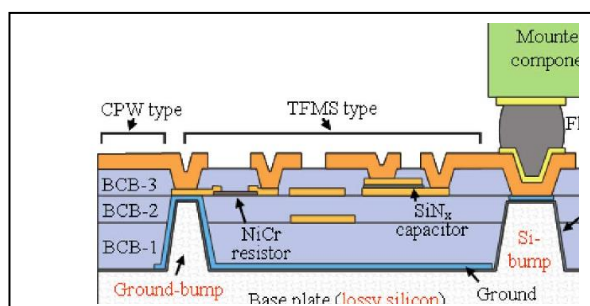


Figure I-19 Vue en coup d'un assemblage SoP utilisant la technologie films minces [San-09]

Le Package on Package va quant à lui chercher à lier deux assemblages entre eux tout en limitant la perte d'espace. L'empilement des circuits électroniques permet un rapprochement des composants et donc une réduction des longueurs de connexions. La figure I.20 présente un assemblage Package on Package.

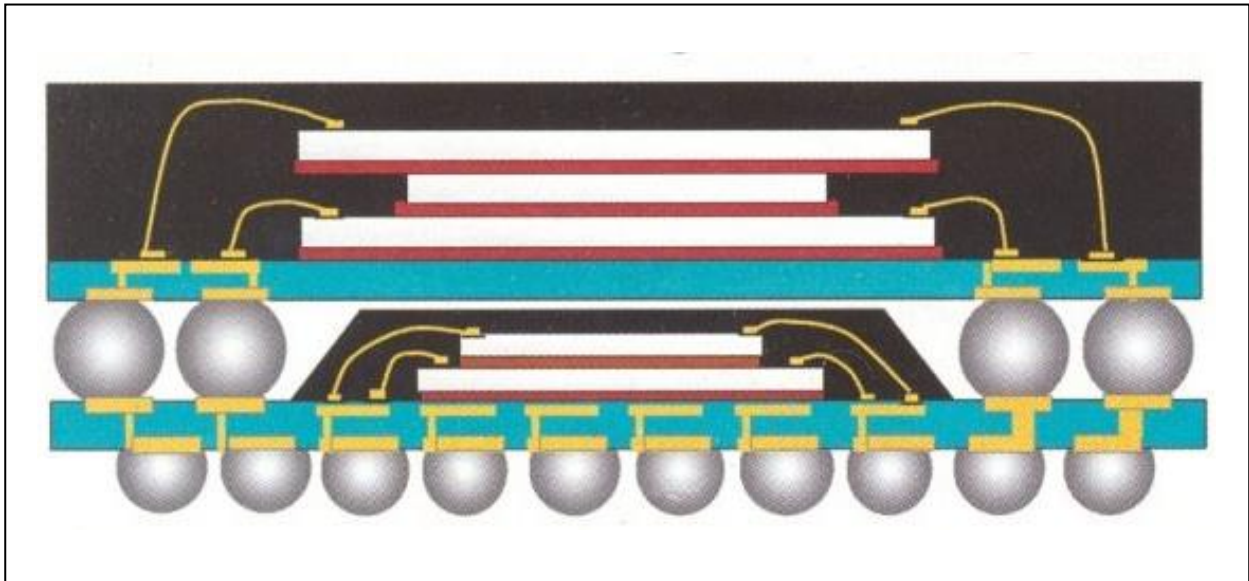


Figure I-20 Schéma d'un assemblage PoP [Val-08]

Dans la continuité des avancées sur les packages, l'intégration de composants passifs dans le PCB sous forme de couches minces s'est intensifié pour le System on Package. L'idée a naturellement germé de reproduire le procédé pour les composants actifs. Les composants enfouis (« embedded ») peuvent alors être vus comme une version plus poussée du SoP et du PoP, le PCB devenant le package porteur de fonctions plus complexes. La figure I.21 reprend les trois étapes principales pour enfouir un composant dans le support de la carte électronique.

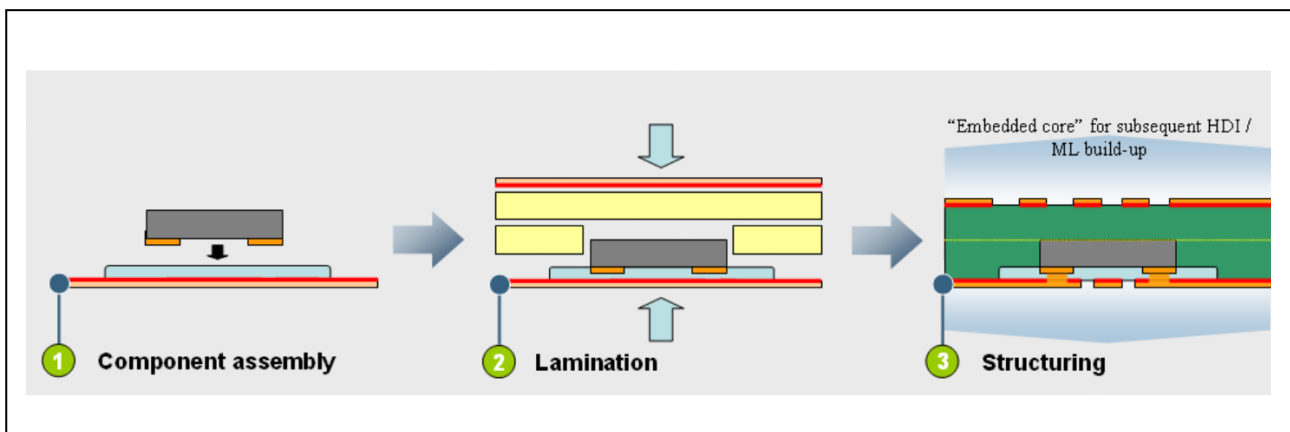


Figure I-21 Procédé basique d'enfouissement d'un composant dans un PCB [Sta-13]

Dans l'ensemble des assemblages et interconnexions, les enjeux sont toujours les mêmes : assurer un maintien mécanique fiable des composants et gérer la dissipation thermique pour respecter les limites de fonctionnement du circuit. La technologie d'enfouissement est au cœur de la démarche de ce projet d'étude et sera donc présentée plus précisément pour expliquer la démarche de travail.

I.3 Technologie d'enfouissement dans le projet EDDEMA

I.3.1 Enjeux technologiques

Enfouir un composant revient à développer un nouvel environnement d'assemblage pour ce dernier. Les considérations de placement, d'interconnexion et de fiabilité sont donc les mêmes que pour tout assemblage. L'enjeu du travail de recherche réalisé est de justifier les choix technologiques faits dans le cadre de ce projet par rapport aux possibilités qu'offre la technologie. L'intégration de composants passifs dans le PCB est la partie la plus mûre de la technologie car initiée en premier en suivant le principe développé dans le SoP. L'étape suivante était naturellement d'enfouir des composants actifs qu'ils soient assemblés avec ou sans boîtier. Ces composants actifs sont généralement plus volumineux que les passifs et donc plus épais. Or l'objectif est d'utiliser les couches du circuit imprimé pour intégrer les composants : il est donc important que les composants enfouis ne viennent pas ou peu déformer le PCB et augmenter le volume initial de l'assemblage.

I.3.1.1 Les différentes méthodes de fabrication

Comme présenté dans la figure I.21, l'assemblage d'un circuit électronique avec des composants enfouis repose sur trois étapes principales : le positionnement des composants et de ses connexions, le laminage et la construction du circuit.

L'assemblage par laminage impose des conditions de température et de pression qui exclue l'utilisation du « wire bonding » (manque de fiabilité). Deux principales méthodes d'interconnexion (cf. Figure I.22) sont utilisées dans trois types de procédés d'assemblage, illustrés Figure I.23.

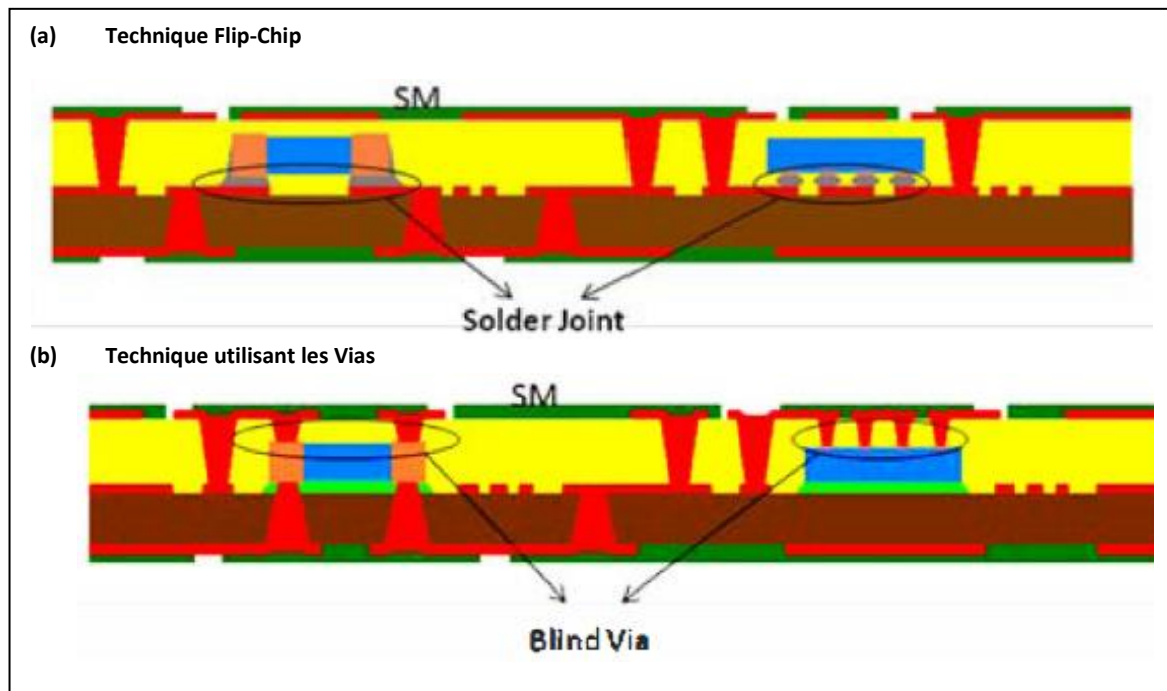


Figure I-22 Deux principales méthodes d'interconnexion (a) Flip-Chip et (b) Via [Yan-15]

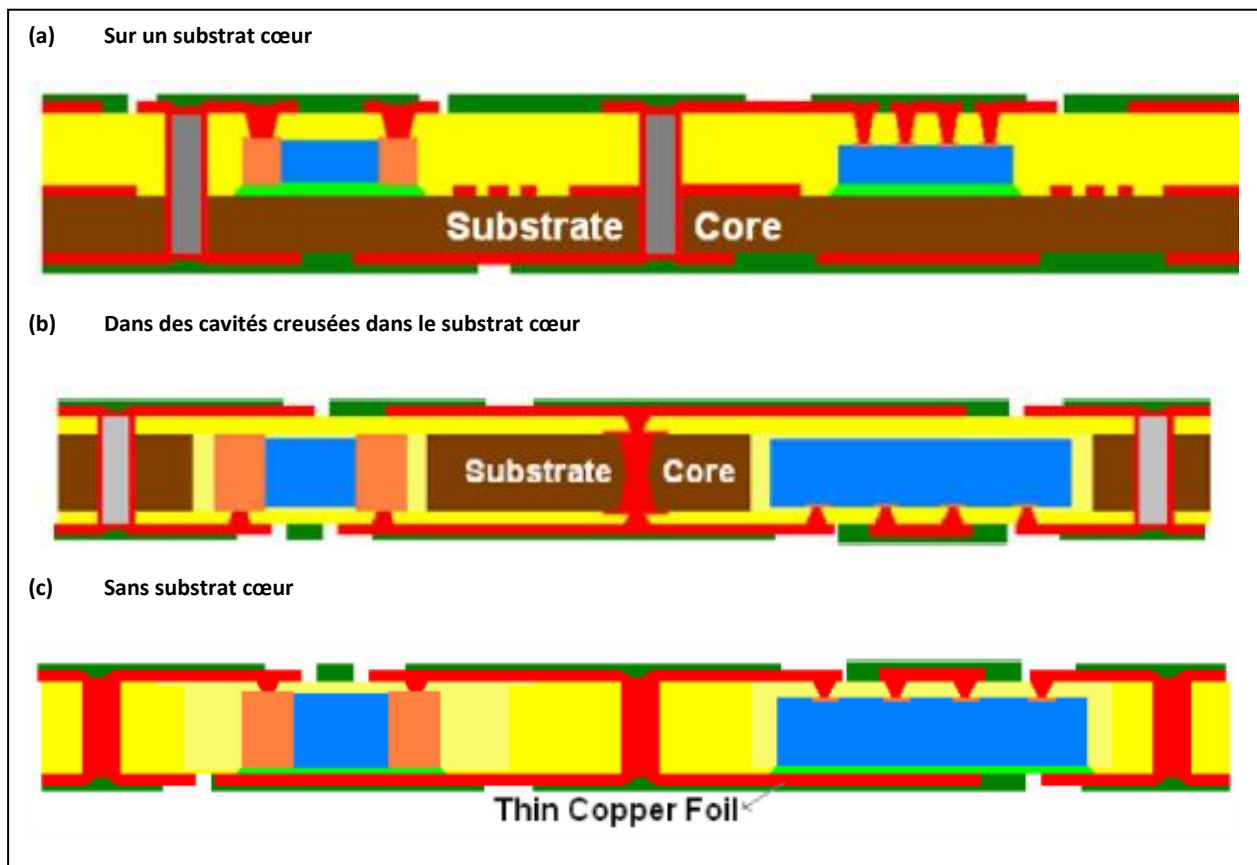


Figure I-23 Trois procédés basiques d'assemblage avec composants enfouis (a) sur un substrat d'accueil, (b) dans des cavités creusées dans le substrat d'accueil, et (c) Sans substrat cœur [Yan-15]

Les deux méthodes d'interconnexion vont apporter des problématiques différentes. L'assemblage Flip-Chip sera plus aisé à mettre en place à la surface d'un substrat d'accueil et impose aux interconnexions typiques (brasures, thermo-compression et collage) de supporter l'étape de laminage. A l'inverse, l'usage de vias est indépendant de la méthode d'assemblage puisqu'ils sont percés par laser après l'étape de laminage mais au travers de la résine qui enrobe le composant. La difficulté est de bien positionner le via par rapport au composant.

Pour ce qui est des trois procédés d'assemblage, le point important est d'assurer le maintien des composants lors du laminage. Sur le substrat ce sont soit les interconnexions soit le collage qui assurera ce maintien. L'assemblage sans substrat repose sur l'utilisation d'un substrat temporaire qui est retiré à la fin du procédé. Le maintien est donc également assuré par le collage. Cette méthode peut également être utilisée avec les cavités creusées dans le substrat d'accueil mais c'est généralement une bande adhésive qui assure ce rôle. Un premier laminage est effectué pour enfermer le composant dans la résine et un second laminage vient bloquer définitivement la résine sur la seconde face après avoir retiré la couche adhésive. L'intérêt de cette méthode est de protéger le composant lors du laminage et de le prévenir du stress thermique.

Bien évidemment il devient envisageable de combiner les techniques pour développer des circuits multicouches comprenant plusieurs couches avec des composants enfouis comme sur la Figure I.24.

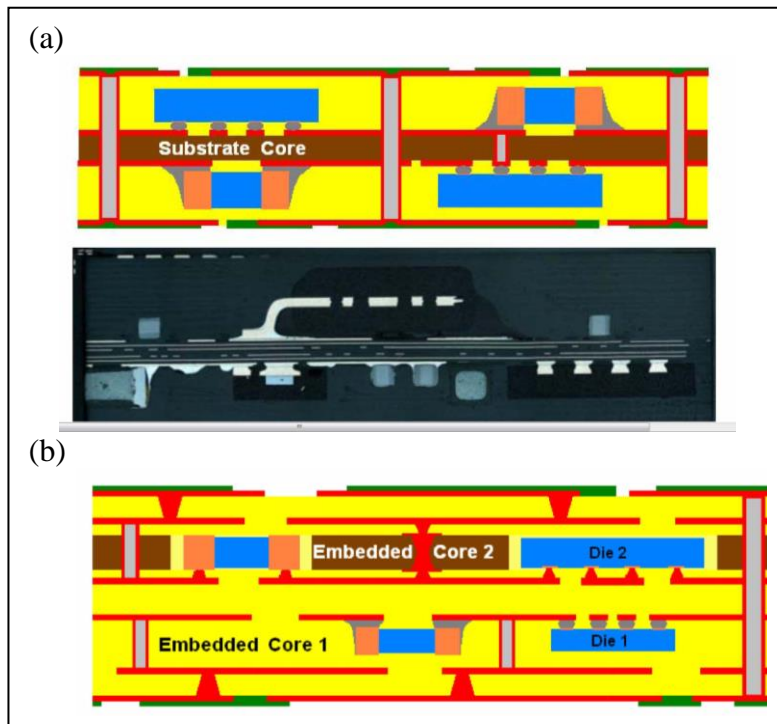


Figure I-24 Exemple (a) d'un circuit avec composants enfouis montés sur les deux faces d'un substrat d'accueil et (b) d'un circuit multicouche avec plusieurs méthodes pour enfouer les composants [Yan-15]

Le laminage est la seconde étape, après le positionnement des composants, importante de l'assemblage puisqu'il impose des conditions de température et de pression dans le PCB et donc le composant. La pression sert à assurer le maintien des couches les unes contre les autres le temps de la montée et de la redescente en température. Le besoin d'une haute température vient de la nécessité de passer au-delà de la température de transition vitreuse (T_g) de la résine des pré-imprégné, matériau tissé de fibres imprégnées avec une résine utilisé comme couche support du circuit imprimé. La résine devenue visqueuse peut ainsi enrober le composant avant de se solidifier en refroidissant. La figure I.25 est un exemple de profil typique de pression et de température utilisé lors du laminage. De nombreux procédés sont proposés avec des profils de température allant de 180°C à 250°C au maximum et des pressions de 5 à 30 bars [Sch-14] [Kpo-16] [Man-07]. Un procédé similaire est reproduit pour chaque couche supplémentaire du PCB.

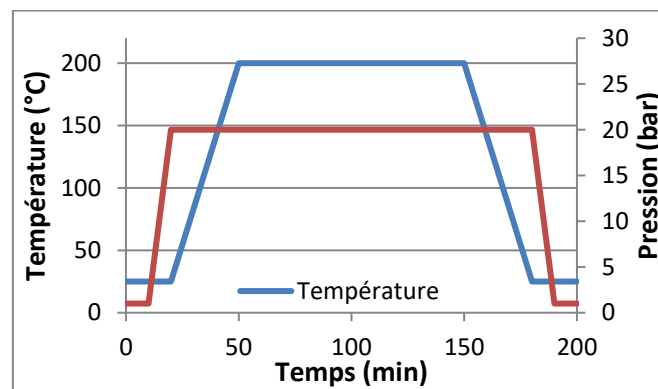


Figure I-25 Exemple de profil de laminage typique de température et de pression pour enfouer un composant

Lors du refroidissement, les caractéristiques thermiques des composants et des matériaux constitutifs du circuit imprimé vont entrer en conflit générant des contraintes mécaniques (ou stress) au niveau des composants. La caractéristique en cause est le coefficient de dilatation thermique (CTE). Le stress thermique peut se manifester de trois façons différentes comme l'illustre la Figure I.26. Dans le cas de deux couches superposées, un fléchissement des matériaux est observé dans le sens des matériaux de plus fort CTE vers le plus faible (cas n°1 Figure I.26). Il est possible de compenser cet effet en réalisant une symétrie dans l'empilement des matériaux mais le matériau central se retrouvera alors compressé (cas n°3 Figure I.26). Dans le cas de matériaux accolés, c'est un effet de serrage sur les bords du matériau de plus faible CTE qui est observé. Dans un PCB comprenant un substrat cœur un fléchissement global du substrat d'accueil et de la couche où les composants sont enfouis est observé. L'ajout des couches au-dessus et au-dessous du circuit réduiront cet effet de courbure. Un fléchissement local est également observé au niveau du composant lui-même, notamment lorsqu'une colle ou une résine underfill, résine qui vient remplir l'espace entre le composant et le circuit, est utilisée. Cet effet sera d'autant plus important que le composant sera grand. L'utilisation de cavité apportera une meilleure symétrie même si l'assemblage est souvent réalisé en deux étapes induisant un fléchissement dans une direction. Dans l'ensemble des méthodes d'assemblage, le serrage est inévitable sur les bords des composants. Bien évidemment les considérations sur les contraintes subies par les interconnexions lors des étapes de laminage sont similaires. Dans le cas d'un circuit multicouche, les interconnexions d'un assemblage Flip-Chip subiront donc un laminage de plus que les assemblages avec vias.

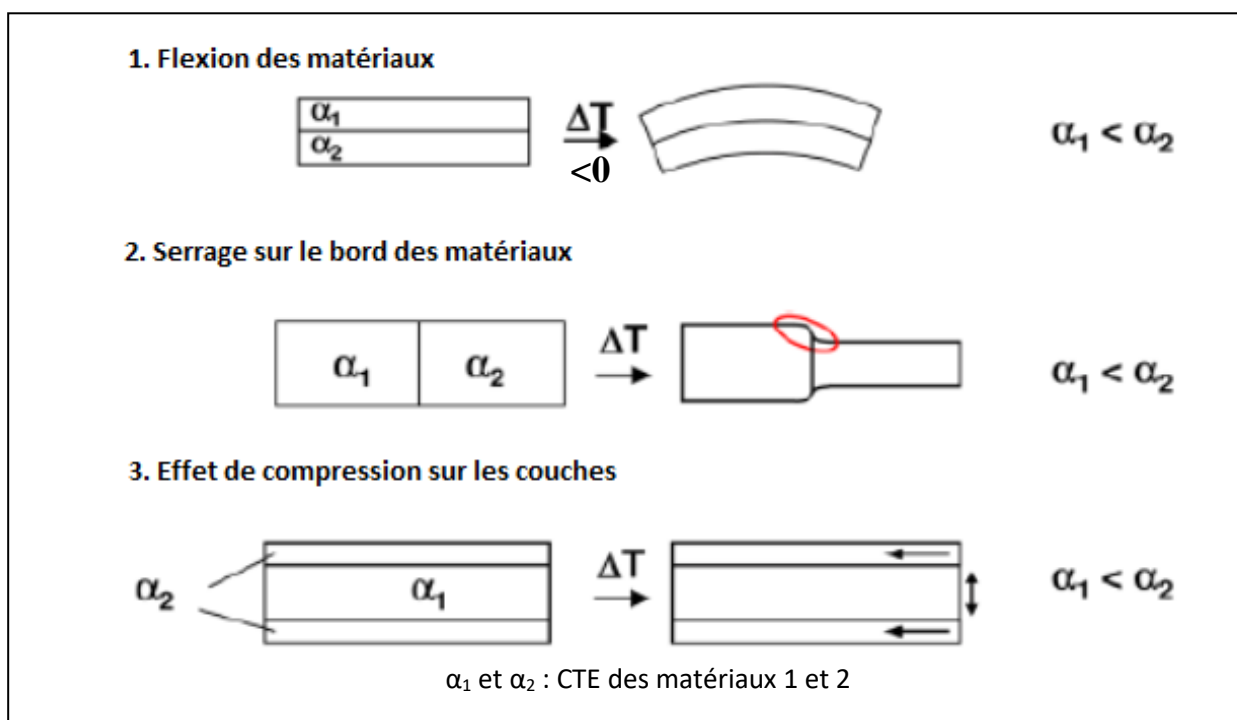


Figure I-26 Cas de stress thermique dans les couches laminées [Sta-18]

En dehors des variations des conditions de fabrication (choix des conditions de températures, de pression, des matériaux, etc...), des points d'amélioration de la technologie

d'enfouissement sont brevetés. Des centaines de brevets existent sans pour autant être exploités. On peut par exemple trouver des méthodes particulières de remplissage de l'espace autour du composant avec de la résine ou des techniques de renfort de la structure par l'ajout d'éléments supplémentaires

L'optimisation de l'enrobage du composant par la résine (ou comment éviter les bulles dans la structure) est l'un des premiers problèmes de la technologie d'enfouissement. La figure I.27 est un exemple où il est proposé d'intercaler une couche intermédiaire de résine entre deux cœurs de substrat pour assurer un meilleur enrobage de la résine autour de composants enfouis verticaux [Zol-05].

Certains brevets cherchent à améliorer la structure initiale et notamment à la renforcer mécaniquement pour protéger le composant et ses interconnexions lors de l'assemblage (notamment des conditions de pression). Dans le cadre de composants montés sur un substrat cœur puis enfouis, le pressage peut davantage impacter le composant. En effet, le composant et les interconnexions peuvent être fragilisés voir détériorés par une pression trop importante, notamment lorsque la résine se ramollit avec la température. Des solutions (cf. Figure I.28 et I.29) sont donc pensées pour absorber une partie de la contrainte de compression. Celles-ci consistent principalement à ajouter des éléments rigides dans la résine : des plots de contact dans le cas de la figure I.28 et des vias traversant pour la figure I.29. Dans les exemples des figures I.28 et I.29, un autre objectif est de créer les connexions lors de l'assemblage pour réduire les étapes de fabrication après l'assemblage (perçage et électrodéposition) [Mok-08] [Sug-04].

Parfois ce sont des techniques innovantes qui sont brevetées comme dans le cas de la figure I.30 où le composant présente une face active, un élément à sa surface qui permet d'interagir avec le milieu tel qu'un capteur de pression ou un capteur optique, qui a besoin de rester accessible, possiblement à l'extérieur de la structure [Tse-15]. Il est possible d'imaginer un capteur optique tel que la lentille d'une caméra. Il reste néanmoins à vérifier que la face active du composant supporte les étapes d'assemblage.

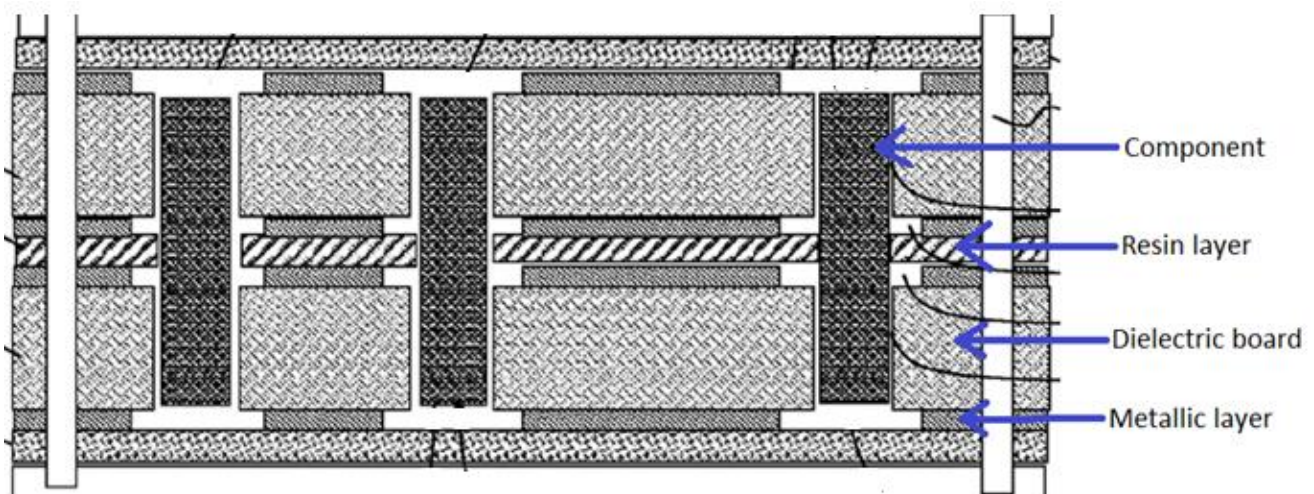


Figure I-27 Brevet de Motorola sur l'enfouissement de composants verticaux utilisant une couche intermédiaire de résine [Zol-05]

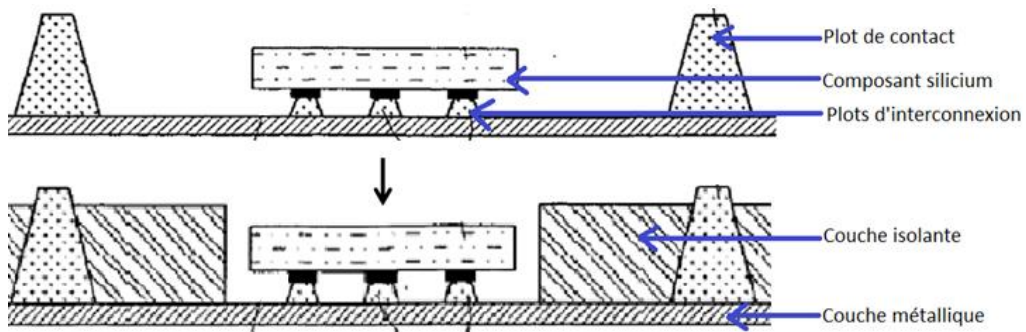


Figure I-28 Brevet de Samsung sur l'utilisation de plots prédisposés avant le pressage d'une couche isolante avec cavité avant le remplissage par une résine de cette cavité [Mok-08]

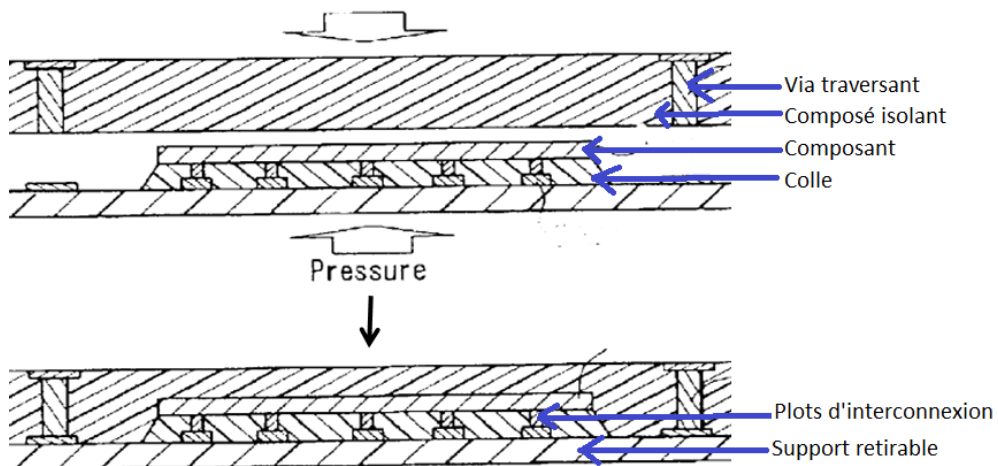


Figure I-29 Brevet de Matsushita sur l'utilisation de vias pré-intégrés à la couche isolante avant le pressage [Sug-04]

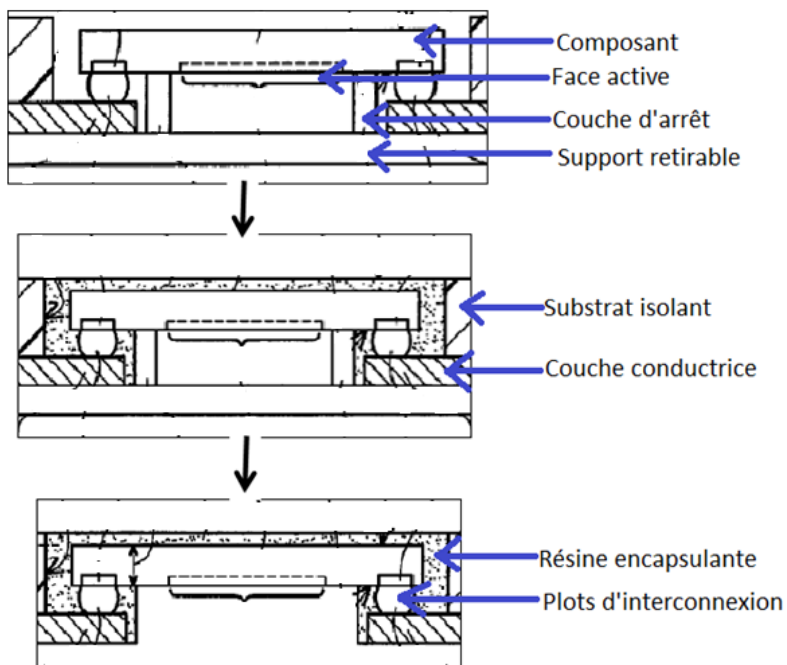


Figure I-30 Brevet d'Unimicron Technology Corp. sur l'enfouissement d'un composant disposant d'une surface active, des limiteurs (couche d'arrêt) empêchent la surface active d'être recouverte par la résine lors du pressage [Tse-15]

I.3.1.2 Les défaillances possibles

La fiabilité des assemblages dans les conditions de fonctionnement sera le point central de l'étude menée dans le cadre de cette thèse. Il est donc important de spécifier les défaillances attendues dans le cas de la technologie d'enfouissement. L'une des considérations dans un circuit électronique est d'assurer la compatibilité électromagnétique (CEM). La protection du circuit aux ondes extérieures se fait par l'utilisation d'un boîtier de blindage adapté. A l'intérieur, l'enfouissement des composants modifie l'environnement électromagnétique : la distribution et l'amplitude des ondes seront différentes. La figure I.31 illustre le problème de compatibilité électromagnétique. En effet, enfouir des composants crée une nouvelle distribution du rayonnement comparé à un circuit classique.

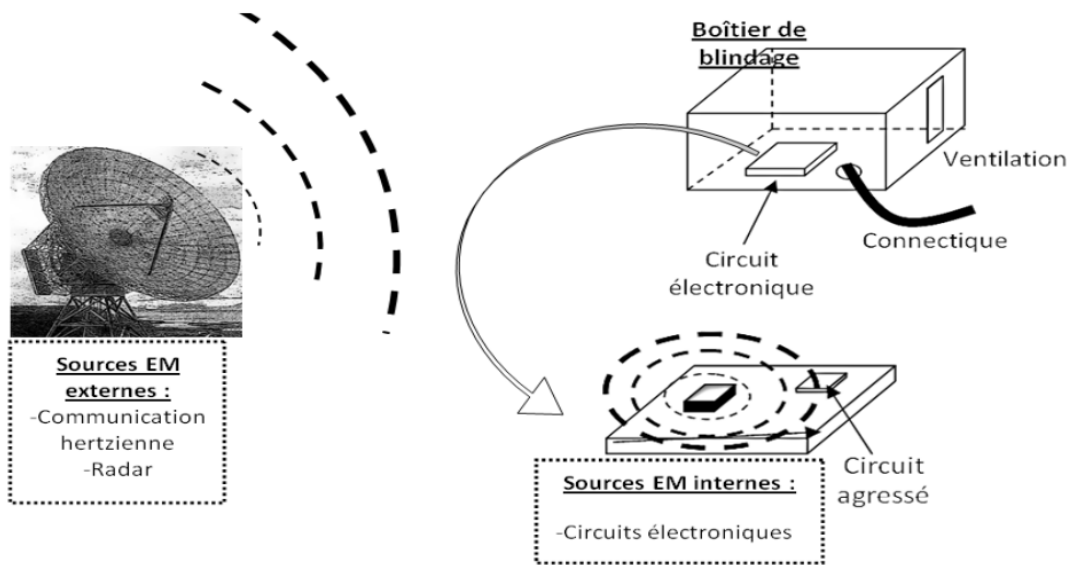


Figure I-31 Illustration des problèmes de compatibilité électromagnétique [Dub-09]

La seconde considération est la dissipation thermique. En fonctionnant les composants électroniques chauffent naturellement. Il est important d'étudier la capacité de l'assemblage à dissiper la chaleur pour prévenir d'un échauffement local trop important pouvant impacter les performances du circuit ou le dégrader. Cet aspect est d'autant plus important que les composants enfouis ne puissent compter que sur la conduction thermique pour dissiper la chaleur dans le circuit multicouche.

Enfin les causes de défaillance qui seront au centre de cette étude sont les phénomènes de fissuration et dans le pire des cas de délamination. Les premières causes d'apparition de ces défaillances sont les contraintes thermomécaniques générées lorsque deux matériaux de CTE différents sont en contact ou que la dissipation thermique est insuffisante causant un échauffement local. Dans le cadre de la technologie d'enfouissement, la zone principale mise en cause est la zone de contact interconnexion/composant (cf. Figure I.32). En effet, les assemblages sont soumis lors de leur fonctionnement à des cycles thermiques variés durant lesquels ils se déforment (déformation plastique), la fatigue thermique induite affectera ainsi la fiabilité de l'assemblage. Cette étude de fiabilité sera au centre des travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse.

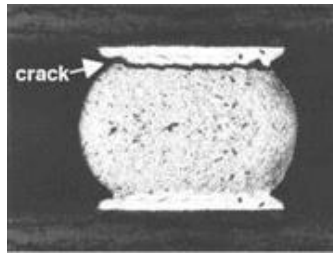


Figure I-32 Vue en coupe d'une soudure présentant une fissure s'étant propagée sur l'ensemble de la zone de contact [Lar-03]

La seconde cause de fissuration et de délamination peut venir de l'effet dit « popcorn ». Celui-ci se produit par l'effet combiné de l'humidité et de la température. En effet la résine est susceptible d'absorber l'humidité ambiante. Une élévation rapide de la température entrainera des modifications des propriétés de la résine qui verra le plus souvent sa résistance à la rupture diminuer. Si pendant l'élévation de température l'humidité n'est pas parvenue à s'extraire de la résine, notamment par le phénomène de diffusion, elle passera sous phase vapeur entrainant une forte pression locale supérieure à la limite de résistance du matériau causant la fissure dans la structure (cf. Figure I.33).

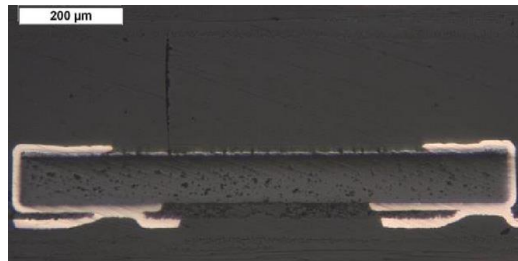


Figure I-33 Observation d'une fissure dans la résine après un test de cycles thermiques (de 125°C à -55°C) [Lar-03]

L'évaluation de la fiabilité selon une approche thermomécanique sera au cœur de ces travaux de recherche. L'objectif sera de mettre en avant l'intérêt des aspects technologiques choisis dans le cadre du projet EDDEMA. Tout d'abord le travail d'analyse est effectué autour des composants pris isolément (études contraintes), puis le système global simplifié est analysé. Les résultats du système global et ceux du composant isolé permettent d'analyser plus finement le composant enfoui et de trouver des règles d'implantations entre les composants enfouis.

I.3.1.3 La fiabilité des composants enfouis

Le premier point pour évaluer la fiabilité des composants enfouis est de déterminer via des simulations les zones à risque et l'impact qu'ont les conditions de fabrication ou les tests physiques sur le circuit et le composant. Ainsi, Atli-Veltin et al [Atl-12] évalue le stress induit sur des composants passifs enfouis par la fabrication de la structure et par un essai de flexion (cf. Figure I.34) et conclue que le risque d'une fissuration des composants passifs enfouis est faible. Une autre approche proposée notamment par Kpobie et al [Kpo-16] est d'évaluer l'influence de certains paramètres tels que la largeur ou la hauteur de la cavité ou de l'épaisseur des composants sur le composant et la résine qui l'entoure (cf. Figure I.35).

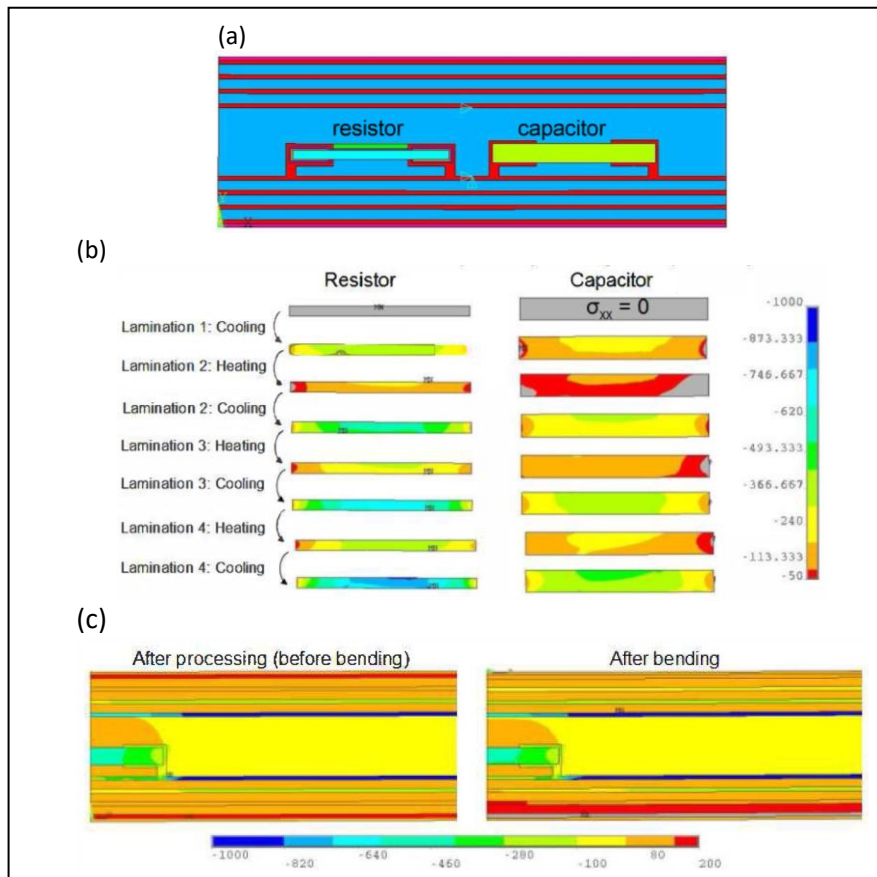


Figure I-34 Résultats de simulation mis en avant par [Alt-12]
 (a) vue en coupe schématique d'une capacité et d'une résistance enfouie, (b) Stress thermique induit par les étapes de laminage, (c) Distribution du stress normal avant et après l'essai de flexion

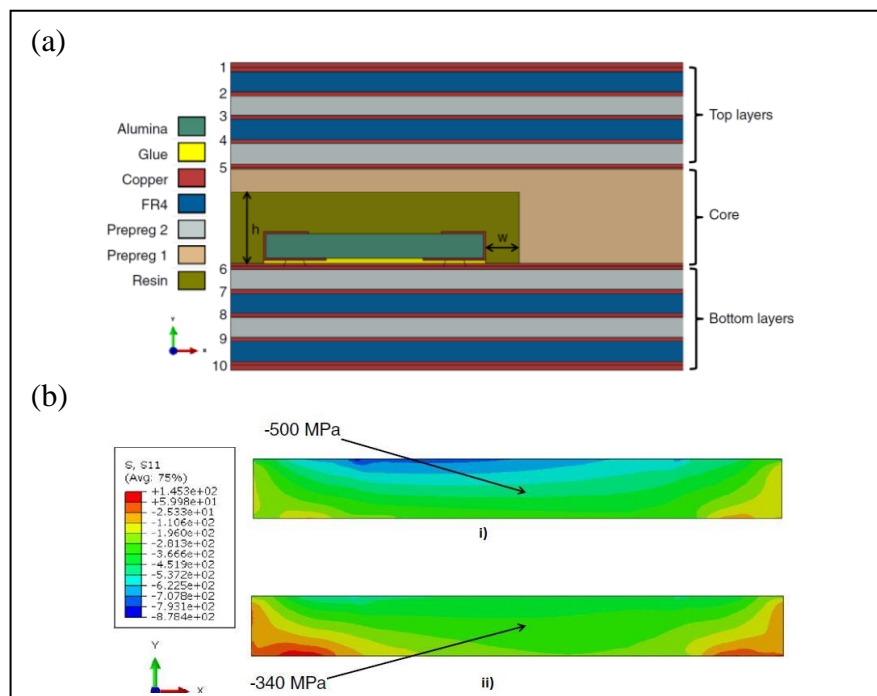


Figure I-35 Résultats de simulation mis en avant par [Kpo-16]
 (a) Vue en coupe du modèle avec h la hauteur et w la distance entre le composant et le bord de la cavité
 (b) Stress (MPa) dans le composant à la fin de la fabrication pour deux hauteur de cavité i) $h = 325\mu\text{m}$ et ii) $h = 145\mu\text{m}$

En complément des résultats théoriques des observations et tests ont été effectués directement sur des composants enfouis. Ainsi, Osmolovski et al [Osm-13] observe l'influence de l'épaisseur des couches sur des composants enfouis avec soudure lors de la fabrication (cf. Figure I.36), statuant qu'une épaisseur faible induit d'importante force de compression sur le composant dénaturant la soudure, et Stahr et al [Sta-13] regarde la durée de vie selon l'épaisseur mais également selon différents types de matériaux (cf. Figure I.37).

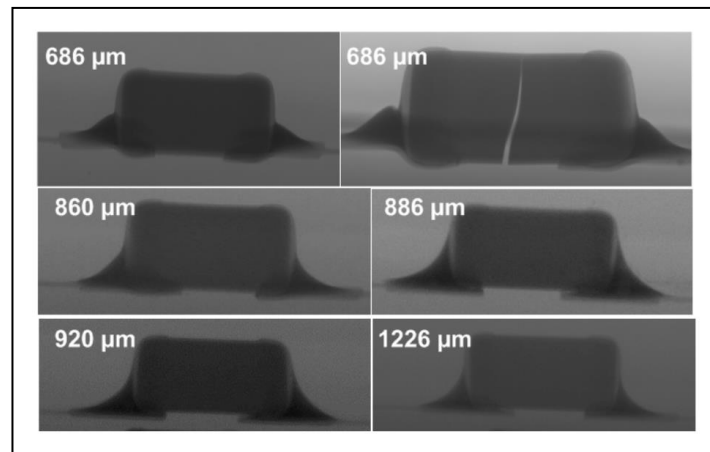


Figure I-36 Impact de l'épaisseur de la couche sur la fabrication [Osm-13]

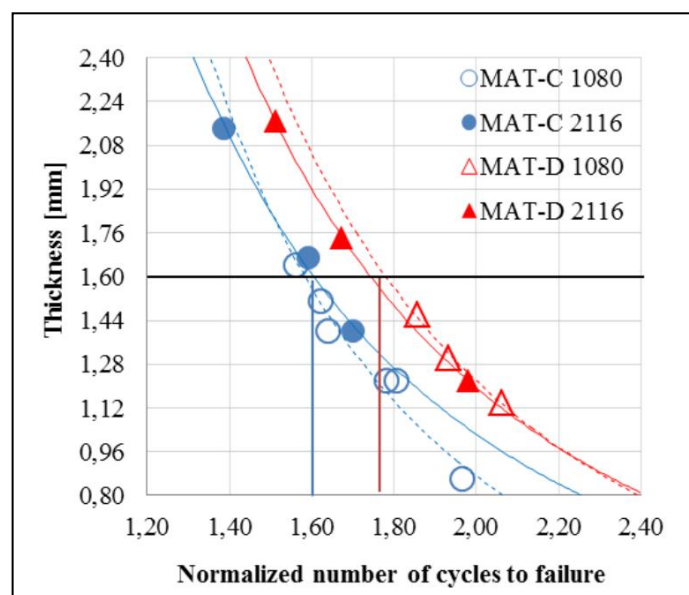


Figure I-37 Nombre normalisé de cycles avant défaillance pour un package BGA en fonction de l'épaisseur du PCB [Sta-13]

Bien évidemment des études comparatives entre les composants enfouis et des composants montés en surface ont été effectuées, notamment par AT&S qui a effectué des tests de chutes et du vieillissement thermique accéléré sur des composants passifs [Ryd-11] et actifs [May-11]. Les expériences démontrent que les composants enfouis sont plus robustes dans le cadre des deux expérimentations. Le test de chutes s'est conclu avec une défaillance de composants enfouis qu'une seule fois sur 28 cartes (0/10 pour les composants actifs, 1/18 pour les composants passifs) contre 20 défaillances pour les composants montés en surfaces (3/10 pour les actifs et 17/18 pour les passifs). Le test de vieillissement thermique de -40°C à

+125°C, mené jusqu'à 1000 cycles, ne s'est conclu par des défaillances que sur les composants actifs montés en surface, les actifs enfouis et l'ensemble des passifs n'amenant à aucune défaillance sur les cartes testées.

L'avantage de la technologie d'enfouissement est donc déjà très reconnu mais il est nécessaire d'assurer sa fiabilité dans des domaines d'applications plus strictes telles que le domaine automobile.

I.3.2 Projet EDDEMA

La nécessité d'intégrer de plus en plus de composants avec de meilleures performances devient obligatoire pour répondre aux besoins du marché, notamment dans le cadre des développements des systèmes d'aide à la conduite pour rendre les véhicules autonomes ou électriques (véhicules hybrides et électriques). Dans le domaine automobile, l'utilisation de la technologie des composants enterrés augmente considérablement les possibilités d'intégration de composants électroniques normalement admissibles sur un même circuit imprimé. C'est dans ce contexte que le projet EDDEMA (Embedded Die Design Environment & Methodology for Automotive Applications, EURIPIDES, 2015-2019) a vu le jour. Porté par l'équipementier automobile VALEO (Equipements Electriques Moteur - France), l'objectif est de réduire de 50% le volume des caméras de recul actuelles (cf. Figure I.38).

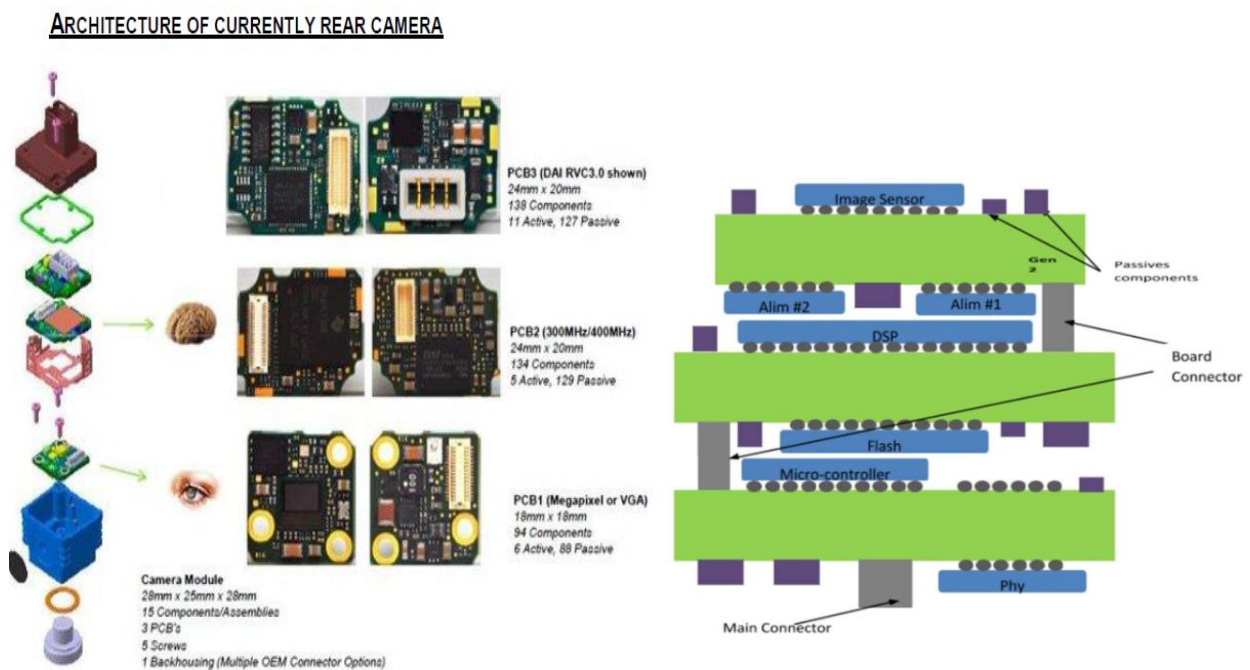


Figure I-38 Composition du dispositif de caméra actuellement utilisé

L'objectif du projet EDDEMA est de développer une carte d'interconnexion à haute densité (HDI) utilisant la technologie des composants enfouis couplée à des microvias.

Les principaux obstacles sont dus au nombre élevé de composants intégrés passifs et actifs ayant un comportement thermomécanique différent des matériaux constitutifs du PCB multicouche. D'autre part, une grande robustesse des assemblages est nécessaire pour résister à une température de fonctionnement élevée (températures supérieures à 80°C attendues) et à

une température de stockage basse ainsi qu'à de fortes vibrations. C'est pourquoi, dans le cadre de ce projet, l'expérience de partenaires tels que AT&S (fournisseur de circuits imprimés), déjà fabricant d'ensembles de « Embedded Components », met en œuvre les résultats de la recherche afin de répondre aux contraintes de fiabilité et aux exigences de robustesse des composants intégrés dans le secteur automobile exigé par Valeo, leader du projet.

Le projet EDDEMA, initié en septembre 2014, regroupe 8 partenaires, 5 partenaires industriels et 3 partenaires universitaires, apportant une expertise dans de nombreux domaines. Le rôle de chacun est bien défini :

- Valeo est l'instigateur du projet
- AT&S apporte l'expérience sur la technologie d'enfouissement
- ST Microelectronics et AVX sont les principaux fournisseurs des composants utilisés
- Serma Technologies effectue les tests de robustesse et de fiabilité sur les prototypes
- TUW étudie les défaillances thermiques du système
- IRSEEM étudie la compatibilité électromagnétique (CEM) du système
- IMS étudie les défaillances thermomécaniques des composants enfouis

Les travaux de thèse ont débuté au premier trimestre 2016. L'IMS se proposait d'utiliser une expérience sur le logiciel ANSYS pour développer des modèles de simulation pour une évaluation de la fiabilité thermomécanique des prototypes développés. Le but de l'étude est de déterminer les bonnes pratiques d'intégration de ce genre de composants et d'en déduire des règles de conception menant à des dispositifs fiables.

Le point important est de confirmer la validité du projet dans le respect des normes automobiles plus stricte que d'autres secteurs comme la téléphonie où la technologie est déjà très utilisée. Ceci se traduit par trois axes de recherche majeurs :

- les choix architecturaux du circuit : nombre de couches avec composants enfouis et positionnement de ces composants sur la couche
- la fiabilité du procédé d'assemblage : dans quelle mesure les composants et les interconnexions sont affectés par les étapes de fabrication
- la fiabilité des composants et du circuit dans le temps pour assurer des durées élevées de fonctionnement

L'objectif est aussi de s'adapter aux lignes de productions automatiques et donc de prévenir d'éventuelles modifications dans la fabrication. Effectivement, VALEO a défini les limites à ne pas dépasser à cause des possibilités restreintes des diverses machines entrant dans le procédé de fabrication de la caméra.

I.4 Conclusion

Au cours des dernières décennies, l'électronique s'est développée dans une optique de miniaturisation et de performances suivant la tendance inspirée par Moore à travers le « More Moore » et le « More than Moore ». Ces efforts sont visibles à travers les choix

d'interconnexions (soudures, vias, flip-chip, ...) et d'assemblages (SiP, SoP, PoP, embedded, ...).

Dans le cadre du projet EDDEMA, l'objectif est d'utiliser la technologie d'enfouissement qui a déjà su faire ses preuves dans d'autres domaines tels que les télécommunications. La technologie a démontré de nombreux avantages évidents face aux assemblages plus classiques et d'autres inconvénients. C'est la maturité de la technologie qui sera étudiée pour valider son usage dans des domaines plus exigeants d'un point de vue fiabilité. En effet, le secteur automobile ne saurait se contenter des critères de défaillances d'autres industries de grandes productions puisque le remplacement après défaillance pourrait être la cause d'une mise en danger d'un usager.

De nombreux partenaires ont été rassemblés pour répondre à cette demande dans plusieurs domaines d'application (CEM, thermiques, thermomécanique, ...). Les travaux de thèse se concentrent sur l'étude thermomécanique du circuit afin de chercher à évaluer les points les plus sensibles : fortes contraintes dans les angles, interconnexions, la déformation du circuit imprimé final et de déterminer les limites de ces points ainsi que de corréliser les résultats obtenus aux mesures de robustesse et de fiabilité réalisées.

I.5 Références bibliographiques

- [Atl-12] Bilim Atli-Venin et al, “Thermo-mechanical investigation of the reliability embedded components in PCBs during processing and under bending loading”, 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE, 2012
- [Ban] V. BANDE, Passive Electronic components and Circuits, Lecture 11, Applied Electronics Department, Technical University of Cluj-Napoca. Available : http://www.ael.utcluj.ro/beta/?page_id=357&lang=en [last access : 06/12/2018]
- [Ben-15] Pete Bennett, EE Times. "The why, where and what of low-power SoC design." December 2, 2004. Retrieved July 28, 2015.
- [Ble-17] Simon Johannes Bleiker, “Heterogeneous 3D Integration and Packaging Technologies for Nano-Electromechanical Systems”, PhD Thesis, KTH - Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Department of Micro and Nanosystems, Sweden, 2017
- [Cha-14] Chauhan P.S., Choubey A., Zhong Z., Pecht M.G. (2014) “Copper Wire Bonding”. In: Copper Wire Bonding. Springer, New York, NY, DOI : https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5761-9_1
- [Chi-11] Chihoko Mizue et al, « Capacitance–Voltage Characteristics of Al₂O₃/AlGa_N/Ga_N Structures and State Density Distribution at Al₂O₃/AlGa_N Interface”, 2011 Jpn. J. Appl. Phys.50 021001
- [Deh-94] K. DeHaven, J. Dietz, “Controlled Collapse Chip Connection (C4) - An Enabling Technology”, 1994 Proceedings. 44th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEE, DOI: [10.1109/ECTC.1994.367660](https://doi.org/10.1109/ECTC.1994.367660)
- [Dio-17] J-L DIOT, “Packaging des circuits intégrés,” *Tech. l’Ingénieur Cart. Electron. Technol. Concept.*, vol. base docum, no. ref. article : e3400V2, 2017.
- [Dub-09] Tristan Dubois. Étude de l’effet d’ondes électromagnétiques sur le fonctionnement de circuits électroniques – Mise en place d’une méthode de test des systèmes. Matière Condensée [cond-mat]. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. Français
- [Ees] “Chip-on-board”, EESEMI, Online, Available : <http://eesemi.com/cob.htm> [12/12/2018]
- [Ele-00] P. Elenius and L. Levine, “Comparing Flip-Chip and Wire-Bond interconnection technologies”, 2000, Chip Scale Reviex. Available : http://processsolutionsconsulting.com/pdf/Flip_Bump/csr-7-00.pdf [Accessed : 10/12/2018]
- [Fir] Photo de présentation de travaux de l’entreprise First level inc, <https://firstlevelinc.com/services/wire-bonding/>

- [Gil-99] “The history of the printed circuit”, Ken Gilleo, Printed Circuit Fabrication, janvier 1999, vol. 22, no 1.
- [Gle] Guideline rationale, “The Nordic Electronics Packaging Guideline” Chapter B : Flip-Chip, Torstein Gleditch, SINTEF, Henrik Hvims, DELTA, Roger Rörgren, IVF and Jouko Vähäkangas, VTT Electronics, <http://extra.ivf.se/ngl/b-flip-chip/ChapterB1.htm>
- [Hal-95] L Halbo, P Ohlckers, “Electronics Components, Packaging and Production, Chapter 2 1995, ISBN 82-992193-2-9. Available : <http://tid.uio.no/kurs/fys4260/chap2.html> [Accessed : 10/12/2018]
- [Har-10] “Wire bonding in microelectronics”, George Harman, 3rd Edition, 2010
- [Itr-07] “EXECUTIVE SUMMARY,” International Technology Roadmap for Semiconductors, 2007. Available: <https://www.semiconductors.org/resources/2007-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/> [last access: 06/12/2018]
- [Kpo-16] Kpobie, Wiyao & Martiny, Marion & Mercier, Sebastien & Lechleiter, F & Bodin, L & Lecavelier des Etangs-Levallois, Aurélien & Brizoux, M. (2016). Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components. *Microelectronics Reliability*. 65. DOI : 10.1016/j.microrel.2016.08.016.
- [Kri-98] H. Kristiansen, J. Liu, « Overview of conductive adhesive interconnection technologies for LCDs”, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A* (Volume: 21 , Issue: 2 , Jun 1998), DOI: [10.1109/95.705466](https://doi.org/10.1109/95.705466)
- [Lar-03] Larson MC, Verges MA. Extending the Fatigue Life of Solder Grid Array (SGA) Electronic Packages. *ASME. J. Electron. Packag.* 2003;125(1):18-23. doi:10.1115/1.1520430.
- [Mah-17] Ravi Mahajan and Bob Sankman, “3D Packaging Architectures and Assembly Process Design” Springer International Publishing Switzerland 2017, Y. Li, D. Goyal (eds.), 3D Microelectronic Packaging, Springer Series in Advanced Microelectronics 57, DOI 10.1007/978-3-319-44586-1_2
- [Man-07] D. Manassis, S. Yen, A. Ostmann, R. Aschenbrenner and H. Reichl, "Technical Understanding of Resin-Coated-Copper (RCC) Lamination Processes for Realization of Reliable Chip Embedding Technologies," 2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference, Reno, NV, 2007, pp. 278-285. doi: 10.1109/ECTC.2007.373810
- [Max-12] Max Maxfield, “2D vs 2,5D vs 3D ICs 101”, *Electronic Engineering Times*, Programmable Logic Designlines, 2012
- [May-11] G. Mayr, “Embedded components : a comparative analysis of reliability part II”, IPC APEX 2011
- [Min-05] Jacob Minz, Eric Wong, and Sung Kyu Lim, “Thermal and Crosstalk-Aware Physical Design For 3D System-On-Package”, 2005 Electronic Components and Technology Conference, DOI: 10.1109/ECTC.2005.1441368

- [Moa-15] A. Moazenzadeh, F. Suárez Sandoval, N. Spengler, V. Badilita and U. Wallrabe, "3-D Microtransformers for DC–DC On-Chip Power Conversion," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 5088-5102, Sept. 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2368252
- [Mok-08] "Method for manufacturing printed circuit board having embedded component", Jee-Soo Mok, Jun-Heyoung Park, Ki'HWan Kim', Sung-Yong Kim, Samsung Electro-Mechanics Co., 2008, Patent US20080263860 A1
- [Moo-65] G. E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 114–117, 1965.
- [Osm-13] S. Osmolovskyi et al, "Parameters of the manufacturing process and reliability of embedded components", 36th Int.Spring Seminar on Electronics Technology, 978-1-4799-0036-7/13/\$31.00 ©2013 IEEE, 2013
- [Par-03] Albert Parker, 1903, "Improvements in or connected with Electric Cables and the Jointing of the same", brevet UK 190304681
- [Rah-17] Rahim K, Mian A. A Review on Laser Processing in Electronic and MEMS Packaging. ASME. J. Electron. Packag. 2017;139(3):030801-030801-11. doi:10.1115/1.4036239.
- [Ryd-11] C. M. Ryder, "Embedded components : a comparative analysis of reliability part II", IPC APEX 2011
- [San-09] Song Sangsub et al. "A Millimeter-Wave System-on-Package Technology Using a Thin-Film Substrate With a Flip-Chip Interconnection." *IEEE Transactions on Advanced Packaging* 32 (2009): 101-108.
- [Sch-14] R. Schwerz, M. Roellig, S. Osmolovskyi and K. -. Wolter, "Reliability assessment of discrete passive components embedded into PCB core," 2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Mult-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), Ghent, 2014, pp. 1-7. doi: 10.1109/EuroSimE.2014.6813776
- [Sta-13] "Simulation of Embedded Components in PCB Environment and Verification of Board Reliability", J. Stahr and M. Morianz, IPC APEX EXPO, projet Hermes, 2013 Available : https://ats.net/wp-content/uploads/2017/03/IPC_APEX_2013_HERMES_v1.pdf [Accessed : 13/12/2018]
- [Sug-04] "CIRCUIT COMPONENT BUILT-IN MODULE WITH EMBEDDED SEMICONDUCTOR CHIP AND METHOD OF MANUFACTURING", Yasuhiro Sugaya, Toshiyuki Asahi, Shingo, Komatsu, Yoshiyuki, Yamamoto, Seiichi, Nakatani, Satoru, Yuhaku, Kazuo Ohtani, Matsushita Electric Industrial Co., 2004, Patent US 6784530 B2
- [Ton-13] "Advanced Flip Chip Packaging", edited by Ho-Ming Tong, Yi-Shao Lai and C. P. Wong, Springer Publishing 2013.

- [Tse-15] “EMBEDDED COMPONENT STRUCTURE AND PROCESS THEREOF”, Tzyy-jang Tseng, Wei-ming Cheng, Unimicron Technology Corp., 2015, Patent 20150305161 A1
- [Tur-89] Rao R. Turnmula, Eugene J. Rym'wzewski. *Microelectronics Puckuging Handbook*. New York Van Nostrand Reinhold, 1989, ch. 6, pp. 366-391.
- [Usg-05] Code of Federal Regulation, Volume 3, U.S. Government printing office, Revised Octobre 2005, [US Code of Federal Regulations 47 CFR 51.5](#)
- [Val-08] C. Val, Pascal Couderc, Nadia Boulay,, “Stacking Technique of Known Good Rebuilt Wafers Without Thru-Silicon Via Commercial Applications”, IEEE Electronics Packaging Technology Conference, 2008. EPTC 2008., DOI: 10.1109/EPTC.2008.4763611
- [Vas-05] C. Vasseur, “Les méthodes d’assemblages,” 2005. [Online]. Available: <http://www.esiee.fr/~vasseur/assemblage.pdf>. [Accessed: 07/12/2018].
- [Yan-15] Z. Yang, F. Gunawan, X. Gu, K. Ding and H. He, "Classification and 3D stack of Embedded Components technology in Substrate," *2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Changsha, 2015, pp. 666-671. doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236674
- [Zol-05] “Multilayer circuit board with embedded components and method of manufacture”, James A ZOLO, John K ARLEDGE, Nitin B DESAI, Motorola, Inc., 2005, Patent : US7594318 B2

Chapitre II

Les matériaux et l'architecture : comportements, caractérisations et modélisations

Sommaire

| | |
|--|----|
| Table des figures : Chapitre II..... | 56 |
| Table des tableaux : Chapitre II..... | 58 |
| II.1 Introduction..... | 60 |
| II.2 Les comportements thermomécaniques des matériaux | 60 |
| II.2.1 Comportement mécanique | 61 |
| II.2.2 Comportement thermique | 66 |
| II.2.3 Temporalité des déformations..... | 69 |
| II.2.4 Bilan..... | 70 |
| II.3 Définition des comportements thermomécaniques des matériaux étudiés | 72 |
| II.3.1 Silicium | 72 |
| II.3.2 Cuivre..... | 74 |
| II.3.3 Brasure eutectique sans plomb : Sn96,5Ag3Cu0,5 | 76 |
| II.3.4 Résine époxy et pré-imprégnés..... | 78 |
| II.4 Modèles pour les simulations | 84 |
| II.4.1 Problématique..... | 84 |
| II.4.2 Modélisation 2D | 85 |
| II.4.3 Modélisation 3D | 86 |
| II.4.4 Simplification du modèle 3D : réduction du nombre d'éléments..... | 87 |
| II.5 Conclusion | 89 |
| II.6 Références bibliographiques..... | 91 |

Table des figures : Chapitre II

| | |
|--|----|
| <i>Figure II.1 Courbe de traction nominale [For].....</i> | 64 |
| <i>Figure II.2 Courbe de contrainte-déformation avec traction cyclique sur U75V-2 avec les cycles de chargement 1-19 [Bao-16]</i> | 65 |
| <i>Figure II.3 Evolution du volume massique en fonction de la température pour trois structures de matériaux [Cal-07].....</i> | 68 |
| <i>Figure II.4 Evolution du module de Young en fonction de la température selon la structure du polymère [Inj]</i> | 68 |
| <i>Figure II.5 Courbes force-déplacement obtenues par essai de compression sur 4 matériaux de référence : V_i étant la vitesse cinématique de l'essai [Rab-15].....</i> | 69 |
| <i>Figure II.6 Réponse d'un matériau à une sollicitation de déformation cyclique (a) cas de durcissement, (b) cas d'adoucissement [UNI-10].....</i> | 70 |
| <i>Figure II.7 Illustration de l'effet favorable d'un chargement cyclique dans le cas d'un acier inoxydable [ENS]</i> | 70 |
| <i>Figure II.8 Exemple d'un circuit imprimé 6 couches [Ray]</i> | 72 |
| <i>Figure II.9 Module de Young en fonction de la température selon les mesures de [Sha-01], [Mic-95], [Kah-98], [Met-70]</i> | 73 |
| <i>Figure II.10 Coefficient de dilatation thermique du silicium en fonction de la température [Swe-09].....</i> | 74 |
| <i>Figure II.11 Courbe de contrainte déformation typique pour du cuivre électrodéposé en nanograin (nano-twin Cu), du cuivre en grains grossiers (coarse-grained Cu) et du cuivre nanocristallin (nc Cu) [Son-11].....</i> | 75 |
| <i>Figure II.12 Module de Young en fonction de la porosité du Cu nanocristallin (rouge) et du Pb nanocristallin (bleu) [Son-11].....</i> | 75 |
| <i>Figure II.13 Exemple de pré-imprégné [Tut] (a) 106, 56x56, épaisseur : 0,038mm (b) 1506, 46x45, épaisseur : 0,140mm (c) 1080, 60x47, épaisseur : 0,064mm (d) 7628, 44x32, épaisseur : 0,173mm</i> | 79 |
| <i>Figure II.14 Caractéristiques et descriptions de l'empilage des échantillons pour les essais de traction fabriqués par AT&S.....</i> | 80 |
| <i>Figure II.15 Courbes moyennes contraintes-déformations des trois matériaux.....</i> | 82 |
| <i>Figure II.16 Courbes moyennes contraintes-déformations du cœur R1577 pour les trois empilages.....</i> | 82 |
| <i>Figure II.17 Courbes moyennes contraintes-déformations selon la température</i> | 83 |
| <i>Figure II.18 Composition des couches du prototype (10 couches) réalisé dans le cadre du projet EDDEMA 3 composants actifs (STV, L5965 et Flash) et des capacités de 150μm et 330μm.....</i> | 84 |
| <i>Figure II.19 Exemple de maillage sur des vias 3D sous un composant Flash</i> | 85 |
| <i>Figure II.20 Exemple de maillage d'un (a) modèle de composant enfoui 2D : (b) maillage de la résine entre le composant et la couche cœur et (c) maillage d'un via.....</i> | 86 |
| <i>Figure II.21 Exemple d'un maillage simple sur une structure 3D (a) sans résine autour du composant (b) avec résine autour du composant.....</i> | 87 |
| <i>Figure II.22 Illustration du principe de modèles avec sous-structures [Voo-12]</i> | 88 |
| <i>Figure II.23 Principe de sous-modèle [Ram-14].....</i> | 88 |

Table des tableaux : Chapitre II

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau II-1 Tableau récapitulatif des symétries matérielles dans les matériaux composites usuels [Che-88].....</i> | <i>63</i> |
| <i>Tableau II-2 Relations entre les différentes propriétés élastiques d'un matériau isotrope linéaire</i> | <i>64</i> |
| <i>Tableau II-3 Principales caractéristiques thermomécaniques mise en avant dans les fiches descriptives.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tableau II-4 Comparaison de mesures du module de Young du silicium polycristallin</i> | <i>73</i> |
| <i>Tableau II-5 Différentes valeurs du module d'élasticité pour le silicium [Hop-09]</i> | <i>73</i> |
| <i>Tableau II-6 Propriétés générales du silicium.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tableau II-7 Propriétés élastiques du cuivre [Son-11], [Civ].....</i> | <i>74</i> |
| <i>Tableau II-8 Propriétés plastiques du cuivre électrodéposé [Son-11], [Civ]</i> | <i>75</i> |
| <i>Tableau II-9 Paramètres du modèle viscoplastique d'Anand pour une brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5}</i> | <i>77</i> |
| <i>Tableau II-10 Propriétés mécaniques élastiques de la brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5} [Mys-09]</i> | <i>77</i> |
| <i>Tableau II-11 Propriétés thermomécanique du PCB FR-4 « classique » [Mul-14].....</i> | <i>78</i> |
| <i>Tableau II-12 Propriétés des pré-imprégnés de Hitachi envisagés [Hit-16]</i> | <i>79</i> |
| <i>Tableau II-13 Propriétés du cœur R-1577 de Panasonic [Pan-17].....</i> | <i>79</i> |
| <i>Tableau II-14 Bilan des résultats de traction sur 9 échantillons.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Tableau II-15 Propriétés élastiques et coefficient de dilatation thermique de la résine époxy en fonction de la température [Mac-14]</i> | <i>83</i> |
| <i>Tableau II-16 Bilan des propriétés principales retenues pour les simulations pour les différents matériaux des assemblages</i> | <i>90</i> |

II.1 Introduction

L'approche prédictive de la fiabilité par simulation numérique réalisée dans ces travaux de thèse implique de connaître les propriétés thermomécaniques des matériaux. Ces caractéristiques telles que le module de Young, le coefficient de Poisson, le coefficient de dilatation thermique, définissent le comportement des matériaux face à une variation de température, de pression, de vibrations, etc... Cet état de contrainte est appelé chargement. Les résultats de simulation sont liés à la définition de ces caractéristiques et aux hypothèses de simplifications éventuellement faites. Complexifier le modèle des matériaux revient à complexifier les simulations et tous les matériaux n'ont pas la nécessité d'être défini de manière égale.

Dans ce chapitre, nous allons définir les propriétés majeures des matériaux étudiés ainsi que les conditions et simplifications appliquées pour la définition d'un modèle propre à chaque matériau selon le besoin. Les matériaux étudiés seront ensuite définis par ces propriétés. Il est également important de positionner celles-ci par rapport aux possibilités de choix de matériaux dans la technologie et la provenance de ces données. Enfin, la modélisation de la structure est aussi importante que la définition de ses éléments. Les choix faits pour le modèle impacteront les résultats dans une certaine mesure. Il est important de comprendre les avantages et limitations de chaque modèle.

II.2 Les comportements thermomécaniques des matériaux

La définition d'un matériau peut se faire selon trois catégories de comportements : mécanique, thermique et électrique. Mettant de côté l'aspect électrique qui n'est pas au cœur de l'étude, différentes réponses aux chargements peuvent être considérées tels que l'élasticité linéaire et non linéaire, la thermoélasticité, la viscoélasticité, la plasticité ou encore la conduction thermique. L'étude se limitera aux considérations élastiques, plastiques et thermoélastiques des matériaux dans une hypothèse de mécanique des milieux continus.

Sans reprendre en intégralité des cours tels que ceux de Roland Fortunier [For] ou de Jean-Claude Charmet [Cha], il est nécessaire de positionner les bases de la science des matériaux. L'étude du comportement thermomécanique des matériaux met en jeu deux variables, le tenseur des contraintes σ et le tenseur des déformations ε qui définissent la réponse d'une structure à une sollicitation. Dans l'espace en 3 dimensions, ces tenseurs sont représentés par des matrices 3x3. La déformation définit l'état structurel de l'objet alors que la contrainte représente les efforts intérieurs à la structure déformée.

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad \varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}$$

Ces deux tenseurs sont évidemment liés par les lois de comportements élastiques ou plastiques. Ce sont les propriétés thermomécaniques ainsi que la structure cristalline ou la

composition des matériaux qui définissent le comportement et donc la loi qui lie la contrainte à la déformation.

II.2.1 Comportement mécanique

Dans le cadre de déformations mécaniques, une structure ne peut réagir que de trois manières selon ses propriétés et la nature du chargement :

- Dans le premier cas, une structure observera un comportement dit élastique, c'est-à-dire que la déformation est proportionnelle à la contrainte imposée. La structure retrouvera donc son aspect d'origine lorsque le chargement est retiré.
- Le second comportement observable est un phénomène de déformation plastique, qui correspond à une déformation irréversible : lorsque le chargement est retiré, la structure est partiellement réarrangée.
- Enfin, un chargement peut entraîner une rupture de la structure, la liaison est alors rompue sous l'action de la contrainte exercée.

II.2.1.1 Elasticité

En science des matériaux, Robert Hooke (1635-1703) a caractérisé les bases du comportement élastique linéaire des matériaux [Hoo-76]. Cette loi établit une relation de proportionnalité entre la contrainte appliquée et la déformation observée dans le cas de faible déformation. Thomas Young (1773-1829) a démontré que ce rapport définissait la rigidité intrinsèque du matériau et dépendait des dimensions de l'échantillon [You-07]. Dans le cadre d'un essai de traction cette loi se traduit par :

$$\sigma = E \varepsilon^e \quad (\text{II.1})$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \sigma \text{ est la contrainte uniaxiale.} \\ \varepsilon^e \text{ est la déformation uniaxiale.} \\ E \text{ est le module de Young.} \end{array} \right.$

Cette analyse sera complétée par les travaux de Siméon Denis Poisson (1781-1840) qui a établi un lien entre la déformation axiale (axe 1) et la déformation dans le plan perpendiculaire (axe 2 et 3), correspondant au coefficient de Poisson ν [Poi-11].

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} = \nu_{13} \quad (\text{II.2})$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \nu \text{ est le coefficient de Poisson.} \\ \varepsilon_{11} \text{ est la déformation relative selon l'axe 1, axe principale de déformation.} \\ \varepsilon_{22} \text{ est la déformation relative selon l'axe 2.} \\ \varepsilon_{33} \text{ est la déformation relative selon l'axe 3.} \end{array} \right.$

Diverses propriétés mécaniques ont également été mises en avant dans la continuité de la loi de Hooke telles que le module de cisaillement (ou de Coulomb) G , le module de Lamé λ , le module de compressibilité K et le module d'onde de compression μ . Les relations liant certains de ces coefficients seront également évaluées.

La loi de Hooke sera généralisée par Augustin Louis Cauchy (1789-1857) pour se rapporter à un cas général dans un espace à trois dimensions [Cau-22] :

$$\sigma = C \varepsilon^e \quad (\text{II.3})$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \sigma \text{ est le tenseur de contrainte.} \\ \varepsilon^e \text{ est le tenseur de déformation.} \\ C \text{ est un tenseur du quatrième ordre appelé tenseur des rigidités (ou tenseur} \\ \text{d'élasticité) dont les coefficients sont notés } C_{ijkl} \text{ avec } i, j, k, l \text{ variant de } 1 \text{ à } 3. \end{array} \right.$

Le tenseur de rigidité C intègre l'ensemble des caractéristiques élastiques du matériau et est donc inversible. L'inverse de C , le tenseur S est appelé tenseur des compliances (ou des complaisances élastiques).

La connaissance de l'ensemble des coefficients C_{ijkl} serait suffisante pour réaliser les calculs de déformation mais il est possible de réaliser des simplifications de ces tenseurs. Yvon Chevalier détaille très bien dans [Che-88] les méthodes de simplification et de choix de base pour la matrice C dans le cas de matériaux composites.

Les symétries générales des concepts de la mécanique (principe d'action réaction et équilibre des moments) attribuent une symétrie aux tenseurs σ et ε . Les symétries de σ et ε imposent donc 6 composantes indépendantes permettant de réduire le nombre de coefficient C_{ijkl} de 81 à 36 termes. Or la matrice C est elle-même symétrique réduisant ce nombre à 21 termes indépendants.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1123} & S_{1131} & S_{1112} \\ S_{2211} & S_{2222} & S_{2233} & S_{2223} & S_{2231} & S_{2212} \\ S_{3311} & S_{3322} & S_{3333} & S_{3323} & S_{3331} & S_{3312} \\ S_{2311} & S_{2322} & S_{2333} & S_{2323} & S_{2331} & S_{2312} \\ S_{3111} & S_{3122} & S_{3133} & S_{3123} & S_{3131} & S_{3112} \\ S_{1211} & S_{1222} & S_{1233} & S_{1223} & S_{1231} & S_{1212} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les symétries matérielles présentées dans le tableau II-1 sont inhérentes aux matériaux. Il est courant pour des matériaux simples de présenter d'importantes symétries physiques, c'est-à-dire qu'il existe des axes selon lesquels les comportements sont identiques. Dans le cas de matériaux composites, la matrice des rigidités est plus complexe. C'est pourquoi une grande partie des matériaux décrits par la suite seront considérés isotropes ou quasi-isotropes.

La détermination des coefficients des matrices C et S se fait par des essais mécaniques sur des éprouvettes adaptées pour déterminer les propriétés mécaniques telles que le module de Young, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement, etc... Le principe

de superposition pourra permettre le calcul des coefficients de la matrice C. Le tableau II-2 indique les relations entre les différents modules d'élasticité dans le cas d'un matériau homogène isotrope linéaire pour des déformations élastiques.

Tableau II-1 Tableau récapitulatif des symétries matérielles dans les matériaux composites usuels [Che-88]

| Matériaux | Matrice des rigidités C | Variables |
|---|--|---|
| <p>Orthotrope</p> <p>qui possèdent deux plans de symétrie orthogonaux.</p> | $\begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323} & 0 & 0 \\ & Sym & & & C_{3131} & 0 \\ & & & & & C_{1212} \end{vmatrix}$ | <p>9 variables indépendants</p> <p>E_1, E_2, E_3</p> <p>$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$</p> <p>$G_{23}, G_{13}, G_{12}$</p> |
| <p>Quasi isotrope transverse (axe 1 et 2 équivalents)</p> <p>matériaux orthotropes invariants par rotation de 90° autour d'un axe et d'un seul du repère d'orthotropie.</p> | $\begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{1111} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323} & 0 & 0 \\ & Sym & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{1212} \end{vmatrix}$ | <p>6 variables indépendants</p> <p>$E_1 = E_2, E_3$</p> <p>$\nu_{12} = \nu_{21}, \nu_{13} = \nu_{23}$</p> <p>$G_{23} = G_{13}, G_{12}$</p> |
| <p>Isotrope transverse (axe d'isotropie 3)</p> <p>matériaux orthotropes invariants par rotation d'angle quelconque autour d'un des axes du repère d'orthotropie.</p> | $\begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{1111} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323} & 0 & 0 \\ & Sym & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & \frac{C_{1111} - C_{2222}}{2} \end{vmatrix}$ | <p>5 variables indépendants</p> <p>$E_1 = E_2, E_3$</p> <p>$\nu_{12} = \nu_{21}, \nu_{13} = \nu_{23}$</p> <p>$G_{23} = G_{13},$</p> <p>$G_{12} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})}$</p> |
| <p>Quasi isotrope</p> <p>matériaux orthotropes invariants par rotation de 90° autour de l'un quelconque des axes du repère d'orthotropie.</p> | $\begin{vmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{1111} & C_{1122} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{2323} & 0 & 0 \\ & Sym & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{2323} \end{vmatrix}$ | <p>3 variables indépendants</p> <p>$E_1 = E_2 = E_3 = E$</p> <p>$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu$</p> <p>$G_{23} = G_{13} = G_{12} = G$</p> |
| <p>Isotrope</p> <p>matériaux invariants quel que soit le changement de repère, toutes les directions sont donc identiques.</p> | $\begin{vmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & Sym & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{vmatrix}$ | <p>2 variables indépendants</p> <p>E</p> <p>ν</p> <p>$G = \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$</p> <p>$\lambda$ module de Lamé</p> |

Tableau II-2 Relations entre les différentes propriétés élastiques d'un matériau isotrope linéaire

| Constantes | Paire connue | | | | | | | | |
|------------|--|----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | λ, G | E, G | K, λ | K, G | λ, ν | G, ν | E, ν | K, ν | K, E |
| K | $\lambda + \frac{2}{3} G$ | $\frac{G E}{3(3G - E)}$ | K | K | $\frac{\lambda(1 + \nu)}{3\nu}$ | $\frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$ | $\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$ | K | K |
| E | $\frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G}$ | E | $\frac{9K(K - \lambda)}{3K - \lambda}$ | $\frac{9KG}{3K + G}$ | $\frac{\lambda(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$ | $2G(1 + \nu)$ | E | $3K(1 - 2\nu)$ | E |
| λ | λ | $\frac{G(E - 2G)}{3G - E}$ | λ | $K - \frac{2G}{3}$ | λ | $\frac{2G\nu}{1 - 2\nu}$ | $\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ | $\frac{3K\nu}{1 + \nu}$ | $\frac{3K(3K - E)}{9K - E}$ |
| G | G | G | $\frac{3(K - \lambda)}{2}$ | G | $\frac{\lambda(1 - 2\nu)}{2\nu}$ | G | G | $\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$ | $\frac{3KE}{9K - E}$ |
| ν | $\frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$ | $\frac{E}{2G} - 1$ | $\frac{\lambda}{3K - \lambda}$ | $\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$ | ν | ν | ν | ν | $\frac{3K - E}{6K}$ |

II.2.1.2 Plasticité

Le comportement des matériaux ne se restreint pas à des déformations linéaires. La notion de plasticité définit les déformations irréversibles sans rupture qui peuvent survenir lorsque la structure est soumise à une contrainte trop forte. La loi de Hooke n'est alors plus vérifiée. Le phénomène de plasticité survient après un domaine où le matériau se comporte approximativement de manière élastique et permet ainsi de définir la limite d'élasticité d'un matériau. Un exemple de méthode simple d'évaluation de la limite d'élasticité est la réalisation d'essai de traction sur un matériau. La figure II.1 illustre la réaction nominale d'un matériau à un essai de traction. Evidemment selon la nature du matériau et donc de ses propriétés le profil peut varier.

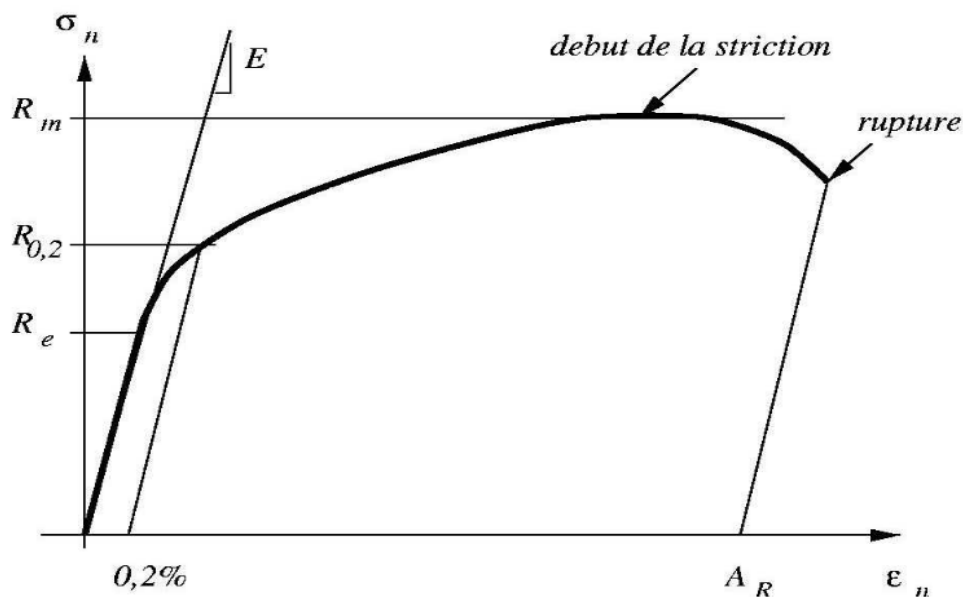


Figure II.1 Courbe de traction nominale [For]

La courbe nominale de la Figure II.1 présente trois domaines de comportement délimités par les limites d'élasticité R_e , la résistance ultime à la traction R_m et la rupture caractérisée par son allongement A_R . Initialement, tout matériau présente un domaine élastique où les lois définies précédemment peuvent être prises en compte, la pente de la courbe correspondant au module de Young. Une fois la limite d'élasticité franchie plusieurs cas sont possibles : les matériaux fragiles qui rompent dès le franchissement de cette limite et les matériaux ductiles qui présentent un domaine plastique. Dans le cas de déformations plastiques modérés, il est admis que les propriétés du matériau sont inchangées. La Figure II.2 illustre parfaitement cette conservation du module de Young entre deux essais de traction même si en pratique il est possible de définir un module de Young apparent qui est fonction de la fatigue du matériau. Le domaine plastique reste stable jusqu'à la limite R_m . Ce point traduit une instabilité mécanique dans la structure (perte d'homogénéité dans la déformation) qui conduit à la rupture caractérisée par son allongement A_R .

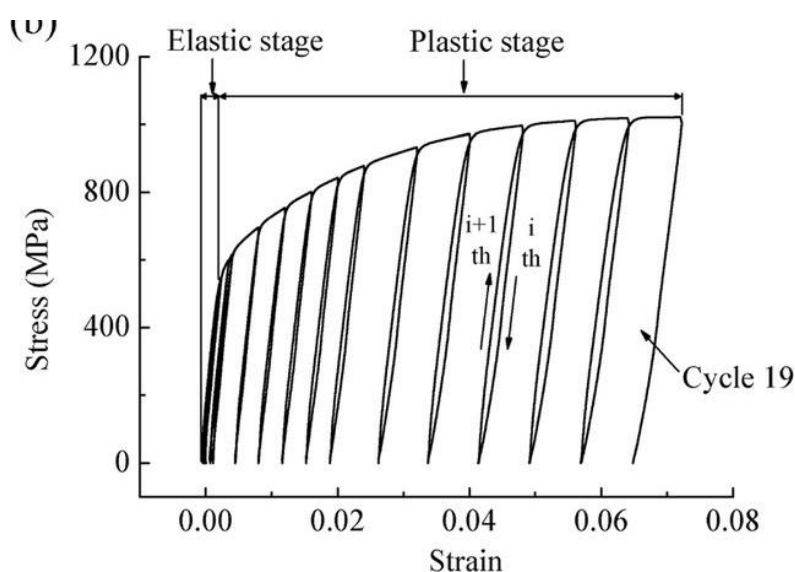


Figure II.2 Courbe de contrainte-déformation avec traction cyclique sur U75V-2 avec les cycles de chargement 1-19 [Bao-16]

Il faut noter que la limite réelle d'élasticité σ_0 doit être unique pour un matériau et ne doit donc pas dépendre de la sollicitation. Or dans le cas général, des différences sont observées entre la traction et la compression et selon l'anisotropie du matériau. Ainsi, selon le type de sollicitations, un facteur correctif propre au matériau est introduit pour obtenir une unique valeur dans la définition de la limite d'élasticité σ_0 qui ne doit pas donc pas être comparée à la contrainte appliquée lors de l'essai. Ces facteurs introduisent la notion de contrainte équivalente. Cette notion se résume par l'application d'une norme au tenseur de contrainte comparable au scalaire qu'est la limite d'élasticité, $\|\sigma\|$. Les contraintes équivalentes les plus utilisées sont celles de Von Mises et Tresca pour les matériaux isotropes, et de Hill et Tsai pour les matériaux anisotropes définies comme suit :

- Contrainte équivalente de Tresca [Tre-64] :

$$\|\sigma_T\| = \text{Sup} [|\sigma_I - \sigma_{II}|, |\sigma_{II} - \sigma_{III}|, |\sigma_{III} - \sigma_I|]$$

Avec σ_I , σ_{II} et σ_{III} les composantes principales du tenseur des contraintes σ .

- Contrainte équivalente de Von Mises :

$$\|\sigma_{VM}\| = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)} \quad (\text{II.6})$$

- Contrainte équivalente de Hill :

$$\|\sigma_H\| = \sqrt{F(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + H(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{23}^2 + 2N\sigma_{31}^2} \quad (\text{II.7})$$

Les coefficients F, G, H, L, M et N sont propres à l'anisotropie du matériau et peuvent être déterminés à l'aide d'essais de traction et de cisaillement dans différentes directions. Cette définition de la contrainte équivalente est une extension de la définition de Von Mises puisque dans le cas anisotrope on retrouve les coefficients 1/2 pour F, G et H et 3/2 pour L, M et N.

- Contrainte équivalente de Tsai [Tsa-71] :

$$\|\sigma_{TS}\| = \|\sigma_H\| + P(\sigma_{11} - \sigma_{33}) + Q(\sigma_{22} - \sigma_{33}) \quad (\text{II.8})$$

Cette contrainte apporte la notion de dissymétrie en traction et en compression qui peut exister dans la structure d'un matériau, notamment dans le bois, en introduisant les coefficients P et Q à la définition de Hills [Hil-48].

Le comportement élastique d'un matériau sera ainsi défini par la condition : $\|\sigma\| - \sigma_0 \leq 0$. Les contraintes de Hill et Tsai peuvent être utilisées dans le cadre d'une connaissance complète des caractéristiques des matériaux. Sans cette connaissance parfaite il reste possible d'effectuer une comparaison entre le critère de Von Mises et la limite R_e minimale entre les différentes orientations du matériau dans le cadre des essais de traction. Cela s'inscrit dans l'optique de simplification des calculs et de lecture des résultats.

Les lois de déformation plastique obéissent à des règles propres aux matériaux mais le principe de superposition permet de décomposer la déformation totale entre le facteur lié à la déformation élastique et celui de la déformation plastique dans le cadre d'une déformation plastique modérée :

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (\text{II.9})$$

II.2.2 Comportement thermique

Au cours de sa fabrication et de son fonctionnement, un circuit électrique est soumis à de nombreuses conditions de température. Or le comportement d'un matériau se trouve souvent altéré par cette variation de température. L'une des bases des changements occasionnés par la température est le changement d'état du matériau. Bien évidemment dans le cas des matériaux utilisés, les changements ne se résument pas simplement au passage de l'état liquide à l'état solide mais, à des variations plus subtiles des caractéristiques des matériaux. L'un des phénomènes majeurs à prendre en compte est le principe de dilatation thermique qui détermine le volume du matériau en fonction des conditions de température. De plus, les propriétés mécaniques vues précédemment sont affectées et un matériau peut devenir plus malléable ou plus dur selon les variations en température.

II.2.2.1 Propriétés thermiques : coefficient de dilatation thermique (CTE)

Lorsqu'un matériau libre est soumis à un différentiel de température, celui-ci se dilate proportionnellement à la variation de température selon le coefficient de dilatation thermique (CTE) α :

$$\varepsilon_{th} = \alpha \Delta T \quad (II.10)$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \Delta T \text{ est la variation de température} \\ \varepsilon_{th} \text{ est le tenseur de déformation} \\ \alpha \text{ est le tenseur des coefficients de dilatation thermique dépendant des symétries du} \\ \text{matériau.} \end{array} \right.$

Le CTE, comme les propriétés mécaniques dans de nombreux cas, peut être dépendant des conditions de température du milieu. Ainsi on peut distinguer deux types de CTE, le CTE moyen et le CTE instantané. Le premier traduit une variation linéaire de la déformation entre deux températures rendant le CTE indépendant de la température alors que le second est une détermination ponctuelle du CTE à une température donnée, $\alpha(T)$. La déformation entre deux températures se déterminera alors selon une approche intégrale :

$$d\varepsilon_{th} = \alpha(T)dT \quad (II.11)$$

La déformation thermique respecte cette équation (et ne génère pas de contraintes) dans le cas où le matériau n'est pas lié mécaniquement à l'extérieur et que le champ de température est linéaire. Dans le cas contraire, la dilatation est dite contrariée et des contraintes internes apparaissent. La déformation pourra alors être décomposée selon la déformation mécanique et la déformation thermique.

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{th} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} \quad (II.12)$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon \text{ est la déformation totale.} \\ \varepsilon_M \text{ est la déformation mécanique.} \\ \varepsilon_{th} \text{ est la déformation thermique.} \\ \varepsilon_e \text{ est la déformation élastique.} \\ \varepsilon_p \text{ est la déformation plastique.} \end{array} \right.$

Pour des sollicitations thermomécaniques pour un matériau élastique linéaire, la contrainte thermoélastique s'exprime :

$$\sigma = C : \varepsilon_e = C : (\varepsilon - \alpha \Delta T) \quad (II.13)$$

Dans le cadre du projet, la structure est composée de différents matériaux dont les caractéristiques diffèrent ce qui entraîne l'apparition de contraintes au sein de l'assemblage en raison des différentes couches de matériaux liées mécaniquement entre elles.

II.2.2.2 Dépendance thermique des propriétés mécaniques

Comme dit précédemment, les propriétés d'un matériau peuvent dépendre des conditions de température. Ainsi des variations du module de Young sont observées dans de

nombreux matériaux. Ces variations représentent des changements dans la structure du matériau et peuvent être plus ou moins importantes. Une rupture nette dans les changements des propriétés d'un matériau traduit un changement dans l'agencement de la structure. Une température caractéristique de changement de propriété est la température de transition vitreuse (T_g) qui caractérise la phase amorphe d'un polymère ou d'un verre. Cet intervalle de température délimite l'état solide et l'état caoutchouteux d'un matériau de la même manière que la température de fusion délimite le passage à l'état liquide. Les figures II.3 et II.4 illustrent les différences de comportement que peuvent avoir des matériaux avec la température. Cette propriété est très importante dans la fabrication des circuits imprimés qui l'utilise pour l'assemblage des différents éléments.

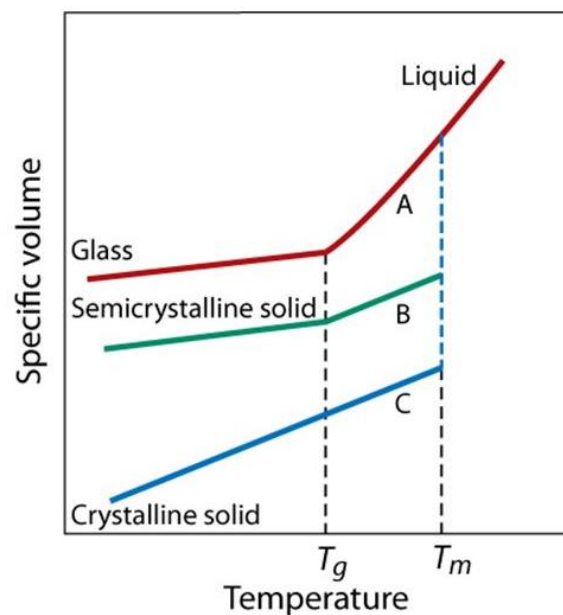


Figure II.3 Evolution du volume massique en fonction de la température pour trois structures de matériaux [Cal-07]

• THERMAL TRANSITIONS IN POLYMERS

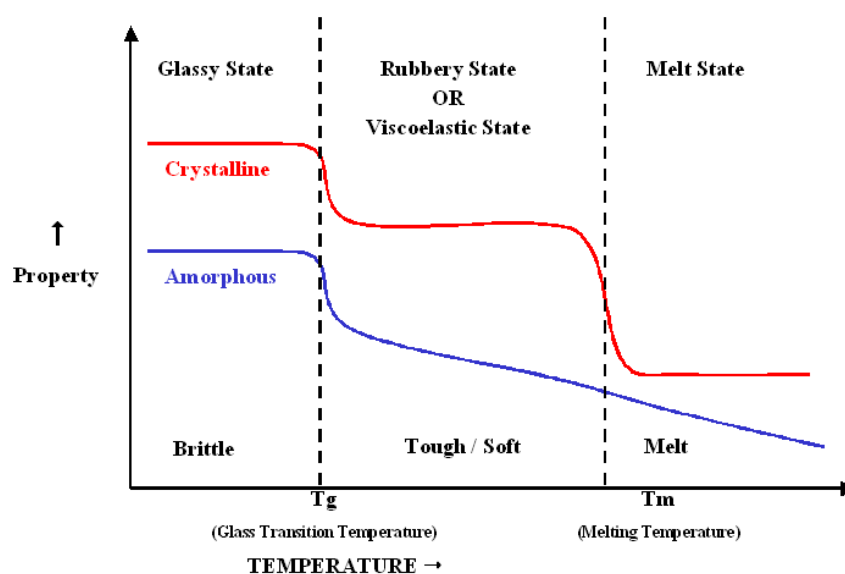


Figure II.4 Evolution du module de Young en fonction de la température selon la structure du polymère [Inj]

Les caractéristiques propres aux matériaux utilisés seront détaillées par la suite en précisant notamment la nature de la transition vitreuse pour les matériaux concernés et en décrivant les modèles sélectionnés.

II.2.3 Temporalité des déformations

Malgré tout, les propriétés mises en avant précédemment ne sont qu'une approche simplifiée de certaines propriétés mécaniques réelles de déformation. En effet, les notions de viscoélasticité/plasticité ou de comportement élastoplastique introduisent la notion de temps dans la déformation puisque la réponse d'un matériau n'est pas toujours immédiate. La figure II.5 illustre l'influence de la vitesse de déformation dans les résultats d'essai de compression sur des matériaux de référence.

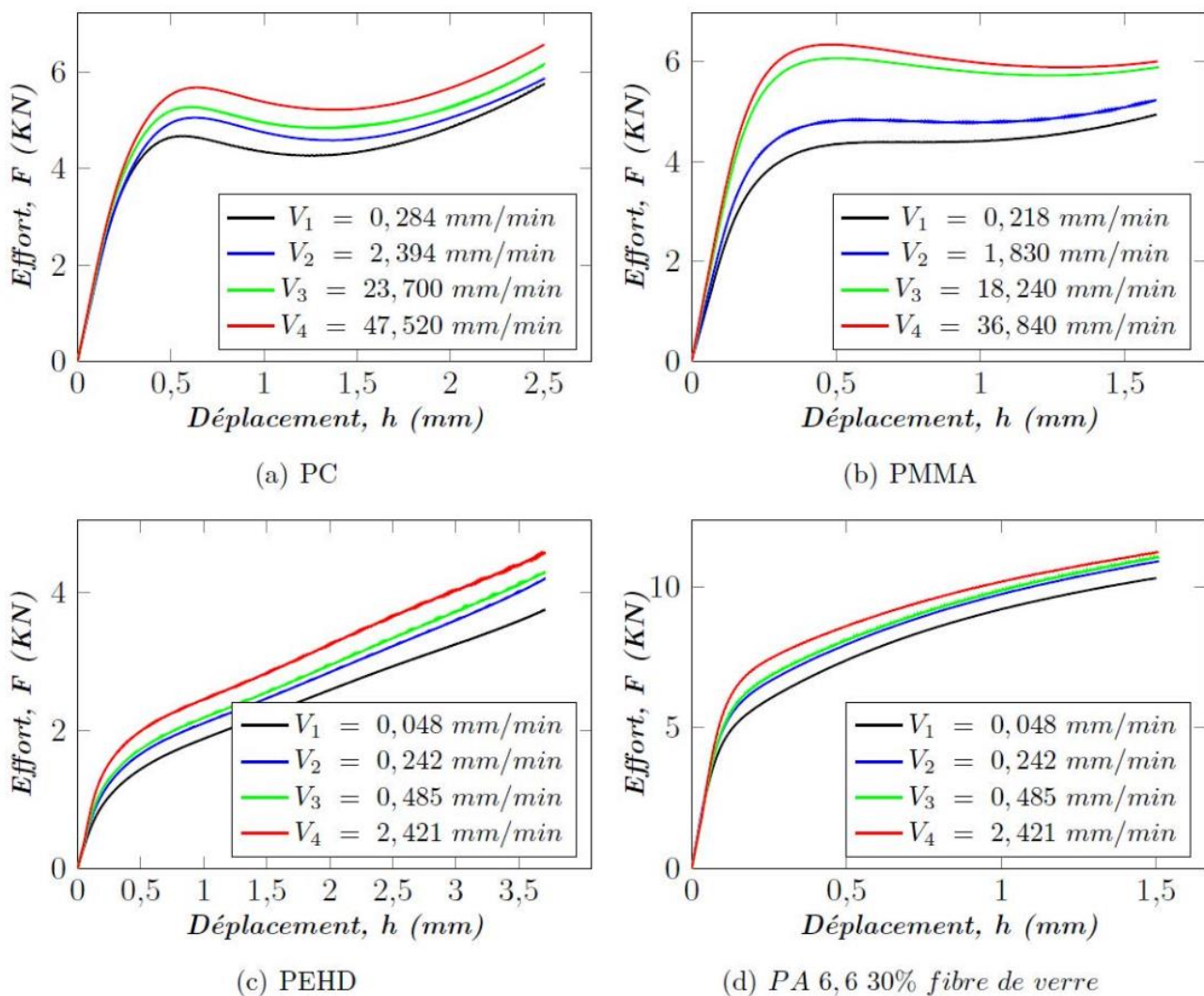


Figure II.5 Courbes force-déplacement obtenues par essai de compression sur 4 matériaux de référence : V_i étant la vitesse cinématique de l'essai [Rab-15]

La seconde dépendance temporelle introduit la notion de fatigue (ou de vieillissement). Elle repose sur le fait que la réponse d'un matériau dépend du nombre de sollicitations que celui-ci a reçu (cf. Figure II.6 et II.7). Cette mécanique sera au cœur de la

problématique de fiabilité. Les méthodes d'évaluation de la fatigue sont très dépendantes du matériau considéré. La nature des modèles utilisés sera rappelée lors de la définition des matériaux et l'exploitation des résultats.

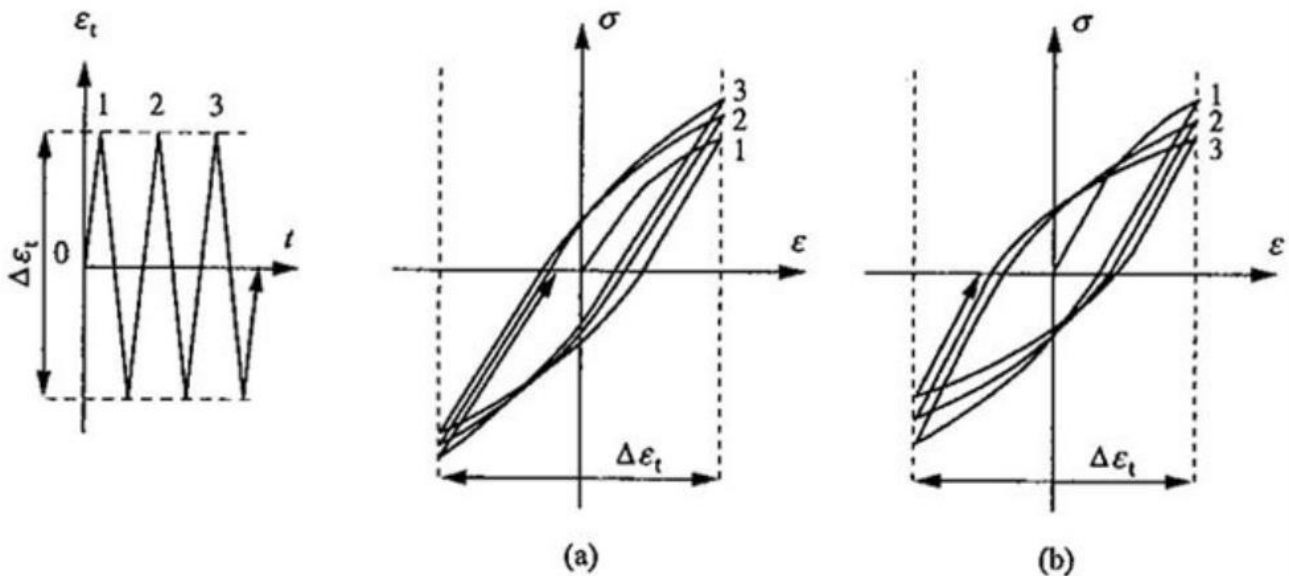
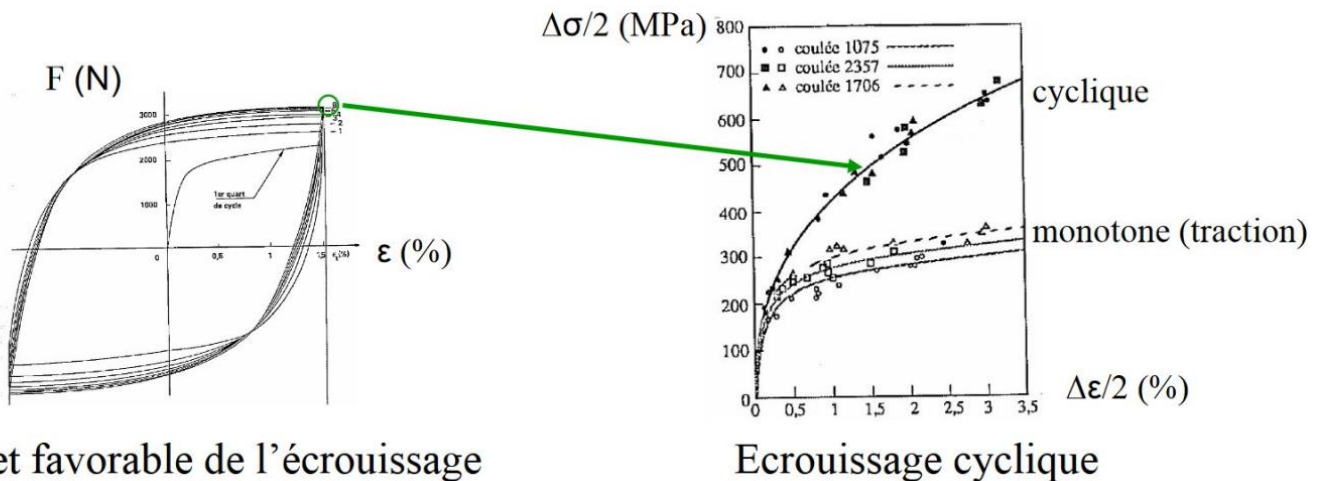


Figure II.6 Réponse d'un matériau à une sollicitation de déformation cyclique (a) cas de durcissement, (b) cas d'adoucissement [UNI-10]



Effet favorable de l'écrouissage

Écrouissage cyclique

Figure II.7 Illustration de l'effet favorable d'un chargement cyclique dans le cas d'un acier inoxydable [ENS]

II.2.4 Bilan

Le tableau II-3 rappelle les propriétés mécaniques et thermiques les plus connues ou mises en avant par les fabricants avec en **vert** les propriétés au cœur de la problématique de l'étude. Les autres propriétés n'entrant pas en jeu dans les simulations ou complexifiant trop le modèle dans un premier temps. Les fiches descriptives des matériaux fournis sont un élément important pour décrire les matériaux sans réaliser de caractérisation complète.

Tableau II-3 Principales caractéristiques thermomécaniques mise en avant dans les fiches descriptives

| Propriétés mécaniques | Propriétés thermiques |
|--|---|
| <p>Module de Young Dépendant de la direction X, Y, Z (MPa) Comportement mécanique linéaire élastique d'un matériau solide : coefficient du stress $\sigma(\varepsilon)$ (force par unité d'aire) selon l'axe sur l'effort ε (coefficient de la déformation sur la longueur initiale) suivant le même axe</p> $E = \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon} = \frac{FL_0}{A_0\Delta L}$ <p>E est le module de Young (module d'élasticité) (MPa) F est la force exercée sur un objet sous tension (N) A₀ est l'aire de la section coupée orthogonale à la force appliquée (mm²) ΔL est le changement de longueur de l'objet (mm) L₀ est la longueur originale de l'objet (mm)</p> | <p>Coefficient de dilatation thermique (ppm/°C) X, Y, Z direction La dilatation thermique est le changement de volume de la matière en réponse à un changement de température. Le coefficient de dilatation thermique décrit les changements de taille d'un objet en fonction de la température.</p> $\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$ <p>P Pression constante V est le volume (m³) T est la température (°C)</p> |
| <p>Coefficient de Poisson Coefficient négatif de l'effort transverse sur l'effort axial</p> $\nu = - \frac{d\varepsilon_{trans}}{d\varepsilon_{axial}}$ <p>ν est le coefficient de Poisson ε_{trans} est l'effort transverse (négatif pour un étirement axial et positif pour une compression) ε_{axial} est l'effort axial (positif pour un étirement axial et négatif pour une compression).</p> | <p>Température de transition vitreuse Tg (°C) Est la température à partir de laquelle un polymère passe d'un état rigide à un matériau plus malléable.</p> |
| <p>Force de tension pour la rupture (MPa) Force nécessaire pour la rupture d'un matériau Liée à l'allongement à la rupture</p> | <p>Conductivité thermique (W.m⁻¹.K⁻¹) Est la capacité d'un matériau à conduire la chaleur</p> |
| <p>Module de cisaillement (MPa) Est défini comme la composante de contrainte coplanaire à une section de matériau pour l'arracher</p> $\tau = \frac{F}{A}$ <p>τ est le stress de cisaillement (MPa) F est la force appliquée (N) A est l'aire de la section de coupe coplanaire au vecteur de force (mm²)</p> | <p>Absorption d'humidité (%) Capacité d'un polymère à absorber une part de son poids (volume) en eau après immersion pour une durée spécifique sous un environnement contrôlé.</p> |
| <p>Point de Yield / limite d'élasticité Point de stress à partir duquel le matériau se déforme plastiquement. Une fois ce point franchit une partie de la déformation sera permanente et irréversible.</p> | <p>Temps avant délamination à 260°C (min)</p> |
| ... | ... |

L'information majeure reste la notion de limite d'élasticité qui définit le domaine élastique qui, une fois franchie, peut conduire à la rupture.

II.3 Définition des comportements thermomécaniques des matériaux étudiés

La réalisation d'un circuit imprimé multicouches requiert l'assemblage de plusieurs matériaux différents. Chaque interface entre matériaux aux propriétés différentes impose des contraintes lors de sollicitations thermomécaniques. Un circuit traditionnel empile des couches de cœur (communément du FR-4), de cuivre et de pré-imprégné avec des vias venant affecter l'homogénéité relative de la structure (cf. Figure II.8).

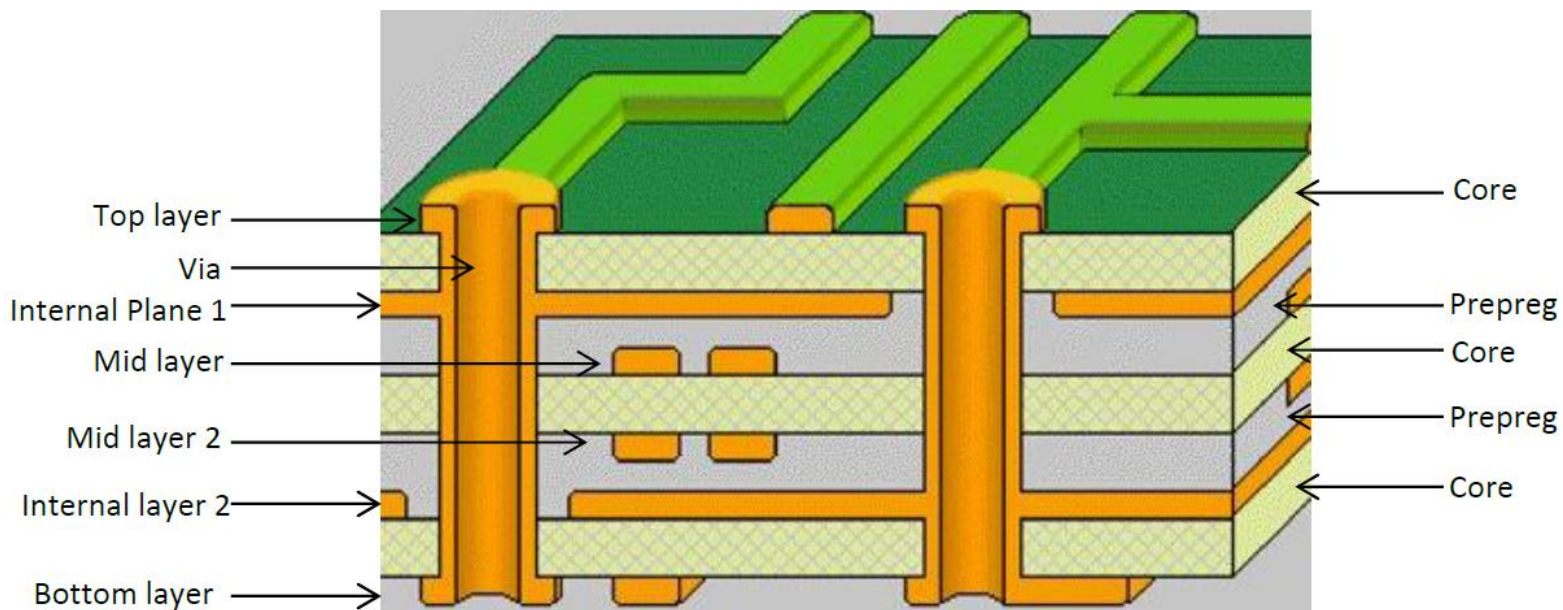


Figure II.8 Exemple d'un circuit imprimé 6 couches [Ray]

Dans le cadre d'un circuit intégrant des composants enfouis la structure est affectée et de nouvelles interfaces entre matériaux apparaissent. Par conséquent les matériaux importants à définir dans le cadre de cette étude sont le silicium, le cuivre, l'époxy, un alliage étain-argent-cuivre et des matériaux pré imprégnés. **Les propriétés données par la suite sont celles qui seront introduites dans le logiciel de simulation.** Une partie de l'étude repose sur la comparaison entre les techniques utilisées pour l'enfouissement des composants (utilisation de brasures ou de vias) et les matériaux utilisés (différents pré-imprégnés ou matériaux du cœur).

II.3.1 Silicium

Le silicium est le 14^{ème} élément du tableau périodique des éléments et a pour symbole Si. Le silicium existe sous de nombreuses formes mais c'est ici sa forme cristalline qui est mise en avant. Selon son orientation cristalline, le silicium présente des propriétés mécaniques différentes. Celui-ci peut être polycristallin ou monocristallin. Dans le cadre d'une structure polycristalline, Sharpe & al [Sha-97] a effectué une comparaison de plusieurs études menées entre 1989 et 1996 sur la détermination du module de Young (cf. Tableau II.4). Dans le cas d'une structure monocristalline, l'orientation impacte grandement les propriétés mécaniques. Le tableau II.5 donne les propriétés élastiques du silicium monocristallin selon divers critères.

Les propriétés élastiques du silicium peuvent également être données en fonction de la température comme l'ont fait W. N. Sharpe & al [Sha-01] pour le module de Young (cf. Figure II.9) et C. A. Swenson [Swe-09] pour le coefficient de dilatation thermique (cf. Figure II.10).

Tableau II-4 Comparaison de mesures du module de Young du silicium polycristallin

| Référence | Année | Module de Young |
|---------------------|-------|-----------------|
| Tabata [Tab-89] | 1989 | 160 |
| Tai [Tai-90] | 1990 | 123 |
| Walker [Wal-91] | 1991 | 190 |
| Koskinen [Kos-93] | 1993 | 175±25 |
| Maier-Schn [Mai-95] | 1995 | 162±8 |
| Michalícek [Mic-95] | 1995 | 163 |
| Biebl [Bie-95] | 1995 | 170 |
| Read [Rea-96] | 1996 | 140±20 |
| Kahn [Kah-96] | 1996 | 150±30 |
| Sharpe [Sha-97] | 1996 | 169±6,2 |

Tableau II-5 Différentes valeurs du module d'élasticité pour le silicium [Hop-09]

| Load Case | Symbol | Appropriate Value for Silicon |
|---|------------|---|
| Axial or narrow beam bending loads <110> directions ("X or Y axis") <100> directions ("45° off-axis") | E | 169 GPa 130 GPa |
| Plate bending, $\nu = 0.064$ for <110> in (100) | E'_{110} | 170 GPa |
| Thin film biaxial stress/strain, (100) plane | B_{100} | 180 GPa |
| Shear load, twisting a <110> ("X" or "Y") beam | G | 50.9 GPa |
| Stress concentrations | E_V | 166 GPa |
| Hydrostatic loads | B | 97.8 GPa |
| Temperature Coefficient of E | TCE | ~ -60 ppm/°C |
| Orthotropic material model properties for a standard (100) silicon wafer | | $E_x = E_y = 169$ GPa, $E_z = 130$ GPa $\nu_{yz} = 0.36$, $\nu_{zx} = 0.28$, $\nu_{xy} = 0.064$ $G_{xy} = G_{zx} = 79.6$ GPa, $G_{xy} = 50.9$ GPa |

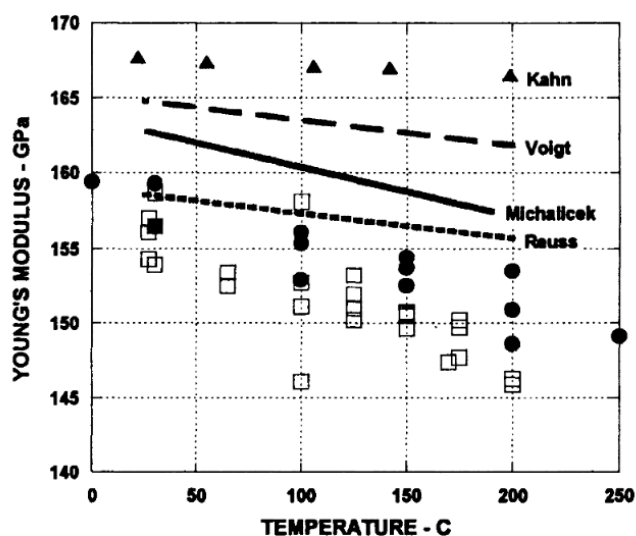


Figure II.39 Module de Young en fonction de la température selon les mesures de [Sha-01], [Mic-95], [Kah-98], [Met-70]

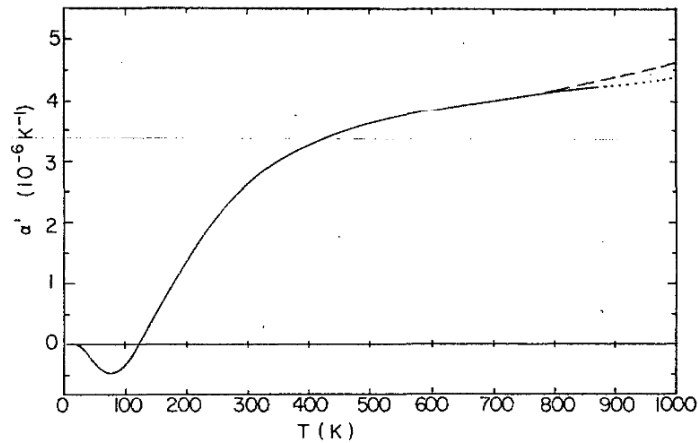


Figure II.10 Coefficient de dilatation thermique du silicium en fonction de la température [Swe-09]

Mais dans une optique de simplification, les simulations seront menées avec des valeurs caractéristiques indépendantes de la température résumées dans le tableau II.6 en considérant le silicium comme un matériau monocristallin comme linéaire élastique mais anisotrope.

Tableau II-6 Propriétés générales du silicium

| Module de Young E (GPa) | Module de cisaillement (GPa) | Coefficient de dilatation thermique (ppm/°C) |
|-------------------------|------------------------------|--|
| 169 selon le plan 110 | 50,9 selon 110 | 2,6 |
| 130 selon le plan 100 | 79,6 selon 100 | |

II.3.2 Cuivre

Le cuivre est le 29^{ème} élément du tableau périodique des éléments et a pour symbole Cu. Le cuivre est un métal qui appartient à la même famille d'éléments que l'argent et l'or. Il faut observer deux natures de cuivre différentes dans le cadre d'une structure PCB. En effet, le cuivre est présent sous forme de feuilles de cuivre qui correspondent aux couches conductrices présentes dans le circuit multicouche, et sous forme de vias qui sont issus d'une électrodéposition. Or la structure d'assemblage des grains de cuivre va affecter ses propriétés. Il est possible de se référer à de nombreux travaux sur les propriétés du cuivre [Dud-16], [Sal-14], [Son-11], [Civ]. Les figures II.11 et II.12 révèlent certaines de ces disparités mais des valeurs moyennes seront retenues pour les caractéristiques élastiques (cf. Tableau II.7) et plastiques (cf. Tableau II.8) utilisées pour les simulations.

Tableau II-7 Propriétés élastiques du cuivre [Son-11], [Civ]

| | Module de Young E (GPa) | Coefficient de Poisson | Coefficient de dilatation thermique (ppm/°C) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|--|
| Feuille | 110 | 0,34 | 17 |
| Electrodéposition | 110 | 0,34 | 17 |

Tableau II-8 Propriétés plastiques du cuivre électrodéposé [Son-11], [Civ]

| | Stress de Yield (MPa) | Contrainte de rupture (MPa) |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Feuille 23°C | >400 | >430 |
| Feuille 220°C | 140<X<220 | 430 |
| Electrodéposition conventionnelle | 110 | 228 |

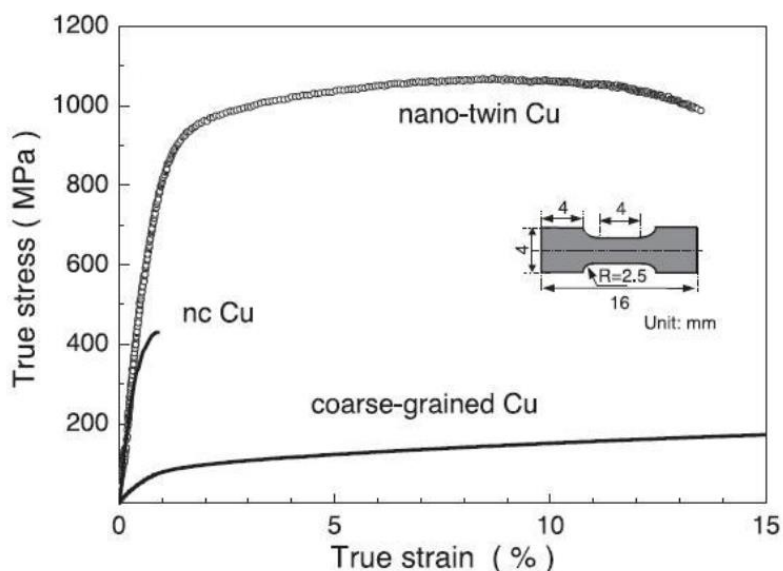


Figure II.11 Courbe de contrainte déformation typique pour du cuivre électrodéposé en nanograin (nano-twin Cu), du cuivre en grains grossiers (coarse-grained Cu) et du cuivre nanocristallin (nc Cu) [Son-11]

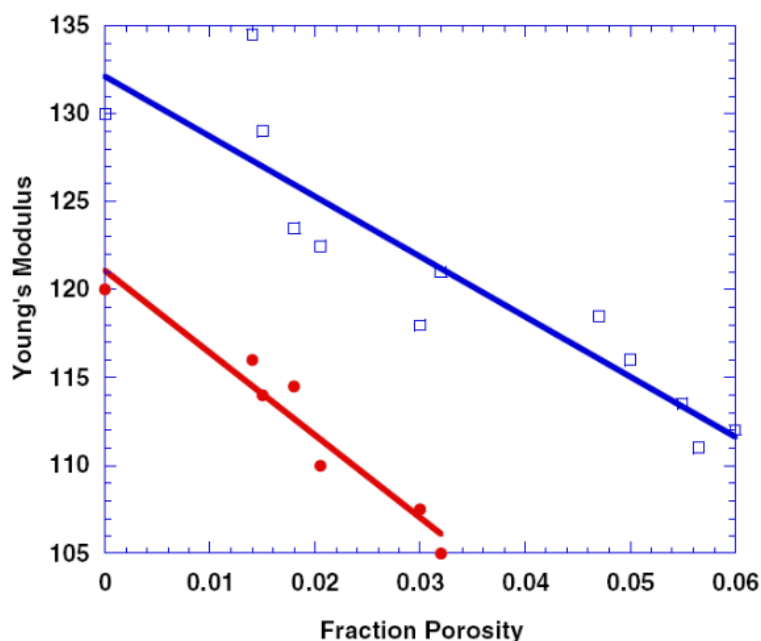


Figure II.12 Module de Young en fonction de la porosité du Cu nanocristallin (rouge) et du Pb nanocristallin (bleu) [Son-11]

Les propriétés mécaniques seront dans le cadre de l'étude considérées comme indépendante de la température. De plus, l'étude de fiabilité portera principalement sur le

cuivre électrodéposé pour les vias des composants enfouis et, par conséquent, ce sont les paramètres plastiques de celui-ci qui seront les plus importants. C'est pourquoi il est nécessaire de définir des paramètres de fatigue pour l'élaboration du modèle. Le modèle choisi reposera sur l'équation de Manson-Coffin-Basquin :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N)^b + \varepsilon'_f \cdot (2N)^c \quad (\text{II.14})$$

Où $\Delta \varepsilon$ est l'amplitude totale de la déformation par cycle

σ'_f est le coefficient de fatigue lié à la résistance

E est le module d'élasticité

b est l'exposant de fatigue lié à la résistance

ε'_f est le coefficient de fatigue lié à la ductilité

c est l'exposant de fatigue lié à la ductilité

N est le nombre de cycles avant rupture

Les considérations sur ces variables seront faites dans le traitement des résultats de simulation où il sera également explicité l'équation II.14. Il existe de nombreuses sources [Fai-17], [Vin-11] qui déterminent les coefficients de cette équation mais elles sont très dépendantes de la nature du cuivre ou de l'alliage considéré ainsi que des méthodes de détermination comme le montre l'étude [Son-11] dans le cas d'un alliage de nickel-cuivre.

II.3.3 Brasure eutectique sans plomb : Sn96,5Ag3Cu0,5

Une partie de l'étude réside dans la comparaison des résultats expérimentaux de durée de vie de différentes interconnexions dans la technologie d'enfouissement. Dans le cadre du projet EDDEMA, les vias ont été préférés aux brasures mais il était important de justifier ce choix. Par conséquent, un matériau de joint de brasure eutectique est mis en avant, l'alliage sans plomb Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5}. La raison du choix de cet alliage repose sur l'expérience de l'équipe acquise via des travaux antérieurs [Che-15]. Le modèle choisi est celui d'Anand qui prend en compte le comportement plastique et viscoplastique de la brasure [Ana-82]. Ce modèle permet la prise en compte de la notion temporelle de la déformation du matériau. Le tableau II.9 explicite les paramètres de ce modèle [Mys-09].

Le modèle d'Anand repose sur trois équations pour le décrire :

- Loi d'écoulements d'Anand :

$$\dot{\varepsilon}_p = A \left[\sinh \left(\xi \frac{\sigma}{s} \right) \right]^{\frac{1}{m}} e^{\left(\frac{-Q}{kT} \right)} \quad (\text{II.15})$$

Où

- ε_p est la déformation plastique
- A est le facteur pré-exponentiel (s^{-1})
- ξ est le terme multiplicatif de la contrainte
- σ est la contrainte équivalente (Pa)
- s est la résistance à la déformation (Pa)
- m est la sensibilité du taux de déformation
- Q est l'énergie d'activation thermique du fluage (J/mol)
- R est la constante de boltzmann (J/mol.K)
- T est la température absolue (K)

- Equations de la résistance à la déformation plastique :

$$\dot{s} = h_0 \left(1 - \frac{s}{s^*}\right)^a \dot{\epsilon}_p \quad (\text{II.16})$$

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{\left(\frac{Q}{kT}\right)} \right]^n \quad (\text{II.17})$$

Où

- s est la résistance à la déformation (MPa)
- s* est la valeur de saturation de s à une température et un taux de déformation donnés
- \dot{s} est la vitesse de résistance à la déformation
- h₀ est la constante d'écrouissage/adoucissement (MPa)
- n est la sensibilité du taux de déformation pour la valeur de saturation de s
- \hat{s} est le coefficient lié au matériau

Tableau II-9 Paramètres du modèle viscoplastique d'Anand pour une brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5}

| Paramètres | Valeurs |
|---|----------------------|
| S ₀ [MPa] Valeur initiale de la résistance à la déformation | 45,9 |
| Q/R [K] Rapport de l'énergie d'activation thermique du fluage sur la constante de Boltzmann | 7460 |
| A [s ⁻¹] Facteur pré-exponentiel | 5,87.10 ⁶ |
| ξ Terme multiplicatif de la contrainte | 2 |
| m Sensibilité du taux de déformation | 0,0942 |
| h ₀ [MPa] Constante de durcissement | 1375,98 |
| s [MPa] Coefficient de la valeur de saturation à la résistance de déformation | 58,3 |
| n Sensibilité du taux de déformation pour la valeur de saturation de s | 0,015 |
| a Taux de sensibilité à l'effort au durcissement | 1,5 |

Le choix de ce modèle repose sur la théorie de comportement mise en place par Darveaux [Dar-00] qui sera exploitée pour la détermination de la durée de vie de brasures en Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5}.

Le modèle d'Anand définit les propriétés viscoplastiques de l'alliage mais n'apporte pas une solution complète pour caractériser le matériau. En ce qui concerne les propriétés élastiques, le module de Young, le coefficient de Poisson et le coefficient de dilatation thermiques utilisés par la suite sont donnés dans le tableau II.10.

Tableau II-10 Propriétés mécaniques élastiques de la brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5} [Mys-09]

| | |
|---|------|
| Module de Young (GPa) | 24,1 |
| Coefficient de Poisson | 0,35 |
| Coefficient de dilatation thermique (ppm/K) | 25 |

II.3.4 Résine époxy et pré-imprégnés

Les matériaux principaux d'un circuit imprimé sont les éléments constitutifs des couches du circuit, les couches cœurs (core en anglais) et les couches de pré-imprégnés (souvent appelées prepreg). Ces couches sont généralement constituées d'une couche de résine époxy et d'éléments de renforcements. La résine époxy est du polyépoxyde ou polymère époxyde, c'est une résine thermodurcissable. Le caractère thermodurcissable du composé implique que l'échauffement du matériau va lier chimiquement les constituants de la couche de façon irréversible. Ce terme s'oppose, par ailleurs, aux résines thermoplastiques qui permettent le recyclage des matériaux puisqu'il est possible de remodeler à nouveau le matériau par échauffement.

Le matériau pour substrat PCB classique de type FR-4 est considéré comme quasi-isotrope transverse dont les propriétés thermomécaniques pour des températures inférieures au Tg sont données dans le tableau II.11.

Un pré-imprégné consiste en un tissage de fibres imprégné dans de la résine époxy. La nomenclature de ce matériau définit le nombre de fibres dans les deux directions ainsi que leur diamètre. La figure II.13 présente quelques exemples de tissage. Dans le cadre de ces travaux de recherche, les couches du circuit électronique seront du pré-imprégné de Hitachi [Hit-16]. Les matériaux sélectionnés sont du modèle E770 de Hitachi et le tableau II.12 présente les propriétés mécaniques de ces matériaux données par le fournisseur. Le cœur quant à lui proviendra de la gamme R1577 de Panasonic [Pan-17] dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau II.13.

Tableau II-11 Propriétés thermomécanique du PCB FR-4 « classique » [Mul-14]

| PCB | | | |
|---|-----------|-------|------|
| Module de Young (GPa) | Direction | | |
| | x | y | z |
| | 22,4 | 22,4 | 1,6 |
| Coefficient de dilatation thermique (ppm/K) | x | y | z |
| | 15,9 | 19,1 | 80,5 |
| Coefficient de Poisson | xy | yz | xz |
| | 0,143 | 0,143 | 0,02 |
| Module de cisaillement (MPa) | xy | yz | xz |
| | 199 | 199 | 600 |
| Température de transition vitreuse (°C) | 135 | | |

Tableau II-12 Propriétés des pré-impregnés de Hitachi envisagés [Hit-16]

| Propriétés | MCL-E-700G | | | MCL-E-770G Type LH | | |
|---|------------|------|-----|--------------------|------|-----|
| | x et y | z | | x et y | z | |
| | | < Tg | >Tg | | <Tg | >Tg |
| Coefficient de dilatation thermique (ppm/K) | 8 | 20 | 110 | 1,8 | 10,5 | 80 |
| Module de Flexion (GPa) | 33 | - | | 31 | - | |
| Coefficient de Poisson | 0,19 | | | 0,19 | | |
| Tg (°C) | 260 | | | 270 | | |

Tableau II-13 Propriétés du cœur R-1577 de Panasonic [Pan-17]

| Propriétés | Panasonic R-1577 | | |
|---|------------------|------|-----|
| | x et y | z | |
| | | < Tg | >Tg |
| Coefficient de dilatation thermique (ppm/K) | 15 | 34 | 200 |
| Module de Flexion (GPa) | 23 | | |
| Coefficient de Poisson | 0,19 | | |
| Tg (°C) | 170 | | |

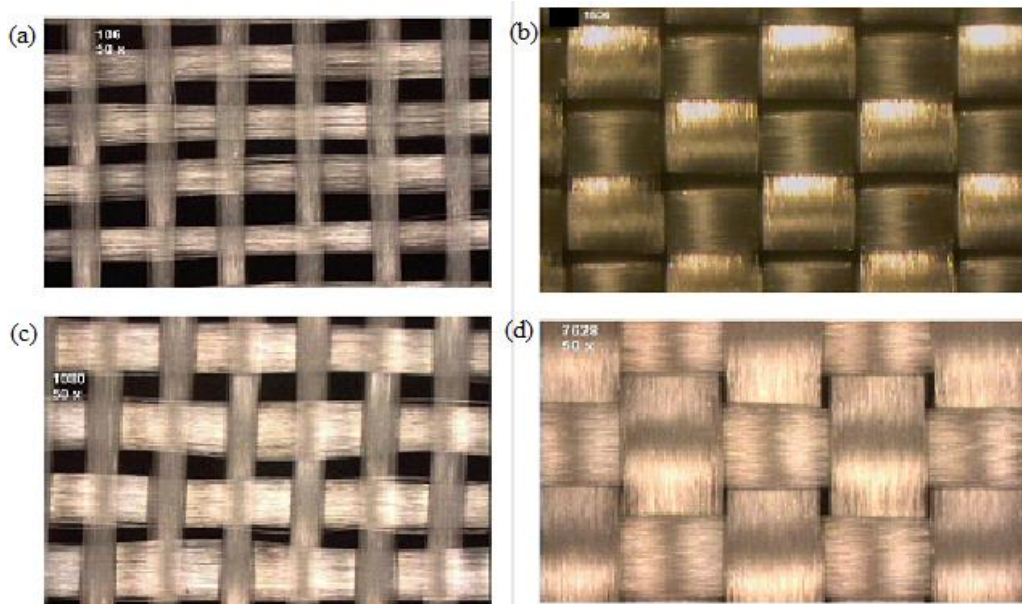


Figure II.13 Exemple de pré-impregné [Tut]

- (a) 106, 56x56, épaisseur : 0,038mm
- (b) 1506, 46x45, épaisseur : 0,140mm
- (c) 1080, 60x47, épaisseur : 0,064mm
- (d) 7628, 44x32, épaisseur : 0,173mm

La méconnaissance de ces matériaux en dehors des données fournisseurs et la nécessité de connaître leurs comportements plastiques ont amené à réaliser des essais de traction sur différents matériaux.

L'objectif de l'étude de ces trois empilages est la possibilité de caractériser une couche équivalente à la place de l'empilage réel. Le tableau II.14 présente les résultats à température

ambiante des essais de traction réalisés sur les échantillons et les assemblages fabriqués par AT&S à l'aide d'un extensomètre optique AVE2 de la marque INSTRON. La figure II.14 caractérise le type d'empilage demandé à AT&S :

- 10cm de long
- 2cm de large
- 3 empilages : matériau nu, une couche de cuivre laminée de 30 μ m ou 2 deux couches laminées de cuivre de 30 μ m chacune

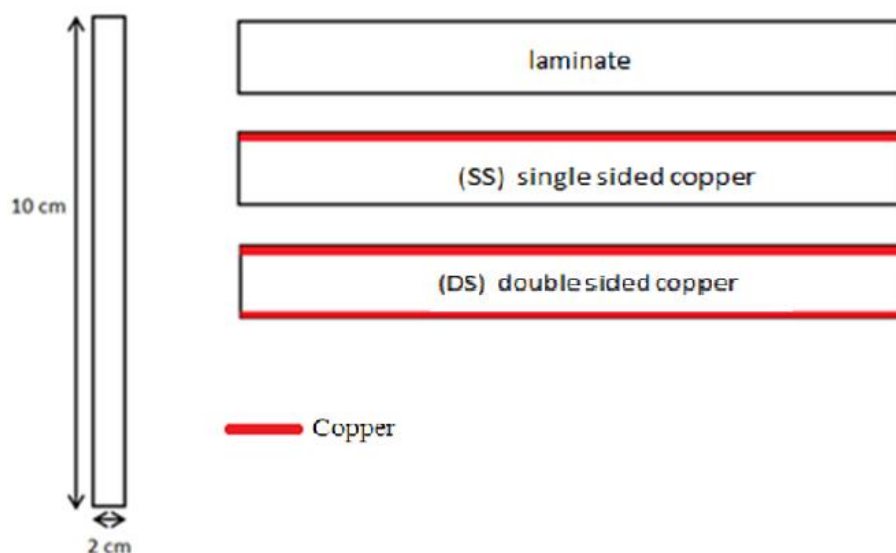


Figure II.14 Caractéristiques et descriptions de l'empilage des échantillons pour les essais de traction fabriqués par AT&S

La figure II.15 compare les résultats des essais de traction de deux tissages de MCL-E-770G et le cœur R1577 alors que la figure II.16 compare les résultats entre les assemblages d'un unique tissage. Il apparaît déjà des différences entre les modules de flexion donnés par les fournisseurs et les résultats expérimentaux, ce qui atteste de l'anisotropie du matériau.

De plus, la figure II.15 met en avant que le cœur R1577 est plus malléable (module de Young $E \sim 26$ GPa et limite d'élasticité supérieurs) que le pré-imprégné 1037 ($E \sim 23$ GPa) qui est lui-même plus malléable que le pré-imprégné 1080 ($E \sim 21,1$ GPa). A l'opposé, le pré-imprégné 1080 est plus résistant à la rupture que le 1037 qui est lui-même plus résistant que le R1577.

La figure II.16 démontre que l'ajout de couche de cuivre améliore les caractéristiques mécaniques de la structure. L'empilage gagne en élasticité, le module de Young augmente, et en résistance, la structure rompt à une plus grande déformation. Dans le cas du core R1557, le module de Young de la couche seule est de l'ordre de 26GPa et passe à 31,8GPa avec une couche de cuivre laminée et à 33,3GPa avec deux couches de cuivre laminées. Quant à la rupture, celle-ci se produit pour une élongation d'environ 1,62% et une contrainte de 720MPa pour le core R1557 seul. Cette limite passe à 900MPa pour une élongation de 1,97% avec une couche de cuivre laminée et à 1200MPa pour une élongation de 2,4% pour deux couches de cuivre laminées.

Tableau II-14 Bilan des résultats de traction sur 9 échantillons

| Matériau | Type | Résultats | | Photos et caractéristiques des échantillons |
|--------------------------|--------------|-----------------|---|---|
| | | Nombre d'essais | Module de Young déterminé à T_{amb} (GPa) | |
| Prepreg 1037 GEA-770G | Stratifié | 5 | 23,1 |  |
| | 1 couche Cu | 5 | 28,7 | |
| | 2 couches Cu | 6 | 34,8 | |
| Prepreg 1080 GEA-770G | Stratifié | 6 | 21,1 |  |
| | 1 couche Cu | 5 | 26,4 | |
| | 2 couches Cu | 6 | 27,8 | |
| Core 150μm R1577 | Stratifié | 6 | 25,1 |  |
| | 1 couche Cu | 5 | 31,8 | |
| | 2 couches Cu | 6 | 33,3 | |

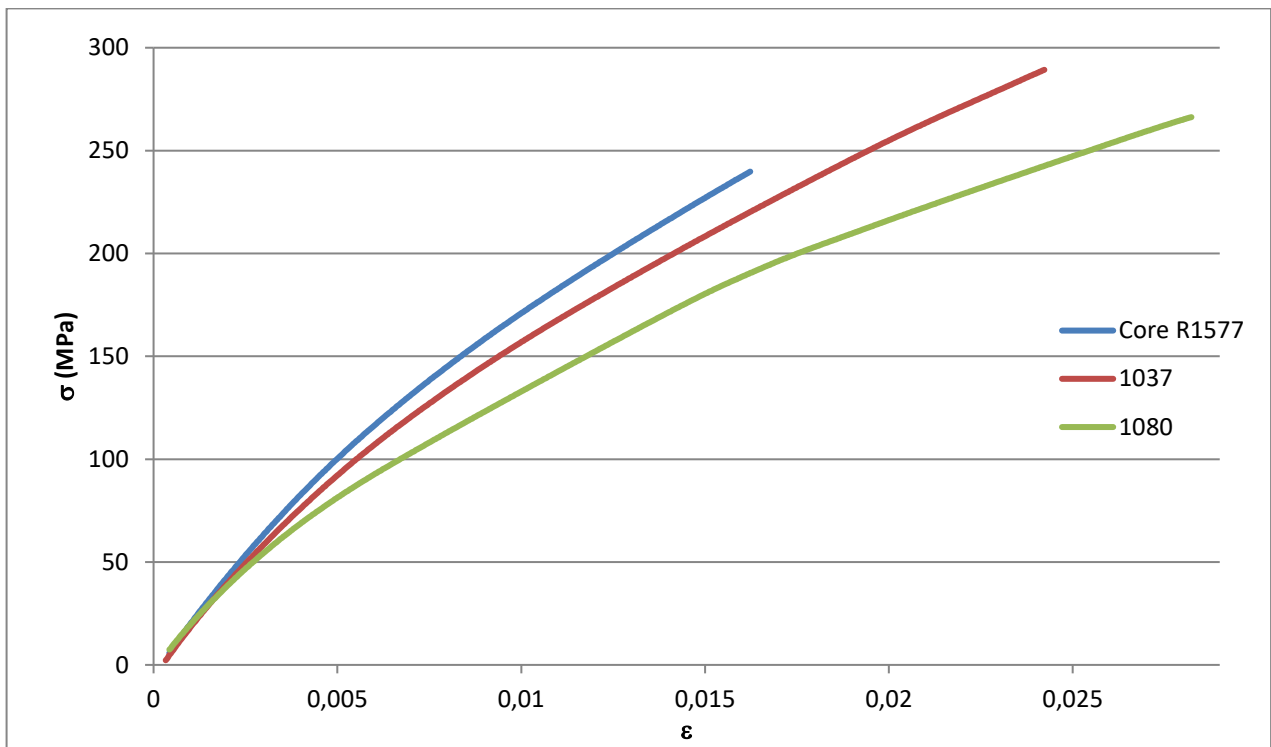


Figure II.15 Courbes moyennes contraintes-déformations des trois matériaux

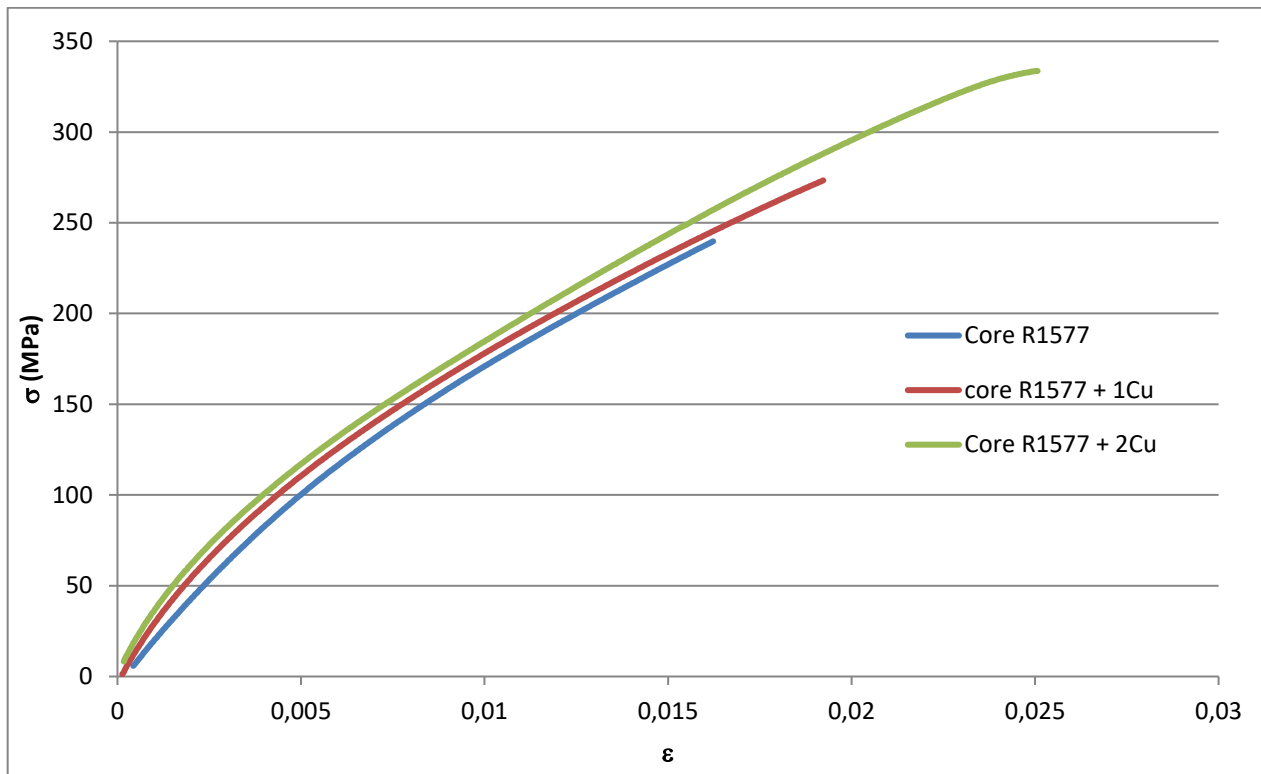


Figure II.16 Courbes moyennes contraintes-déformations du cœur R1577 pour les trois empilages

Enfin la figure II.17 permet une comparaison en température des résultats d'un même tissage pour un assemblage donné. Les mesures en température ont été réalisées avec un extensomètre mécanique de type clip-on de la marque INSTRON (réf. 2630-101) à cause de

l'enceinte fermée pour élever la température. A cause des faibles épaisseurs des échantillons et des vibrations dues au système de chauffage les mesures sont bien plus incertaines (des variations de l'ordre du micromètre). Il se dégage tout de même une tendance traduisant l'augmentation du module de Young et des limites d'élasticité et de rupture avec la température. L'annexe 1 décrit plus précisément la méthode de mesure et le traitement des résultats des essais de traction.

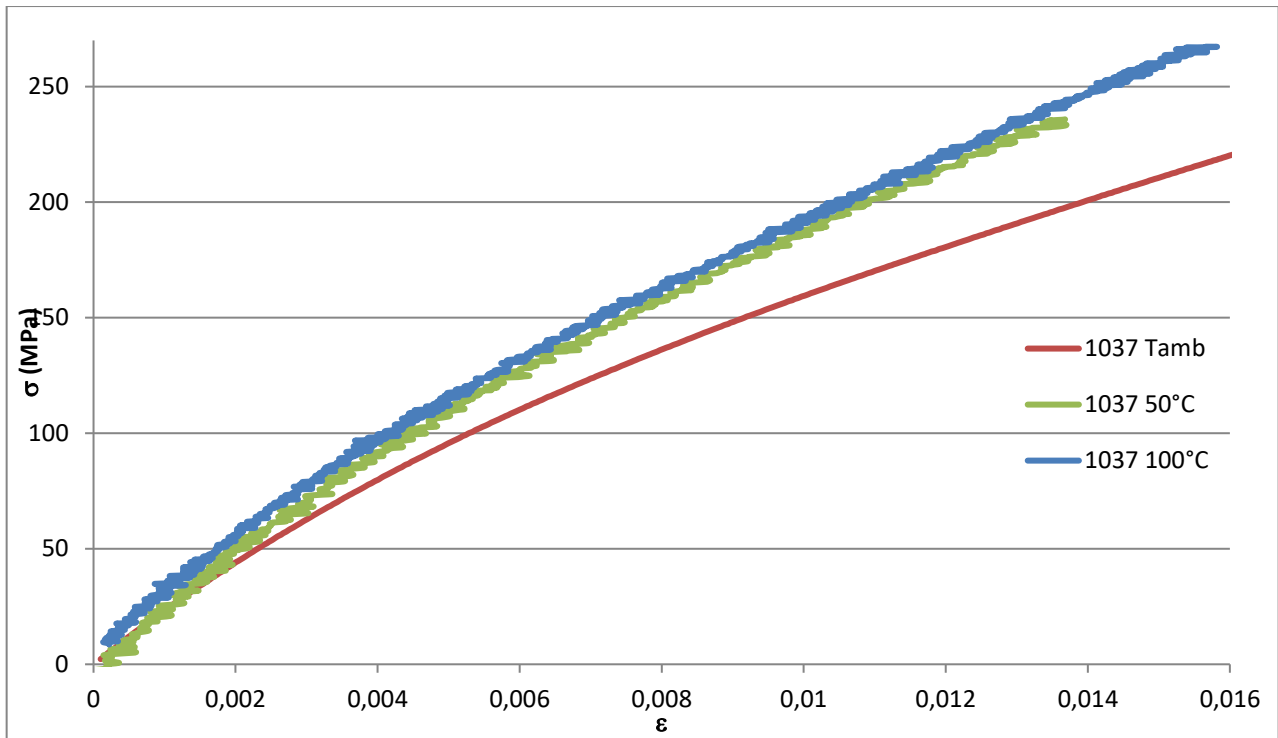


Figure II.17 Courbes moyennes contraintes-déformations selon la température

Le principe de la technologie d'enfouissement repose sur la diffusion de la résine époxy qui vient combler le vide de la cavité autour du composant. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques thermomécaniques de cette dernière au sein de la cavité. Le tableau II.14 relate les propriétés élastiques et le coefficient de dilatation thermique selon la température d'après l'étude menée dans [Mac-14].

Tableau II-15 Propriétés élastiques et coefficient de dilatation thermique de la résine époxy en fonction de la température [Mac-14]

| Température (°C) | Module de Young (GPa) | Coefficient de Poisson | Coefficient de dilatation thermique (ppm/K) |
|------------------|-----------------------|------------------------|---|
| -50 | 7,1 | 0,4 | 55 |
| 25 | 6,6 | | |
| 100 | 3,3 | | |
| 150 | 1,6 | | |
| 177 | | | |
| 178 | | | |
| 200 | | 250 | |

II.4 Modèles pour les simulations

II.4.1 Problématique

La conception d'un assemblage électronique commercialisable passe par un grand nombre d'étapes dont l'étude de fiabilité par prototypage et tests des composants. Cette méthode entraîne un coût forfaitaire et temporel certain, d'autant plus que les exigences de robustesse des circuits sont toujours revues à la hausse. Avec le développement de l'informatique et de la puissance de calcul, l'exploitation d'analyses traitées par des logiciels de calculs par éléments finis d'architectures complexes peut apporter une expertise supplémentaire et un gain de temps donc de coût.

Les simulations mises en place au cours de ces travaux ont trois objectifs : démontrer l'intérêt du choix des matériaux et des techniques de fabrication, établir l'influence du positionnement des composants enfouis et estimer certains critères de fiabilité. Par conséquent, la modélisation se fera à différents niveaux structurels. Les composants enfouis seront étudiés indépendamment puis communément dans la couche d'accueil et enfin dans la structure complète. La figure II.18 présente simplement l'architecture à modéliser initialement prévue dans le cadre du projet EDDEMA. Les détails sur le prototype et les composants seront précisés dans les chapitres suivants.

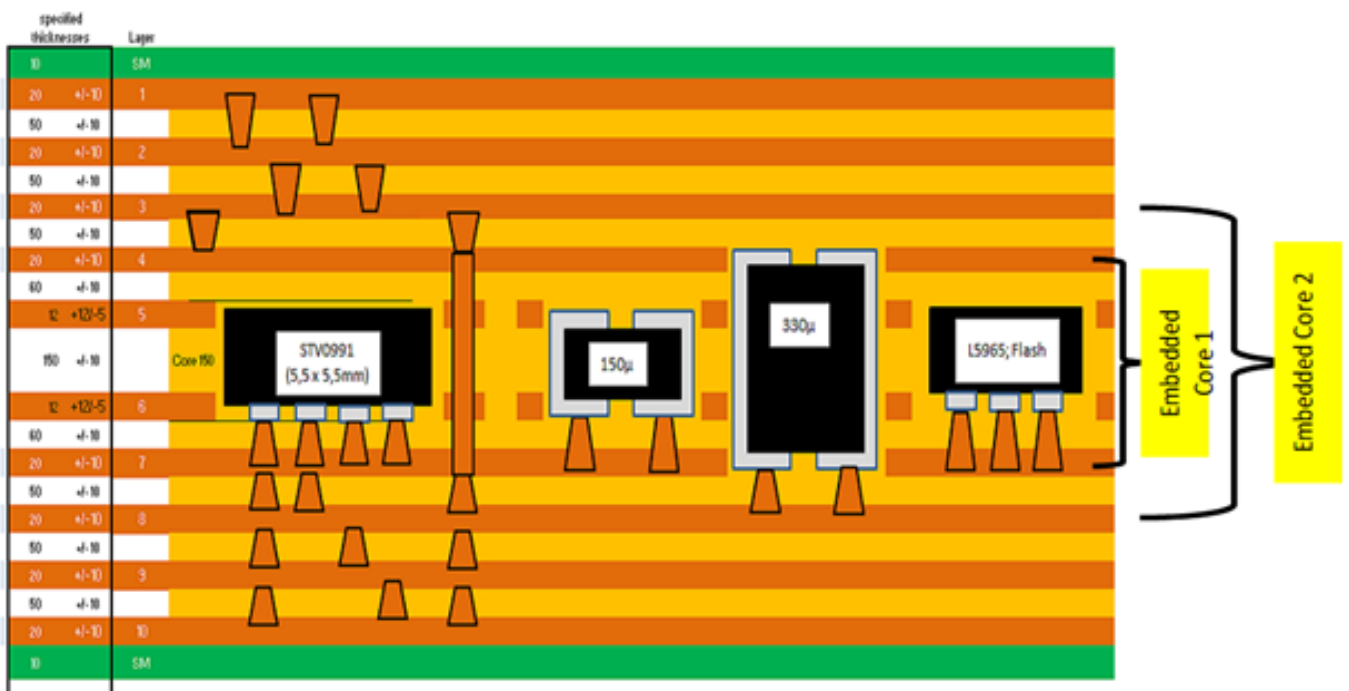


Figure II.18 Composition des couches du prototype (10 couches) réalisé dans le cadre du projet EDDEMA 3 composants actifs (STV, L5965 et Flash) et des capacités de 150µm et 330µm

La simulation par éléments finis requiert la réalisation d'un maillage de la structure, qui correspond à la décomposition en petits éléments de volume. La taille de certains constituants, notamment les microvias, nécessite d'affiner le maillage localement tout en respectant une progression dans la variation de volume des éléments. Ces contraintes imposent, au vu du nombre de composants et d'interconnexions enfouis, un nombre très

important d'éléments augmentant les ressources nécessaires pour les calculs. La figure II.19 est un exemple d'un maillage d'un via en 3D comportant 6800 éléments pour 30000 nœuds. L'étude sera progressive et proposera des résultats par blocs d'études.

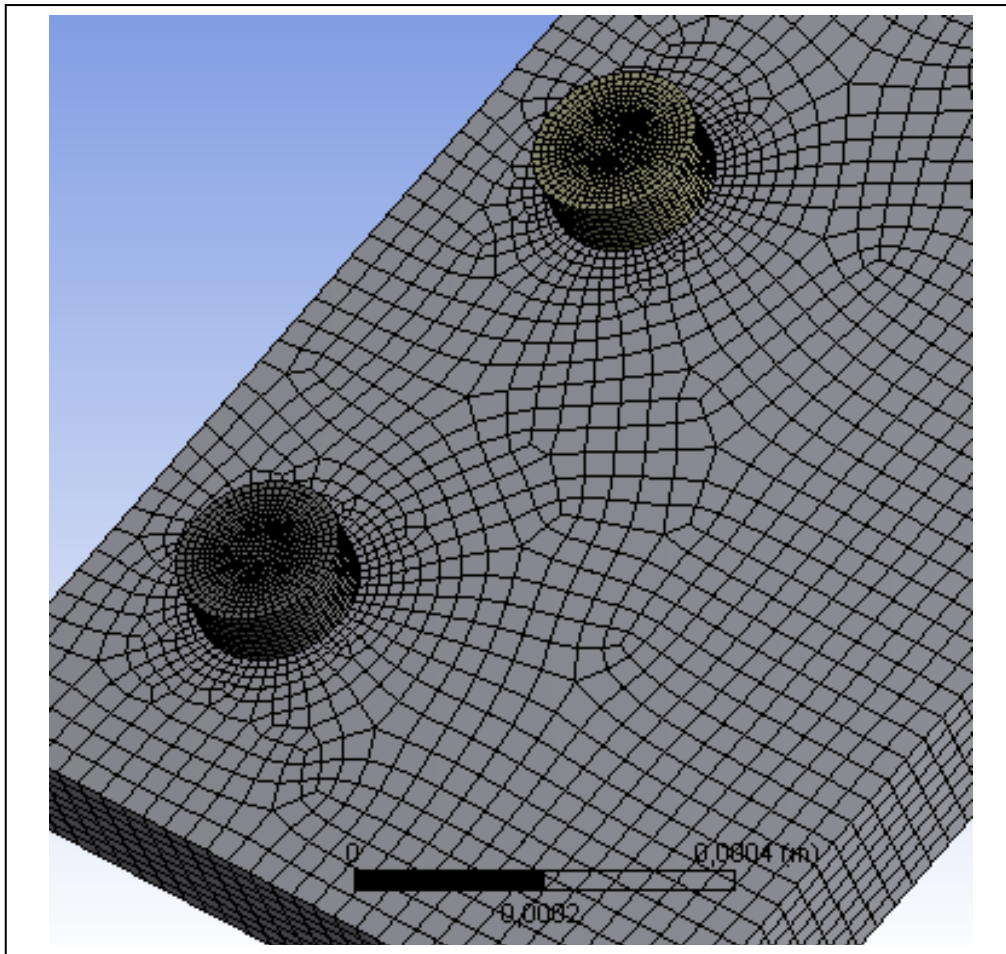


Figure II.19 Exemple de maillage sur des vias 3D sous un composant Flash

De nombreuses possibilités de modélisations et de simplifications existent dans la littérature.

II.4.2 Modélisation 2D

Il existe de nombreux exemples de modélisation 2D d'assemblages ou d'interconnexions [Che-06], [Jia-15], [Kpo-16], [Bil-12]. Cette modélisation permet une estimation simple des tendances dans l'architecture et permet notamment l'estimation de la déformation (et notamment le fléchissement des composants) et des contraintes dans les axes du plan sélectionné. La figure II.20 illustre un exemple d'une modélisation en 2D ainsi que le type de maillage réalisé. La modélisation 2D est bien moins contraignante quant aux limites de calcul que la modélisation 3D (temps de calcul, espace de stockage, complexité des équations).

Un modèle 2D permet des calculs avec un nombre raisonnable d'éléments fournissant une base à l'étude de fiabilité. Il est possible de réaliser des modèles structurellement complexes (avec un grand nombre d'interconnexions et/ou de couches par exemple).

Malheureusement, ce modèle se cantonne au plan et interdit des déplacements en ne fournissant que peu de degrés de liberté aux nœuds du maillage. Une partie de l'information est donc perdue dans les tenseurs de contraintes et déformation, limitant l'interprétation des résultats. La suite logique est donc de réaliser un modèle en trois dimensions pour représenter tout l'espace.

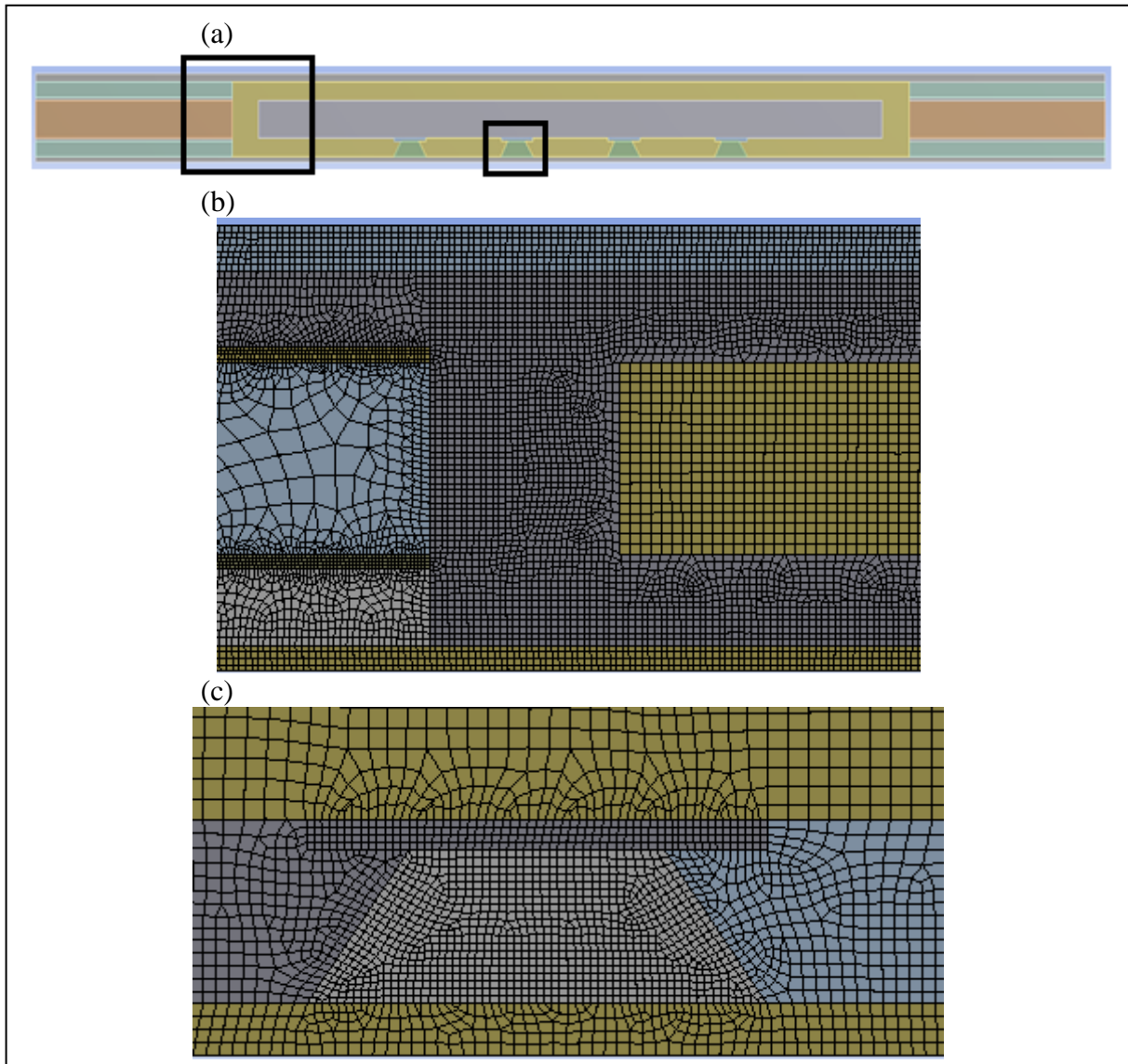


Figure II.20 Exemple de maillage d'un (a) modèle de composant enfoui 2D :
(b) maillage de la résine entre le composant et la couche cœur et (c) maillage d'un via

II.4.3 Modélisation 3D

Les modélisations 3D deviennent de plus en plus courantes dans la littérature [Bel-14], [Lig-09], [Zhi-15]. L'avantage de la modélisation 3D est la description complète de l'assemblage. L'interprétation est plus juste même si elle reste dépendante de la définition des matériaux et du maillage. Les règles de maillage restent les mêmes qu'en 2D avec la nécessité d'un maillage plus fin dans les zones d'intérêt. Mais il devient indispensable d'exploiter au maximum les symétries de la structure pour réduire autant que possible le nombre d'éléments (et le temps de calcul !). En effet, les calculs sont très rapidement limités par le nombre

d'éléments, ce qui peut être une contrainte forte d'autant que la modélisation de la résine limite le maillage. La figure II.21 est un exemple de composant enfoui et avec ses interconnexions modélisées en trois dimensions avec et sans résine autour.

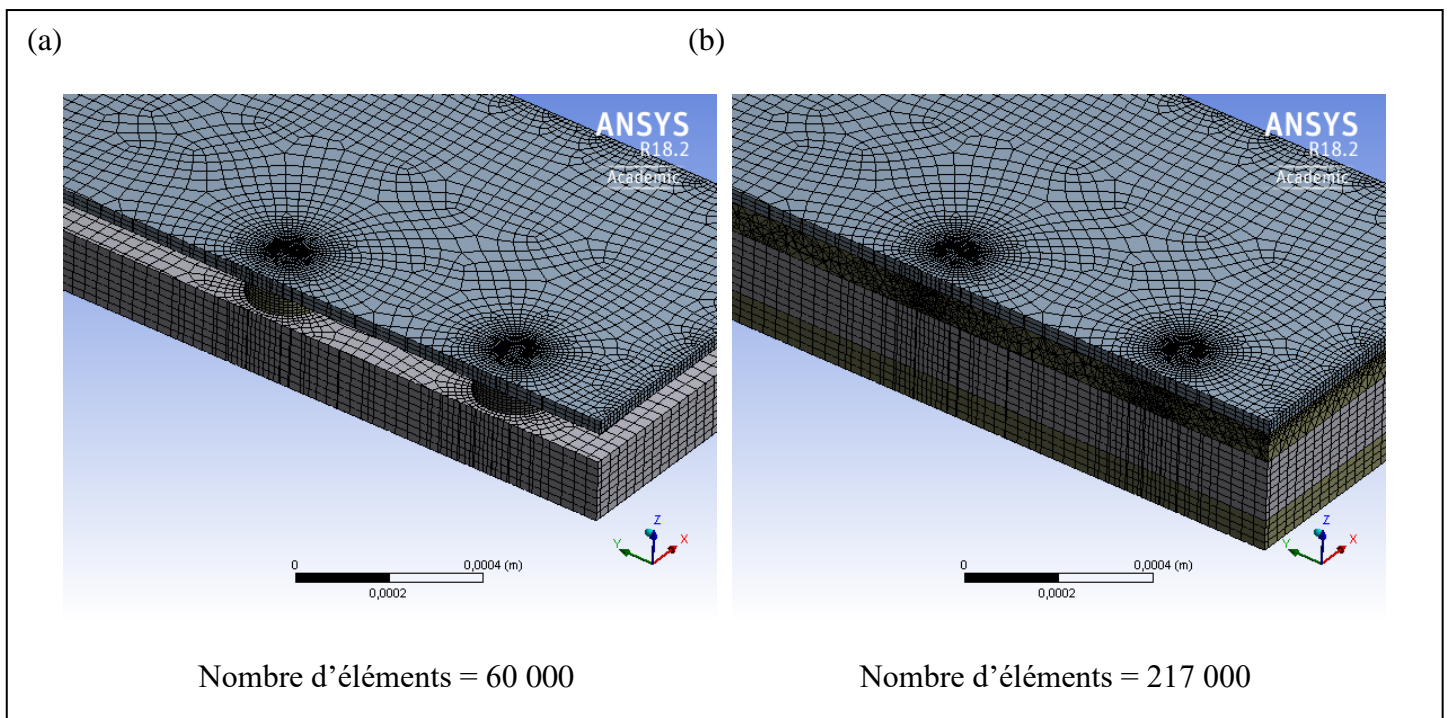


Figure II.21 Exemple d'un maillage simple sur une structure 3D (a) sans résine autour du composant (b) avec résine autour du composant

Les limitations matérielles pour le calcul imposent de soit limiter l'étude à des composants isolés avec peu d'interconnexions, soit d'effectuer des simplifications de modèles. La modélisation d'un circuit réel avec l'ensemble de ses constituants demanderait un nombre bien trop important d'éléments. Il devient alors nécessaire de revoir les critères de modélisation. Evidemment, la simplification dans le cadre de la modélisation de la structure est possible. Ignorer certains éléments est un exemple mais il existe d'autres solutions.

II.4.4 Simplification du modèle 3D : réduction du nombre d'éléments

Dans un objectif de réduire le nombre d'éléments, il est nécessaire de produire différentes manières de modéliser un ensemble. Les méthodes utilisées sont le développement de sous-structure (substructuring), le développement de modèle intermédiaire (submodeling) et l'homogénéisation par éléments finis qui consiste à regrouper, selon certaines conditions, des objets de natures différentes ensemble.

Le principe d'un modèle avec des sous-structures est de compiler un grand nombre d'éléments en un seul sur les bases de la réponse linéaire de cette sous-structure (cf. Figure II.22). Le principe se base sur une réponse locale reportée sur une structure globale. Cette méthode a l'avantage de permettre de dupliquer une matrice de raideur de sous-structure en fonction des besoins, notamment dans le cas de la répétition de cette sous-structure comme cela est le cas pour les interconnexions. Mais elle n'est applicable que dans le domaine linéaire.

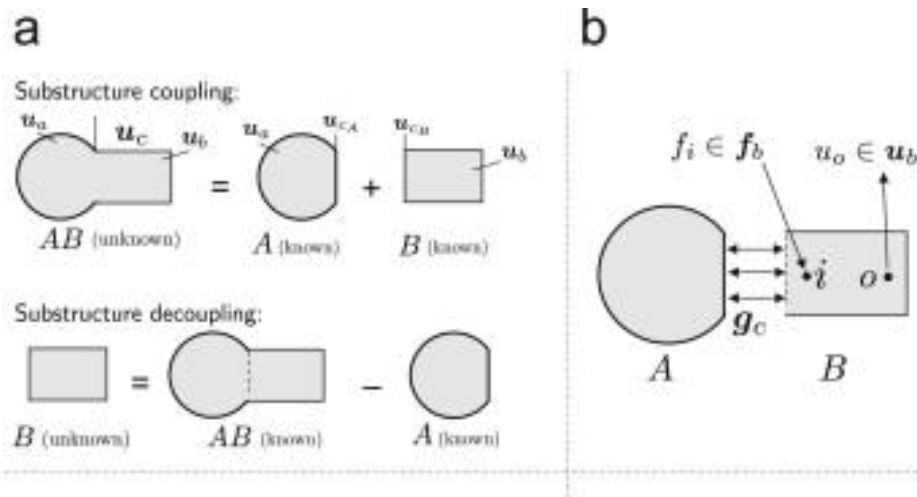


Figure II.22 Illustration du principe de modèles avec sous-structures [Voo-12]

A l'inverse, le principe de sous-modèle repose sur la réponse d'un modèle large au maillage grossier pour implémenter les conditions aux limites pour un sous-modèle au maillage fin. Le sous-modèle peut être appliqué au composant et son environnement proche dans le circuit global ou aux interconnexions lorsque seul le composant est considéré par exemple. La figure II.23 illustre ce second cas dans un modèle 2D. Cette technique prend en considération la non-linéarité de la réponse.

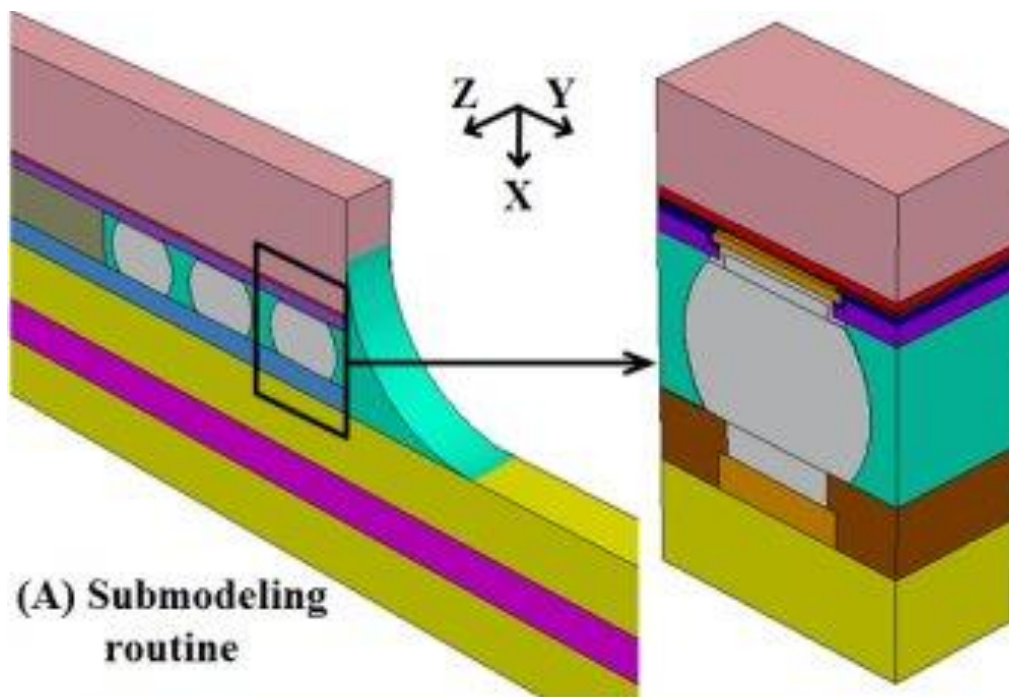


Figure II.23 Principe de sous-modèle [Ram-14]

Enfin la troisième méthode repose sur l'homogénéisation par éléments finis de structures complexes. L'homogénéisation cherche à développer un modèle équivalent homogène à une structure présentant des disparités locales. La figure II.24 présente le principe appliqué à un matériau réel hétérogène tel que peut l'être une couche de cœur ou de pré-impregné, remplacé par un matériau homogène équivalent. En effet les matériaux composites

qui sont courants dans la structure d'un circuit électronique, se composent d'un matériau matriciel et d'un matériau de renfort dont les propriétés sont différentes. Par conséquent, localement, la structure présente un comportement propre au matériau avec des interactions entre les matériaux. Pour que la solution du modèle soit représentative il est nécessaire que le maillage soit suffisamment fin, ce qui est déterminé par la longueur caractéristique des hétérogénéités. En développant un modèle équivalent par homogénéisation, cette contrainte de maillage fin se limite à la longueur caractéristique de la couche. Cela entraîne une réduction du nombre d'éléments, réduisant les besoins pour les calculs. L'inconvénient est la nécessité de caractériser les 9 constantes globales de la matrice des rigidités (3 modules de Young, 3 coefficients de Poisson et 3 modules de cisaillement), ce qui représente 6 tests (3 tractions et 3 cisaillements ou 3 torsions). Un test a besoin d'au minimum 3 essais pour définir une constante. De plus, le matériau a le besoin d'être caractérisé en température, donc les tests doivent être menés pour différents points de température.

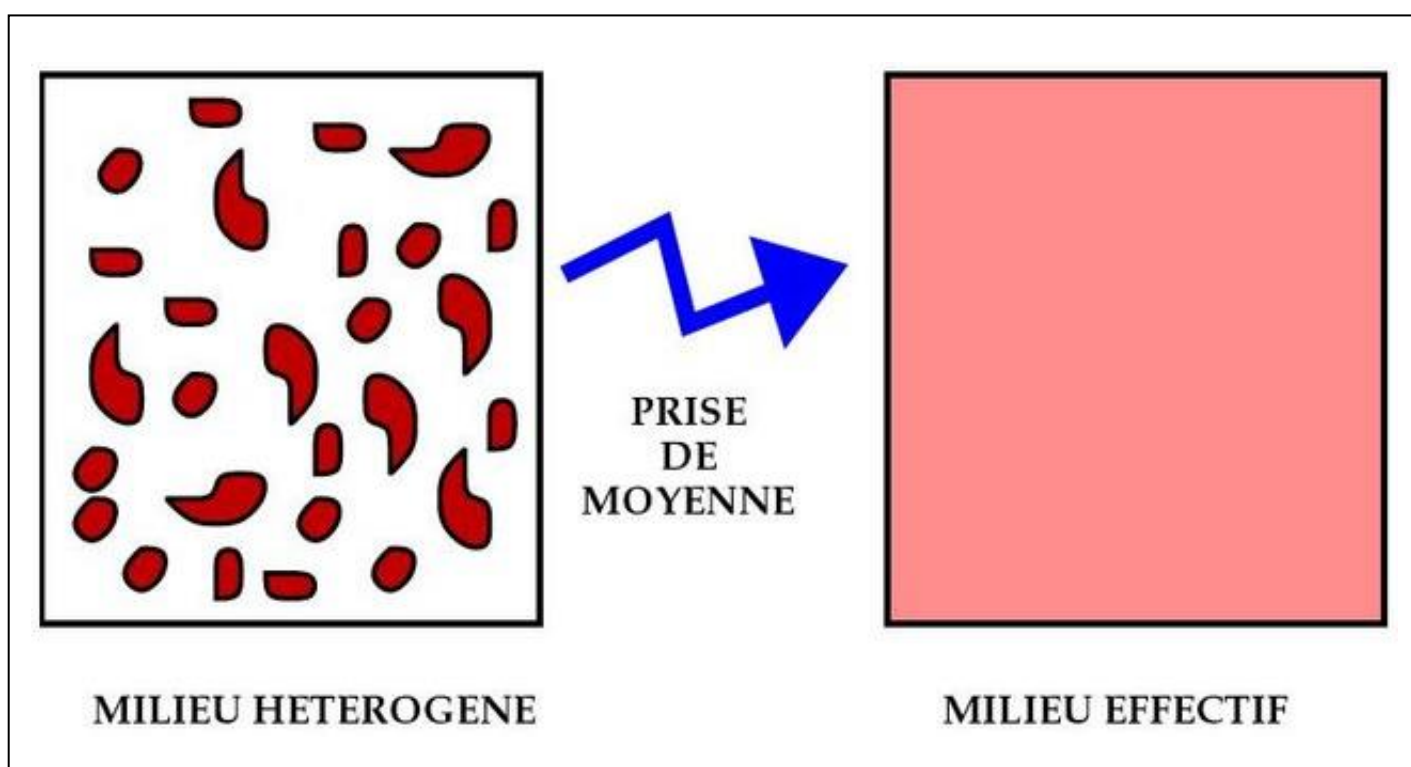


Figure II.24 Principe de l'homogénéisation [Ait-99]

II.5 Conclusion

La réalisation de modèle numérique implique de définir précisément les propriétés thermomécaniques des matériaux constituant la structure. Comprendre les comportements thermomécaniques et les représenter voir les simplifier étaient une première nécessité avant d'utiliser ces généralités pour établir les fiches de propriétés des matériaux utilisés. Plusieurs voies sont possibles : disposer des moyens adéquats pour réaliser des mesures sur l'ensemble des matériaux et dans diverses conditions, se rattacher à la littérature offrant un large panel de caractérisations, ou respecter les données fournies par le fournisseur lorsqu'elles représentent

la seule source disponible. Ne disposant pas des moyens pour réaliser une caractérisation complète de l'ensemble des matériaux, nous avons fait le choix de sélectionner les propriétés des matériaux en fonction des sources disponibles en considérant différents critères selon les matériaux. Ainsi, les matériaux « génériques » comme le silicium, les feuilles de cuivre ou la résine sont définis grâce à une moyenne des données de la littérature tandis que le prepreg est défini par les données fournisseurs. Les propriétés du cuivre des vias seront sélectionnées dans le chapitre 3 à partir de la littérature dans l'optique d'obtenir l'estimation la plus « critique » possible. Le tableau II.15 récapitule les données prises en compte dans les simulations.

Tableau II-16 Bilan des propriétés principales retenues pour les simulations pour les différents matériaux des assemblages

| Matériaux | Module de Young (GPA) | Coefficient de Poisson | CTE (ppm/°) | T _g (°C) | Remarques |
|-------------------|-----------------------|------------------------|----------------|---------------------|-------------------------------|
| Silicium [Hop-09] | 169/130 | 0,3/0,69 | 2,6 | | |
| Cuivre [Civ] | 110 | 0,34 | 17 | | Modèle de Coffin-Manson |
| Brasure [Mys-09] | 24,1 | 0,35 | 25 | | Modèle viscoplastique d'Anand |
| Résine [Mul-14] | 22,4/22,4/1,6 | 0,02/0,143/0,143 | 15,9/19,1/80,5 | 135 | Matrice des rigidités |
| Prepreg [Pan-17] | 23 | 0,19 | 15/15/34 | 170 | |

Dans le chapitre suivant, les modélisation 3D et 2D des composants seront confrontées pour évaluer la pertinence des deux modèles et les restrictions qu'ils imposent. Ensuite, pour évaluer le circuit en entier, le principe de sous-modèle sera utilisé, notamment pour déterminer l'impact de la structure sur les vias. L'homogénéisation sera limitée à l'étude générale du circuit pour remplacer les cavités et la représentation de l'empilage des différentes couches.

Afin d'évaluer la fiabilité des interconnexions des composants actifs enfouis et de déterminer le gain par rapport aux techniques traditionnelles, une méthode de modélisation est sélectionnée limitant, dans un premier temps, l'étude à la cavité accueillant le composant.

II.6 Références bibliographiques

- [Ait-99] V.R. AITHARAJU, R.C. AVERILL, Three-Dimensional Properties Of Woven-Fabric Composites, Composites Science and Technology, Volume 59, Pages 1901-1911, (1999)
- [Ana-82] Anand, L, “Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures”, Transaction of the ASME 104, 12-17, 1982
- [Bao-16] Sheng Bao, Maili Fu, Y. Gu, Shengnan Hu, « Evolution of the Piezomagnetic Field of Ferromagnetic Steels Subjected to Cyclic Tensile Stress with Variable Amplitudes”, Journal : Experimental Mechanics, Février 2016, DOI: 10.1007/s11340-016-0147-0
- [Bel-14] S. Belhenini, A. Tougui, A. Bouchou, R. Mohan, and F. Dosseul, “3D FEM Simulations of Drop Test Reliability on 3D-WLP: Effects of Solder Reflow Residual Stress and Molding Resin Parameters,” J. Electron. Mater., vol. 43, no. 3, pp. 708–716, Jan. 2014.
- [Bie-95] M. Biebl, T. Scheiter, C. Hierold, H. V. Philipsborn, H. Klose, 1995, “Micromechanics Compatible with an 0.8mm CMOS Process,” Sensors and Actuators A, 46-47, pp.593-597.
- [Bil-12] Bilim Atli-Veltin, Huang Ling, Susan Zhao, Sander Noijen, Jo Caers, Liu Weifeng, Gao Feng, Ye Yuming, “Thermo-Mechanical Investigation of the Reliability of Embedded Components in PCBs During Processing and Under Bending Loading”, 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2012, 978-1-4673-1513-5/12/\$31.00 ©2012 IEEE
- [Cal-07] W. D Callister Jr. Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition. John Wiley & Sons. (2006)
- [Cau-22] A.L. Cauchy, (1822) Memoir, communicated to Paris Academy
- [Cha] Jean-Claude Charmet, « Mécanique du solide et des matériaux, Elasticité-Plasticité-Rupture », ESPCI - Laboratoire d’Hydrodynamique et Mécanique Physique, <https://cours.espci.fr/site.php?id=318&fileid=1242>
- [Civ] Civen Metal product, available: https://www.civen-inc.com/products/page/3/?gclid=Cj0KCQIAj4biBRC-ARIsAA4WaFh1xSYUfhVw9tFFrfrjIMHY7_1FUH1xp_wOTRIPwgVQ0WSh39tmVjIaAvF4EALw_wcB
- [Che-88] Y. Chevalier, “Comportements élastique et viscoélastique des composites,” Tech. l’Ingénieur, vol. A 7750, 1988.
- [Che-06] S. C. Chen, Y. C. Lin, and C. H. Cheng, “The numerical analysis of strain behavior at the solder joint and interface in a flip chip package,” J. Mater. Process. Technol., vol. 171, pp. 125–131, 2006.

[Che-15] Walide Chenniki, “Evaluation de la fiabilité de boîtiers électroniques QFN à base de nanocomposites LCP/SiO₂ fonctionnalisées », Automatique. Université de Bordeaux, 2015. Français. <NNT : 2015BORD0107>. <tel-01230257>

[Dar-00] Darveaux R., “Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation”, 50th Electronic Components and Technology Conference, 2000

[Dud-16] R. Dudek, R. Döring, M. Hildebrandt, S. Rzepka, S. Stegmeier, S. Kiefl, V. Sommer, G. Mitic, K. Weidner, Analyses of thermo-mechanical reliability issues for power modules designed in planar technology, 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE) 2016, pp. 1–8.

[ENS] “Comportement, endommagement et rupture en fatigue.” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,
http://mms2.ensmp.fr/mat_paris/duree/transparentes/Amphi_Fatigue_2008.pdf

[Fai-17] M. Faiz Harun, R. Mohammed, N. Othman, A. Amrin, S. Chelliapan, N. Maarop, “METHODS FOR ESTIMATING THE FATIGUE PROPERTIES OF UNS C7060 COPPER-NICKEL 90/10”, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Volume 8, Issue 11, November 2017, pp. 413–422, Article ID: IJMET_08_11_046 Available : <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=11> ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359

[For] R. Fortunier, “Comportement Mécanique des Matériaux.” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne,
http://www.emse.fr/~fortunier/cours/Constitutive_Equations/poly.pdf.

[Hil-48] R. Hill. (1948). *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*. Proc. Roy. Soc. London, 193:281–297

[Hit-16] Hitachi products datasheets, 2016, <http://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/bm/>

[Hoo-76] A DESCRIPTION OF HELIOSCOPES, And some other INSTRUMENTS MADE BY ROBERT HOOKE, Fellow of the Royal Society. Hos ego, &c. Sic vos non vobis, LONDON, Printed by T. R. for John Martyn Printer to the Royal Society, at the Bell in St. Pauls Church-yard, 1676.

[Hop-09] Matthew A Hopcroft, W.D. Nix, Thomas W. Kenny, “What is the Young's Modulus of Silicon?”, Journal of Microelectromechanical Systems 19(2):pp 229 – 238, IEEE, 2009, DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2039697

[Inj] “Polymers”, Injection Molding Online, Copyright 2007 FIMMTECH INC, Available: <http://injectionmoldingonline.com/Molding101/Polymers.aspx#>

[Jia-15] JIANG Yongjun, TAN Chongfeng, GAO Jian, CHEN Yun, CHEN Xin, YANG Zhijun, HE Yunbo “Finite Element Analysis for the Wire Bonding Process and Impact Force

Variation”, 16th International Conference on Electronic Packaging Technology, 2015, 978-1-4673-7999-1115/\$31.00 ©2015 IEEE

[Kah-96] H. Kahn, S. Stemmer, K. Nandakumar, A. H. Heuer, R. L. Mullen, R. Ballarini, and M. A. Huff, 1996, “Mechanical Properties of Thick, Surface Micromachined Polysilicon Films”, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, San Diego, California, USA, pp 343-353.

[Kah-98] Kahn, H., Huff, M. A., and Heuer, A. H., "Heating Effect on the Young's Modulus of Films Sputtered onto Micromachined Resonators", Materials Research Society Vol. 518, pp. 33-38, 1998.

[Kap-14] Sri Ramakanth Kappaganthu, Aditya Karmarkar, Xiaopeng Xu, Pratheep Balasingam, “Reliability Analysis of Bumping Schemes under Chip Package Interaction”, Conference: IEEE International Interconnect Technology Conference, San Jose, California, Mai 2014, DOI : 10.1109/IITC.2014.6831850

[Kos-93] J. Koskinen, E. Steinwall, R. Soave, and H. H. Johnson, 1993, “Microtensile Testing of Free-Standing Polysilicon Fibers of Various Grain Sizes”, Journal of Micromechanics and Microengineering, 35, pp. 13-17.

[Kpo-16] W. Kpobie and al., “Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components”, Microelectronics Reliability, Volume 65, October 2016, Pages 108-130

[Lig-09] Ligang Niu, D. Yang, Mingjun Zhao, “Study on Thermo-mechanical Reliability of Embedded Chip during Thermal Cycle Loading”, 2009 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP) 978-1-4244-4659-9/09/\$25.00 ©2009 IEEE

[Mac-14] K. Macurova, P. Angerer, R. Schöngrundner, T. Krivec, M. Morianz, T. Antretter, R. Bermejo, M. Pletz, M. Brizoux, W. Maia, Simulation of stress distribution in assembled silicon dies and deflection of printed circuit boards, 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), vol. 1, 2014, pp. 1–7.

[Mai-95] D. Maier-Schneider, J. Maibach, E. Obermeier and D. Schneider, 1995, “Variations in Young’s Modulus and Intrinsic Stress of LPCVD-Polysilicon due to High-Temperature Annealing,” Journal of Micromechanics and Microengineering, 5, pp. 121-124.

[Met-70] Metzger, H. and Kessler, F. R., "Der Debye-Sears Effect zur Bestimmung der Elastischen Konstanten von Silicium", Z. Naturf. A25, 904-906, 1970.

[Mic-95] M. A. Michalick, D. E. Sene, and V. M. Bright, “Advanced Modeling of Micromirror Devices”, 1995, Proceedings of the International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications, NASA & Aerospace Corp. Publication, , pp 214-229.

[Mul-14] Multi-cb, "Standard FR4 datasheet", 2014

[Mys-09] K. Mysore, G. Subbarayan, V. Gupta, et Ron Zhang, « Constitutive and Aging Behavior of Sn3.0Ag0.5Cu Solder Alloy », IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 32, no. 4, p. 221–232, Oct. 2009

[Pan-17] Panasonic products datasheets, 2017
https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/ipcdatasheet_1706_R-1577.pdf

[Poi-11] S. D. Poisson, “Traité de mécanique”, Tome premier, Ecole Polytechnique, Imprimé chez Mme veuve Courcier, imprimeur-libraire pour les mathématiques, Paris 1811.

[Rab-15] Liva Rabemananjara. « Etude de l'influence de la vitesse de déformation sur la réponse à l'indentation des matériaux polymères. Mécanique des matériaux » [physics.class-ph]. Université Rennes 1, 2015.Français. <NNT: 2015REN1S075>. <tel-01285396> Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01285396/document>

[Ray] "Multilayer Printed Circuit Boards - Multilayer PCB with Latest Technology", Rayming PCB & Assembly, Available : <https://www.raypcb.com/multilayer-printed-circuit-boards-multilayer-pcb-with-latest-technology/>

[Rea-96] D. T. Read and J. C. Marshall, 1996, “Measurements of Fracture Strength and Young’s Modulus of Surface-micromachined Polysilicon,” Microlithography and Metrology in Micromachining II, SPIE Vol. 2880, pp 56-63.

[Sal-14] A. Salahouelhadj, M. Martiny, S. Mercier, L. Bodin, D. Manteigas, B. Stephan, Reliability of thermally stressed rigid-flex printed circuit boards for High Density Interconnect applications, Microelectron. Reliab. 54 (1) (2014) 204–213.

[Sha-97] N. W. Sharpe, Jr., B. Yuan, and R. Vaidyanathan, “Measurements of Young’s modulus, poisson's ratio, and tensile strength of polysilicon,” in The Tenth IEEE International Workshop on Microelectromechanical Systems, 1997, pp. 424–429.

[Sha-01] W. N. Sharpe, Jr, M. A. Eby and G. Coles, “Effect of Temperature on Mechanical Properties of Polysilicon”, 11th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Munich, Germany, June 10-14, 2001, Available : https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-59497-7_315.pdf

[Son-11] X. Song, “Microstructure and mechanical properties of electrodeposited copper films”, Thesis, School of Metallurgy and Materials College of Engineering and Physical Sciences The University of Birmingham, 2011

[Swe-09] C. A. Swenson, “Recommended Values for the Thermal Expansivity of Silicon from 0 to 1000 K”, Journal of Physical and Chemical Reference Data 12, 179 (1983); Published Online: 15 October 2009, DOI :<https://doi.org/10.1063/1.555681>

[Tab-89] O. K. Tabata, Kawahata, S. Sugiyama and I. Igarashi,1989, “Mechanical Property Measurements of Thin Filmsusing Load-Deflection of Composite RectangularMembranes,” Sensor and Actuators, 20, pp. 135-141.

[Tai-90] Y.-C. Tai and R.S. Muller, 1990, “Measurement of Young’s Modulus on Microfabricated Structures Using aSurface Profiler,” IEEE Micro Electro MechanicalSystems, pp. 147-152.

[Tut] Tutorial “Understanding the PCB, laminate and prepreg process”, Isola group, http://www.ieca-inc.com/images/Tutorial_Understanding_The_PCB_Laminate_and_Prepreg_Process.pdf
Dernier accès : 20/02/2019

[Tre-64] Tresca, H. (1864). “Mémoire sur l’écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions.” C.R. Acad. Sci. Paris, vol. 59, p. 754.

[Tsa-71] Tsai, S. W. and Wu, E. M. (1971). “A general theory of strength for anisotropic materials.” Journal of Composite Materials.” vol. 5, pp. 58–80.

[Uni-10] Partenaires UNIT, “Fatigue des matériaux et structures.” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, 2010 https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/10226/mod_resource/content/0/Fatigue_papier.pdf

[Vin-11] A. Vinogradov, M. Maruyama, Y. Kaneko, S. Hashimoto, “Effect of dislocation hardening on monotonic and cyclic strength of severely deformed copper”, Philosophical Magazine 2011, 1–24, iFirst ISSN 1478–6435 print/ISSN 1478–6443 online, 2011 Taylor & Francis DOI : <http://dx.doi.org/10.1080/14786435.2011.63069>

[Voo-12] S.N.Voormeeren, D.J.Rixen, “A family of substructure decoupling techniques based on a dual assembly approach”, Mechanical Systems and Signal Processing, [Volume 27](#), February 2012, Pages 379-396, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.07.028>

[Wal-91] J.A. Walker, K.J. Gabriel, and M. Mehregany, 1991, “Mechanical Integrity of Polysilicon Films Exposed to Hydrofluoric Acid Solutions,” Journal of ElectronicMaterials, 20, pp. 665-670.

[You-07] Thomas Young, “A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts”, Volume II, Printed for Joseph Johnson, St. Paul’s church-yard by William Savage, London 1807.

[Zhi-15]GE Zhipeng, WANG Kaikun, DUAN Kaiyue, “Numerical simulation and thermal analysis of PoP Packaging”, 2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology 978-1-4673-7 999-1115/\$31.00 ©IOIS IEEE

Chapitre III

Résultats généraux de simulations locales et complexification progressive

Sommaire

| | |
|---|-----|
| Table des figures : Chapitre III | 98 |
| Table des tableaux : Chapitre III | 100 |
| III.1 Introduction | 102 |
| III.2 Etude de l'assemblage avec des joints de brasure : $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$ | 102 |
| III.2.1 Méthodologie de Darveaux | 104 |
| III.2.2 Influence du maillage et considérations géométriques | 108 |
| III.2.3 Influence de l'enfouissement du composant | 110 |
| III.3 Etude 2D de l'assemblage avec des vias | 112 |
| III.3.1 Méthodologie de Manson-Coffin-Basquin..... | 113 |
| III.3.2 Résultats de simulation..... | 116 |
| III.4 Etude 3D de l'assemblage avec des vias | 126 |
| III.4.1 Résultats de simulation..... | 127 |
| III.4.2 Bilan comparatif : via 3D, via 2D et brasure..... | 133 |
| III.5 Résultats complémentaires | 135 |
| III.6 Conclusion..... | 139 |
| III.7 Références bibliographiques | 140 |

Table des figures : Chapitre III

| | |
|--|-----|
| <i>Figure III-1 Composant Flip-chip enfoui [Boe-08]</i> | 103 |
| <i>Figure III-2 Vue (a) du composant monté en surface, (b) du composant enfoui, (c) ¼ du modèle selon les symétries et (d) vue en coupe d'une géométrie simplifiée de la brasure....</i> | 103 |
| <i>Figure III-3 Profil de température des simulations thermomécaniques</i> | 105 |
| <i>Figure III-4 Mise en avant de la zone critique de rupture dans le cas d'un composant monté en surface</i> | 106 |
| <i>Figure III-5 Extraction des résultats de simulation (maillage grossier 10 µm)</i> | 107 |
| <i>Figure III-6 Vue de dessus de l'énergie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface avec un maillage de (a) 10µm et (b) 5µm et (c) illustration de la différence entre un maillage de 5µm et 10µm</i> | 108 |
| <i>Figure III-7 Energie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface en fonction de la géométrie de la brasure : (a) cubique, (b) sphérique et leur maillage associé</i> | 109 |
| <i>Figure III-8 Energie de déformation à la fin du troisième cycle (a) vue du dessus de la brasure montée en surface (b) vue du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-700G et (c) vu du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-770G</i> | 111 |
| <i>Figure III-9 Réponse d'un matériau à des cycles de déformation imposée [Uni-10]</i> | 114 |
| <i>Figure III-10 Réponse d'un matériau à des cycles de contrainte imposée [Uni-10]</i> | 114 |
| <i>Figure III-11 Courbe schématique de la réponse d'un matériau à une déformation imposée en fonction du nombre de cycles [Uni-10]</i> | 114 |
| <i>Figure III-12 Courbes schématiques des lois de Basquin (déformation élastique), de la loi de Manson-Coffin (déformation plastique) et de la loi totale de la déformation en fonction du nombre de cycles à la rupture [Fat]</i> | 115 |
| <i>Figure III-13 Courbes de Manson-Coffin-Basquin de différents alliages de cuivre</i> | 116 |
| <i>Figure III-14 Modélisation des couches concernées par l'enfouissement de la mémoire Flash</i> | 116 |
| <i>Figure III-15 Déformation linéaire élastique sur le via à +80°C et -40°C</i> | 117 |
| <i>Figure III-16 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime linéaire</i> | 118 |
| <i>Figure III-17 Déformation totale sur le via à +80°C et -40°C en linéaire et en non-linéaire au 25^{ème} cycle</i> | 119 |
| <i>Figure III-18 Résultats de simulation centrés sur la zone à risque en régime linéaire et non-linéaire à 80°C aux 5° et 25° cycles</i> | 119 |
| <i>Figure III-19 Résultats de simulation de la déformation par cycle en fonction du cycle</i> | 120 |
| <i>Figure III-20 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime non-linéaire</i> | 120 |
| <i>Figure III-21 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du cycle de température en régime non linéaire</i> | 123 |
| <i>Figure III-22 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du composant</i> | 125 |
| <i>Figure III-23 Schéma du fléchissement du composant et mise en avant des différences de déformation des différents vias du composant STV du via central sous le composant (a) au via extérieur (d)</i> | 125 |
| <i>Figure III-24 Structure 3D de la mémoire Flash, via cylindrique droit et double symétrie</i> .. | 126 |

| | |
|--|------------|
| <i>Figure III-25 Déformation sur les vias et le composant à +80°C</i> | <i>127</i> |
| <i>Figure III-26 Déformation à +80°C dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe le sens de dans la largeur.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Figure III-27 Déplacement (en m) en mètre selon l'axe z du composant</i> | <i>129</i> |
| <i>Figure III-28 Résultats en non-linéaire de la déformation à +80°C au 25^{ème} cycle dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe dans le sens de la largeur.....</i> | <i>130</i> |
| <i>Figure III-29 Vue en coupe de la déformation sur le via extérieur dans le sens de la largeur du composant Flash au 25^{ème} cycle</i> | <i>131</i> |
| <i>Figure III-30 (a) Répartition des vias sur le composant STV (1/4 de la structure) et (b)Vue du dessus de la déformation des vias à +80°C au 10^{ème} cycle avec encadré les vias étudiés</i> | <i>132</i> |
| <i>Figure III-31 Vue en coupe de la déformation (a) dans les 4 premiers vias (encadré précédemment) de la diagonale du composant (b) dans le via formant le coin.....</i> | <i>133</i> |
| <i>Figure III-32 Localisation des points critiques pour chacun des cas simulés.....</i> | <i>134</i> |
| <i>Figure III-33 Répartition de l'énergie de déformation de la brasure enterrée et de la déformation du via enterré.....</i> | <i>134</i> |
| <i>Figure III-34 Déformation des via intérieurs et extérieurs selon l'écart entre les vias</i> | <i>137</i> |
| <i>Figure III-35 Déformation sur le via extérieur en fonction de la longueur du composant ...</i> | <i>138</i> |

Table des tableaux : Chapitre III

| | |
|--|------------|
| <i>Tableau III-1 Caractéristiques géométriques du modèle.....</i> | <i>104</i> |
| <i>Tableau III-2 Constantes de Darveaux dans le cas d'une brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5} [Dar-00].</i> | <i>105</i> |
| <i>Tableau III-3 Estimation de la durée de vie selon le modèle de Darveaux pour un composant monté en surface avec des joints de brasure pour différents maillages et géométries</i> | <i>110</i> |
| <i>Tableau III-4 Propriétés thermoélastiques sélectionnées pour deux types de pré-imprégnés</i> | <i>111</i> |
| <i>Tableau III-5 Estimation de la durée de vie selon la méthodologie de Darveaux en fonction de la technologie (surface ou enfouissement)</i> | <i>112</i> |
| <i>Tableau III-6 Paramètres de Manson-Coffin-Basquin pour différents types de cuivre et certains alliages de cuivre [Vin-11][Har-17].....</i> | <i>115</i> |
| <i>Tableau III-7 Divers résultats selon le nombre de cycles simulés.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Tableau III-8 Evaluation de la durée de vie en fonction du cycle appliqué</i> | <i>122</i> |
| <i>Tableau III-9 Mise en avant des différences entre les cycles de température (résultats à échelle identique)</i> | <i>122</i> |
| <i>Tableau III-10 Spécifications des composants.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Tableau III-11 Résultats de simulation selon le composant et le régime considéré.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Tableau III-12 Résultats de simulation selon l'axe d'étude.....</i> | <i>129</i> |
| <i>Tableau III-13 Comparaison des résultats Linéaire (L) et Non-linéaire (NL) selon l'axe d'étude.....</i> | <i>130</i> |
| <i>Tableau III-14 Résultats de simulation en mode non-linéaire selon les cycles de température</i> | <i>132</i> |
| <i>Tableau III-15 Bilan des résultats de simulation pour le composant STV selon la méthode employée.....</i> | <i>133</i> |
| <i>Tableau III-16 Comparaison des méthodes d'interconnexion.....</i> | <i>135</i> |
| <i>Tableau III-17 Paramétrages des simulations complémentaires.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Tableau III-18 Résultats de simulation en fonction de l'écart entre les vias.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Tableau III-19 Résultats de simulation en fonction de la longueur du composant.....</i> | <i>138</i> |

III.1 Introduction

Sur la base des modèles matériaux (propriétés et représentation), la simulation numérique permet de réaliser de grandes séries de calculs avec pour objectifs de représenter la réalité physique d'un phénomène. Evidemment, l'exactitude des résultats dépendra de nombreux facteurs tels que le choix des équations qui gouvernent les phénomènes mis en cause. Les résultats doivent donc être analysés précautionneusement. De plus la méthode des éléments finis repose sur le maillage de la structure qui affectera le temps de calcul et le résultat. Les résultats numériques ne sont pas une vérité absolue mais les tendances qui se dégagent entre les méthodologies et l'élaboration d'une évaluation critique peuvent servir de point d'étude d'un circuit par cette méthode.

Les travaux de simulation réalisés au cours de la thèse ont été développés à l'aide du logiciel Ansys Workbench version 15.0. L'objectif global des simulations était est de mettre en avant l'impact de la technologie d'enfouissement sur la fiabilité d'un circuit électronique. Pour ce chapitre, les simulations seront centrées sur la réponse thermomécanique d'un composant isolé et de ses interconnexions. L'objectif sera de comparer plusieurs méthodologies de simulation, que ce soit dans la réalisation du maillage, la complexité des modèles de comportement ou la géométrie, en plus de comparer les technologies entre elles. Dans un premier temps, la méthodologie de Darveaux sera appliquée sur des interconnexions de type brasure en $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$. Ensuite, un modèle 2D basé sur des interconnexions de type via s'appuiera sur la méthodologie de Manson-Coffin-Basquin pour l'évaluation de la durée de vie. Enfin, des simulations sur les vias seront menées sur un modèle 3D. Les estimations du nombre de cycles avant défaillance sont évidemment dépendantes des conditions de température données.

III.2 Etude de l'assemblage avec des joints de brasure : $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$

L'ensemble des interconnexions présentées dans le premier chapitre est compatible avec la technologie d'enfouissement. Le prototype réalisé dans le cadre du projet EDDEMA utilise des vias mais il est pertinent d'évaluer l'impact que peut avoir le choix de l'interconnexion en plus de la simple comparaison du composant en surface par rapport au composant enfoui. De plus, le via est une technologie interne qui n'est pas utilisable pour un composant monté en surface contrairement à la brasure. La brasure sélectionnée est un alliage sans plomb d'étain-argent-cuivre, $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_3\text{Cu}_{0,5}$. Ce choix a été fait arbitrairement sur la base de l'expérience de l'équipe sur ce type de brasure [Che-14]. La figure III.1 illustre le type d'assemblage modélisé.

Parmi les trois composants actifs enfouis dans le cadre du projet EDDEMA, la mémoire Flash N25Q032A, en tant que plus petit composant avec le moins d'entrées/sort est utilisée comme composant test. Ses dimensions sont les suivantes : 3,5mm x 2mm x 0,15mm. Il comporte 8 entrées/sorties qui sont interconnectées au circuit par des brasures. Le tableau III.1 donne les

caractéristiques géométriques du modèle tandis que la figure III.2 présente la structure modélisée.

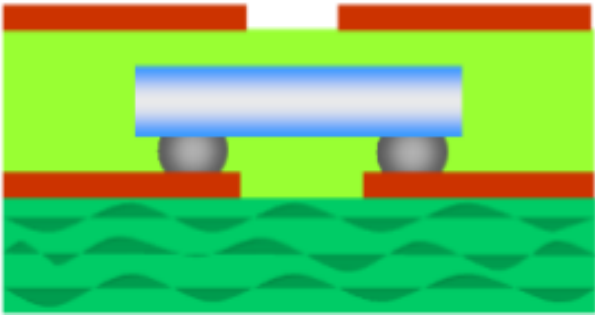


Figure III-1 Composant Flip-chip enfoui [Boe-08]

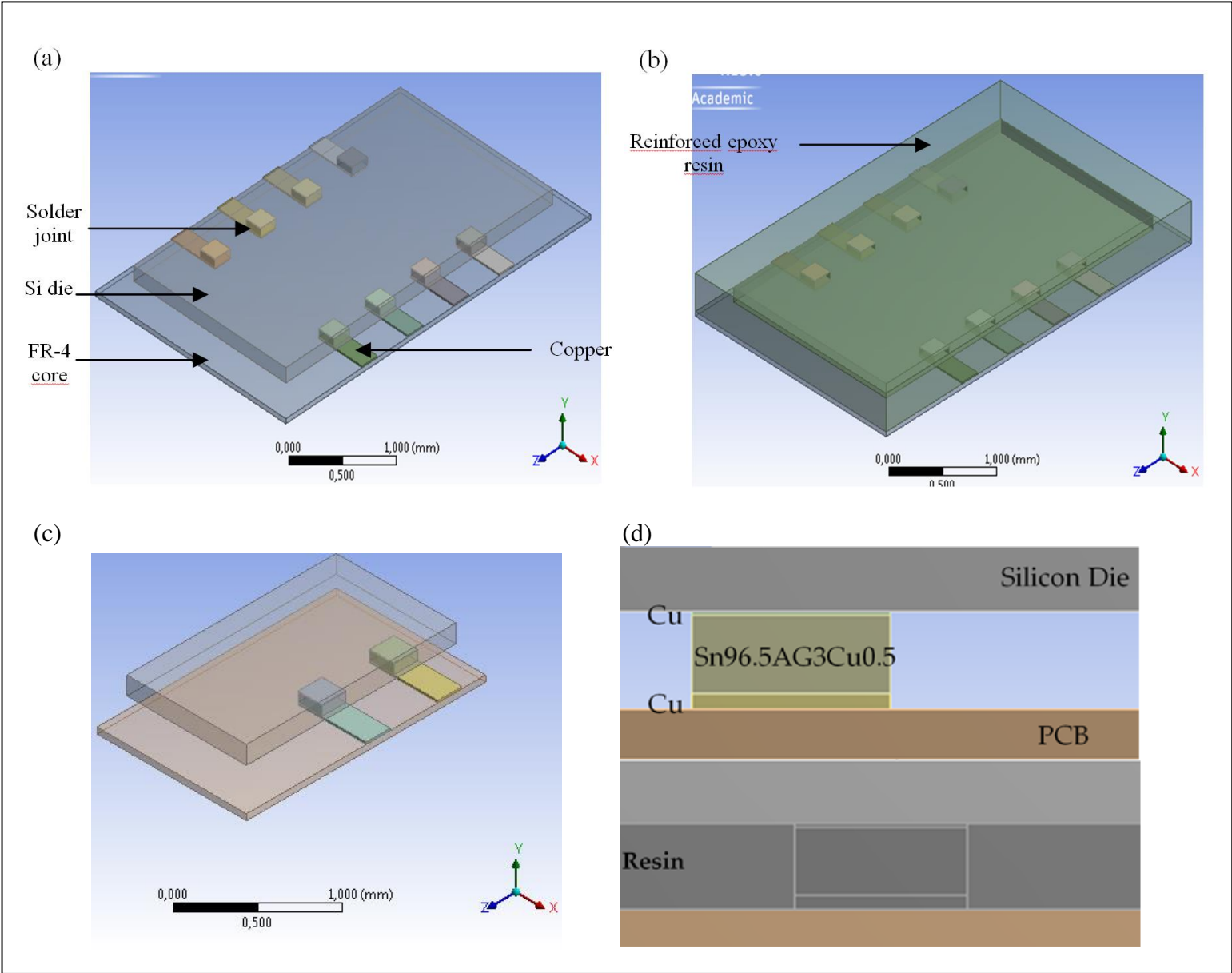


Figure III-2 Vue (a) du composant monté en surface, (b) du composant enfoui, (c) ¼ du modèle selon les symétries et (d) vue en coupe d’une géométrie simplifiée de la brasure

Tableau III-1 Caractéristiques géométriques du modèle

| Paramètres | Valeurs numériques |
|-----------------------------------|--------------------|
| <i>Longueur de la puce</i> | 3,5 mm |
| <i>Largeur de la puce</i> | 2 mm |
| <i>Epaisseur de la puce</i> | 0,150 mm |
| <i>Epaisseur de la brasure</i> | 0,080 mm |
| <i>Diamètre de la brasure</i> | 0,2 mm |
| <i>Nombre de joint de brasure</i> | 8 |
| <i>Epaisseur de la résine</i> | 0,400 mm |
| <i>Epaisseur de pad</i> | 0,005 mm |
| <i>Dimension de la cavité</i> | 3,7 mm x 2,2 mm |
| <i>Dimension de la cavité</i> | 0,1 mm |

III.2.1 Méthodologie de Darveaux

La littérature décrit plusieurs modèles pour évaluer la durée de vie d'un joint de brasure en utilisant des simulations thermomécaniques par éléments finis [Lee-00]. Une des méthodes les plus employées est la méthodologie de Darveaux qui est très utilisée pour les technologies de surface [Sye-04] [Dar-00] et reprise pour des composants passifs enfouis [Sch-13]. Ce modèle permet la détermination, à partir du calcul de la densité d'énergie plastique dissipée par cycle de température (selon les paramètres de Anand de la brasure définis précédemment), le nombre de cycles pour initier une fissure dans la brasure ainsi que la vitesse de propagation de cette fissure. Ces paramètres permettent ensuite de prédire une durée de vie de l'assemblage. Le modèle de Darveaux établit 4 constantes corrélées à la vitesse de rupture dans deux équations [Dar-00] :

$$N_0 = K_1 \Delta W_{ave}^{K_2} \quad (III.1)$$

$$\frac{da}{dN} = K_3 \Delta W_{ave}^{K_4} \quad (III.2)$$

$$\alpha = N_0 + \frac{a}{\frac{da}{dN}} \quad (III.3)$$

Où ΔW_{ave} représente la densité moyenne d'énergie plastique dissipée par unité de volume (en $J.m^{-3}$)

K_i sont les constantes de Darveaux dépendantes du matériau

α est la durée de vie caractéristique de la brasure (nombre de cycles pour une rupture à 63,2%)

N_0 est le nombre de cycle avant initiation de la rupture

a est le diamètre caractéristique de la brasure

da/dN est la vitesse de propagation de la fissure le long de la brasure

Le tableau III.2 présente les constantes de Darveaux K_1 , K_2 , K_3 et K_4 d'un alliage sans plomb utilisées dans les simulations [Dar-00].

Tableau III-2 Constantes de Darveaux dans le cas d'une brasure Sn_{96,5}Ag₃Cu_{0,5} [Dar-00]

| | |
|--|----------|
| K_1 (cycle/MPa ^{K²}) | 41,2 |
| K_2 | -1,433 |
| K_3 (mm/(MPa ^{K⁴} .cycle)) | 0,003718 |
| K_4 | 1,768 |

L'objectif de la simulation est de déterminer ΔW_{ave} et la zone la plus critique pour initier la rupture. Evidemment, il est attendu que cette zone soit proche des interfaces entre des matériaux différents. La détermination de ΔW_{ave} repose sur la stabilisation de la déformation de cycles de température de type VRT (Very Rapid Temperature). La simulation a besoin de stabiliser la convergence du modèle lors du premier cycle, ainsi trois cycles de température sont simulés selon le profil de la figure III.3. Ce profil a été sélectionné parmi les profils type de vieillissement accéléré, et qui, dans la pratique, respecte la contrainte d'avoir un ΔT supérieur aux conditions de fonctionnement et une température maximale inférieure à la température limite de fonctionnement (378K dans le cadre du projet EDDEMA). La transition entre la température maximale de +80°C (353K) et la température minimale de -40°C (233K) se fait en 1200 secondes tandis que le palier de température est maintenu pendant 600 secondes. Ces cycles reproduisent les variations de température rencontrées en conditions opérationnelles de fonctionnement des cartes. ΔW_{ave} est ainsi calculée entre l'étape 12 et l'étape 18 de la figure III.3.

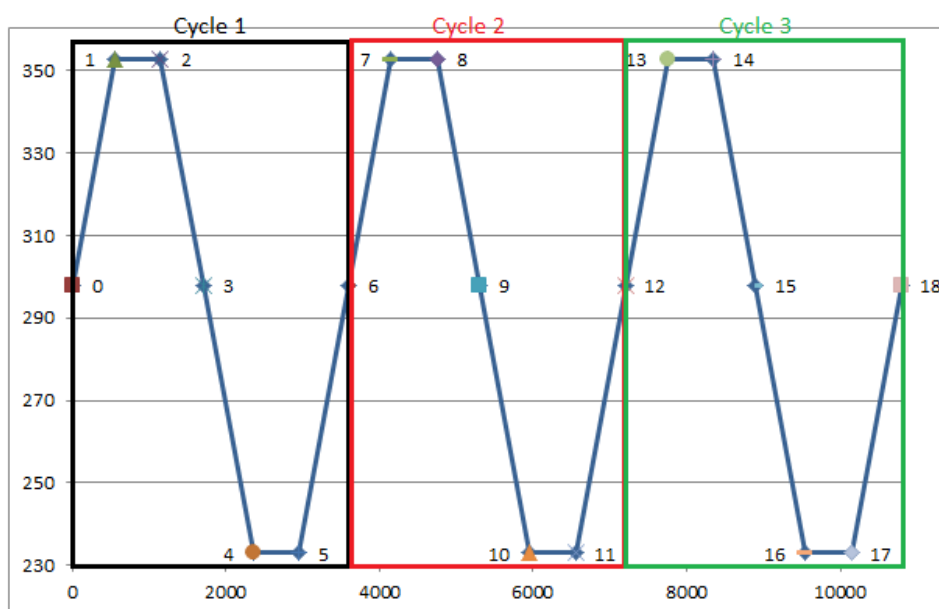


Figure III-3 Profil de température des simulations thermomécaniques

Dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier, et cela même avec un maillage grossier, la zone à plus fort potentiel de rupture selon la simulation. Ensuite, une couche est considérée pour isoler un volume où sont prélevés les résultats d'énergie de déformation aux étapes 12 et 18 des cycles de température, afin de calculer ΔW_{ave} . La figure III.4 explicite les étapes précédentes tandis que la figure III.5 présente des résultats numériques.

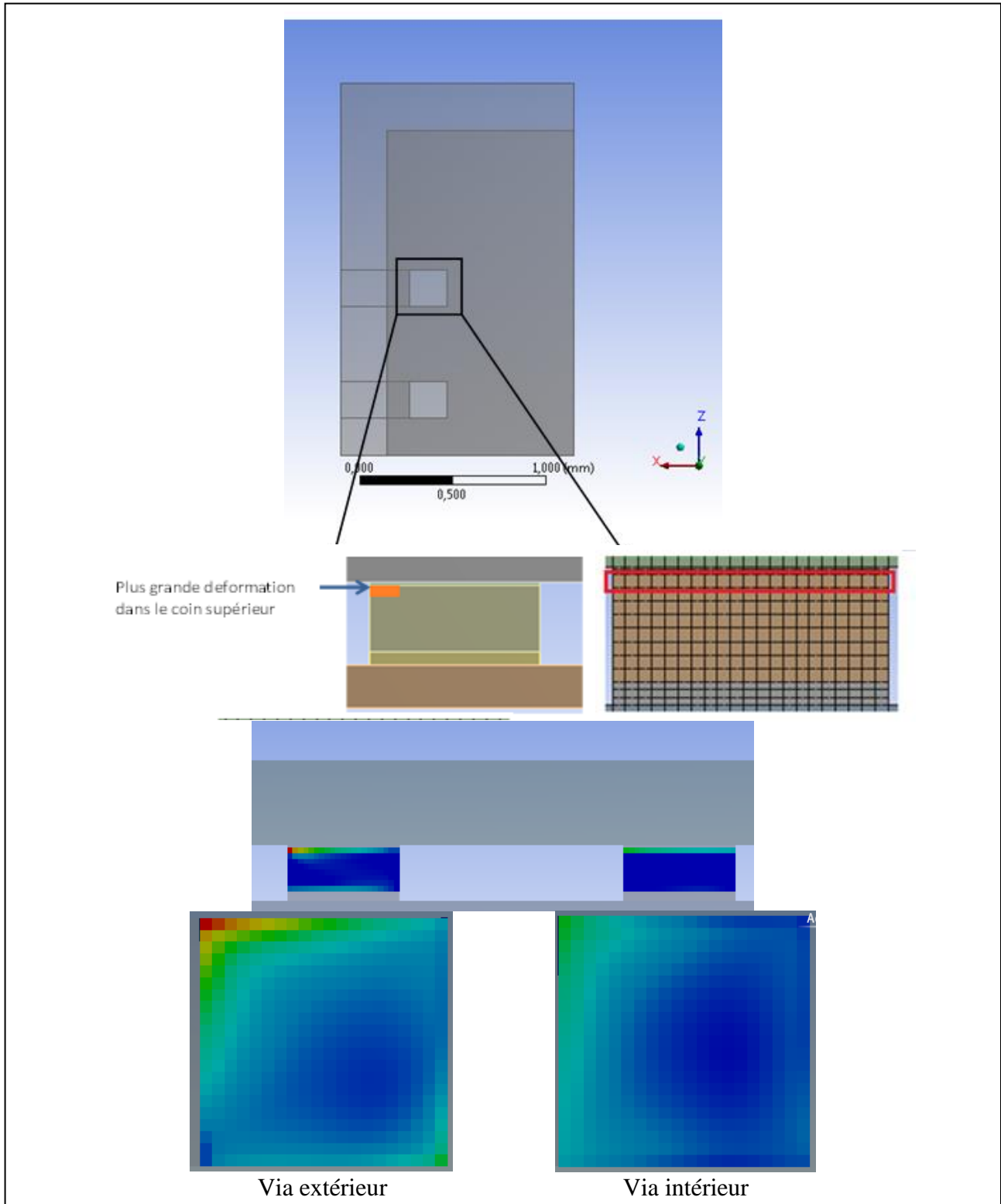


Figure III-4 Mise en avant de la zone critique de rupture dans le cas d'un composant monté en surface

Dans le cas du composant monté en surface, la brasure extérieure, encadrée sur la figure III.4, est le siège d'une énergie de déformation plus importante que la brasure intérieure. De plus, sur la brasure la plus susceptible de rompre, c'est le sommet supérieur extérieur qui présente la déformation la plus importante. Il est donc attendu que ce soit cette zone qui cède en premier dans la brasure. La Figure III.5 présente la méthodologie de calcul menant à ΔW_{ave} .

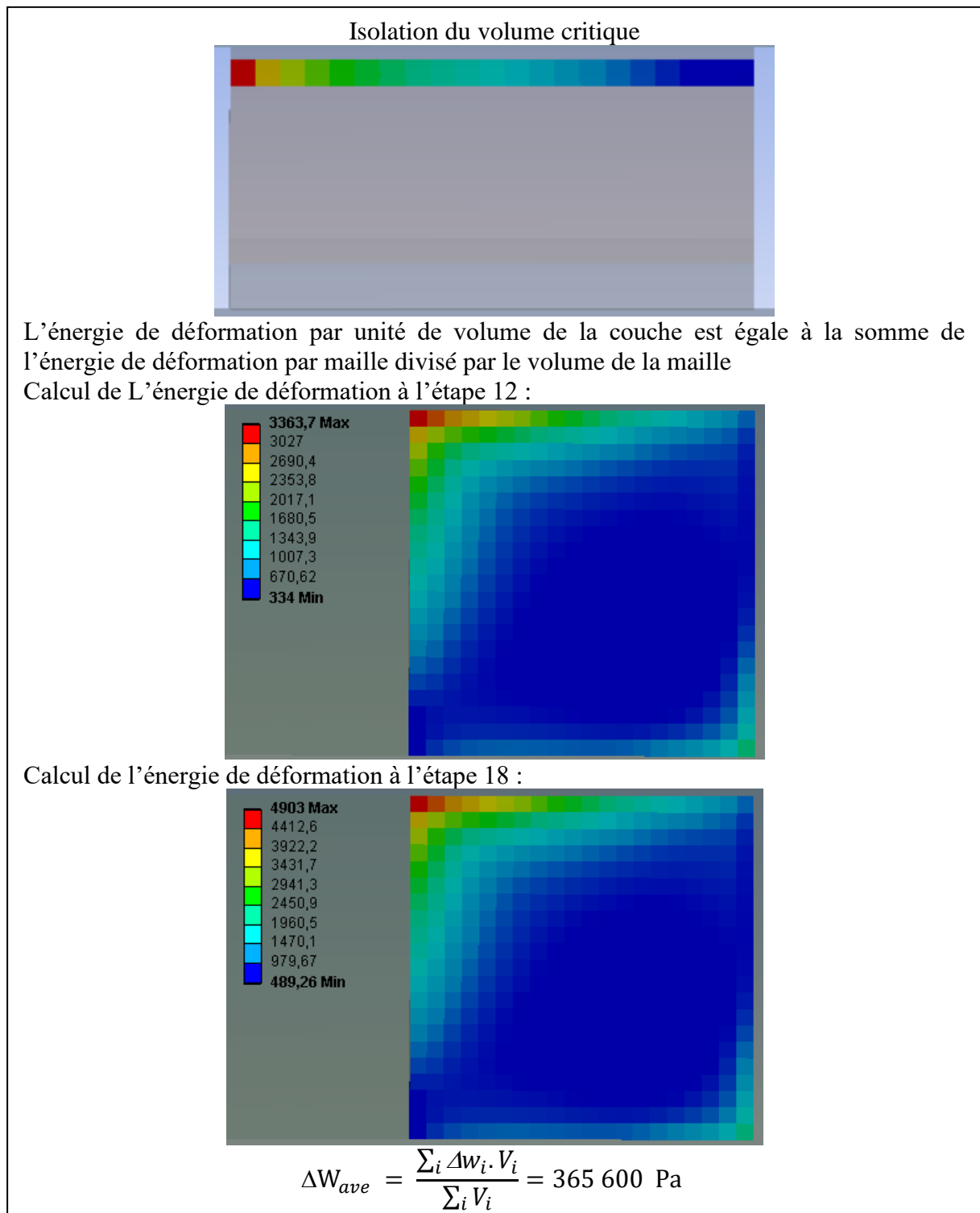


Figure III-5 Extraction des résultats de simulation (maillage grossier 10 μm)

III.2.2 Influence du maillage et considérations géométriques

Le travail sur le maillage et sur la géométrie est au cœur de la problématique de simulation par éléments finis puisqu'ils définissent grandement le temps de résolution des calculs. Il est donc nécessaire de parvenir à un compromis entre la précision du résultat et le temps de calcul. Pour cela, deux maillages (cf. Figure III.6) et deux géométries (cf. Figure III.7) sont comparées. Les deux maillages mis en avant sont un maillage de $10\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$. Les géométries sélectionnées sont une représentation simple de la brasure par un cube et une représentation plus réaliste. Il est important de souligner que dans les règles de maillage il est important d'avoir 3 éléments minimum pour assurer un calcul correct d'une couche. La Figure III.7 est donc la plus représentative du maillage réalisé pour les calculs finaux. Le tableau III.3 récapitule les différents résultats selon le maillage et la géométrie.

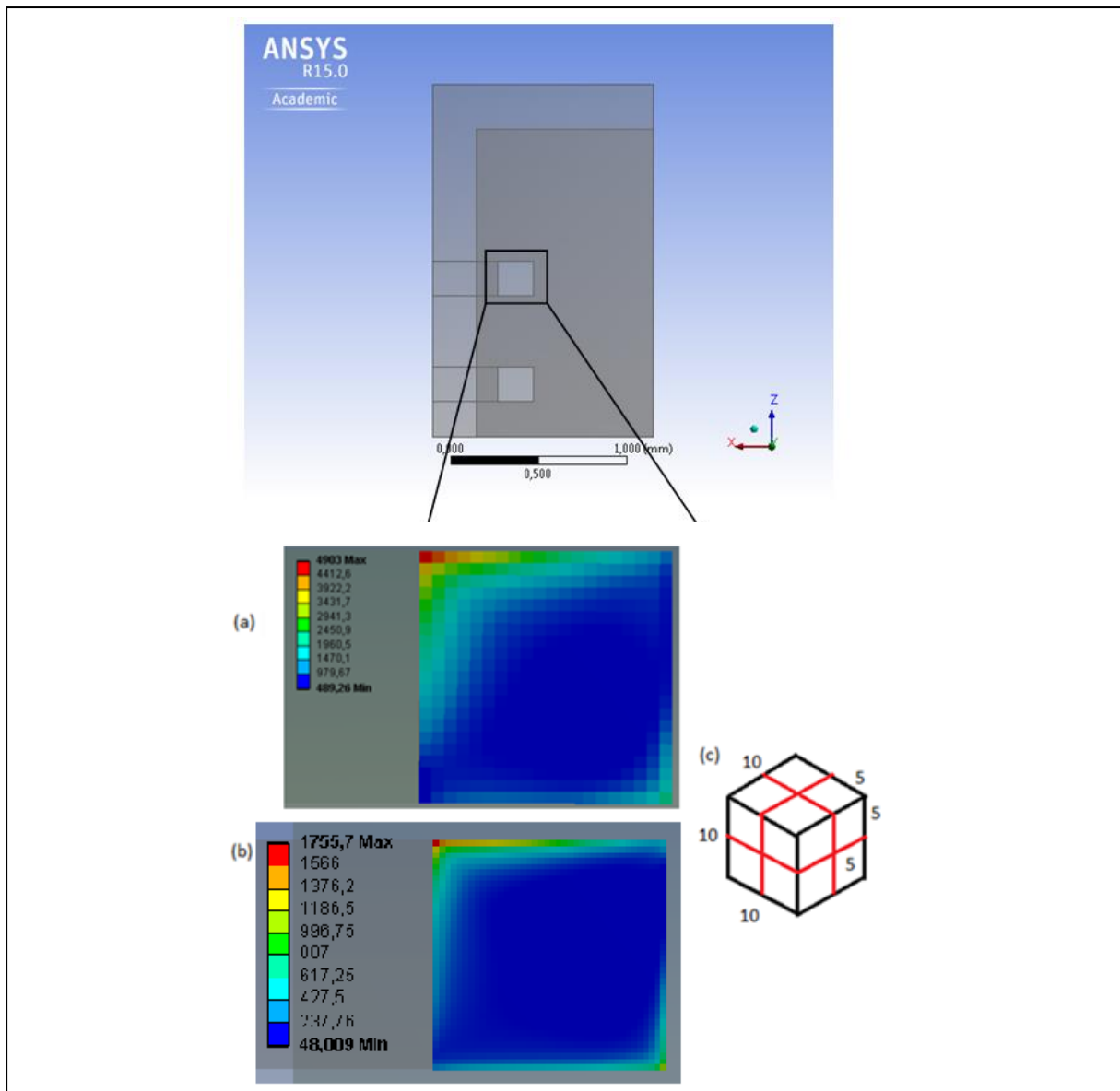


Figure III-6 Vue de dessus de l'énergie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface avec un maillage de (a) $10\mu\text{m}$ et (b) $5\mu\text{m}$ et (c) illustration de la différence entre un maillage de $5\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$

Comme le montre la Figure III.6, la taille du maillage influence les valeurs par élément de volume et donc les résultats (cf. Tableau III.3), puisque la maille de 10 μm est 8 fois plus volumineuse que la maille de 5 μm (cf. Figure III.6.c).

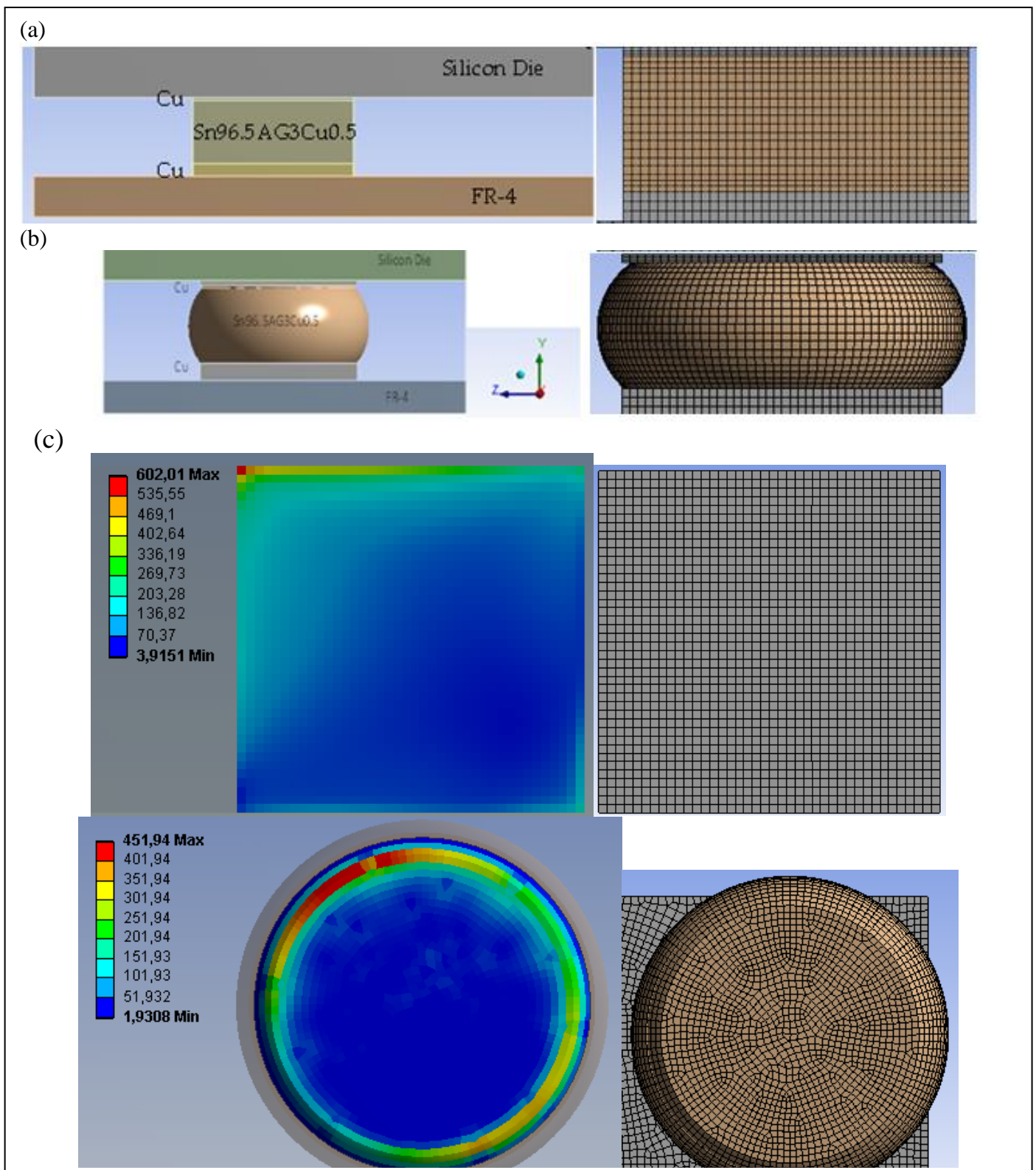


Figure III-7 Energie de déformation à la fin des trois cycles sur le haut de la brasure pour un composant monté en surface en fonction de la géométrie de la brasure : (a) cubique, (b) sphérique et leur maillage associé

Une représentation plus proche de la réalité (brasure sphérique) conduit à une répartition plus homogène des pics d'énergie. Mais la même tendance est observée puisque l'orientation de la déformation de l'extérieur vers l'intérieur reste tout de même présente.

Tableau III-3 Estimation de la durée de vie selon le modèle de Darveaux pour un composant monté en surface avec des joints de brasure pour différents maillages et géométries

| Géométrie | Maillage (μm) Nombre d'éléments | ΔW_{ave} (Pa) | N_0 (cycles) | α (cycles) | Temps de simulation (heures) |
|----------------------|--|------------------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|
| Brasure cubique | 10 ~ 120 000 | 283 320 | 251 | 751 | ~4 |
| Brasure cubique | 5 ~ 450 000 | 305 580 | 225 | 663 | ~ 7 |
| Brasure « réaliste » | 5 ~740 000 | 257 730 | 288 | 845 | ~ 16 |

Trois conclusions apparaissent à l'issue des travaux réalisés sur le maillage.

- Réduire de moitié la taille des éléments dans les zones critiques implique de grandement augmenter le nombre d'éléments ainsi que le temps de simulation.
- Affiner le maillage du modèle cubique tend à diminuer la durée de vie.
- Réaliser une brasure plus réaliste ajoute du temps de simulation, affine la distribution de l'énergie de déformation mais la durée de vie estimée est supérieure au modèle cubique. L'augmentation du résultat entre la brasure cubique et celle réaliste s'explique par la différence de forme. Le choix a été fait de faire concorder le diamètre de la brasure réaliste avec le côté du carré de la brasure cubique.

La même tendance a été obtenue pour des simulations avec différents maillages ou différents cycles de température [Bal-17], par conséquent le modèle cubique sera préféré pour le gain de temps apporté. La taille de maillage est limitée par les capacités de calcul de l'ordinateur qui nous fera préférer un nombre d'éléments inférieur au million.

III.2.3 Influence de l'enfouissement du composant

L'étude du maillage et de la géométrie a été réalisé sur le composant enfoui : une tendance similaire est observée mais les temps de calcul sont beaucoup plus longs puisqu'il est nécessaire de mailler la résine qui enrobe le composant. Par contre, il devient intéressant de surveiller les différences dans le comportement des brasures par rapport au composant monté en surface.

L'étude est menée avec deux types de pré-imprégnés le MCL-E-700G et le MCL-E-770G dont les caractéristiques sont données dans le Tableau III.4. La différence majeure entre les deux matériaux est le coefficient de dilatation thermique ainsi que la définition de la limite plastique par les mesures de traction réalisées sur les échantillons de MCL-E-770G. Sans

surprise le pré-imprégné le plus stable thermiquement correspondant au CTE le plus faible, induit moins de contraintes au niveau de la brasure (cf. Figure III.8).

Tableau III-4 Propriétés thermoélastiques sélectionnées pour deux types de pré-imprégnés

| Propriétés mécaniques | MCL-E-770G | MCL-E-700G |
|---|------------|------------|
| CTE dans les directions x et z (ppm/K ⁻¹) | 1,8 | 8 |
| CTE dans la direction y (ppm/K ⁻¹) | 10,5 | 20 |
| Module de Young (GPa) | 26 | 33 |
| Stress de Yield (MPa) | 102 | NC |

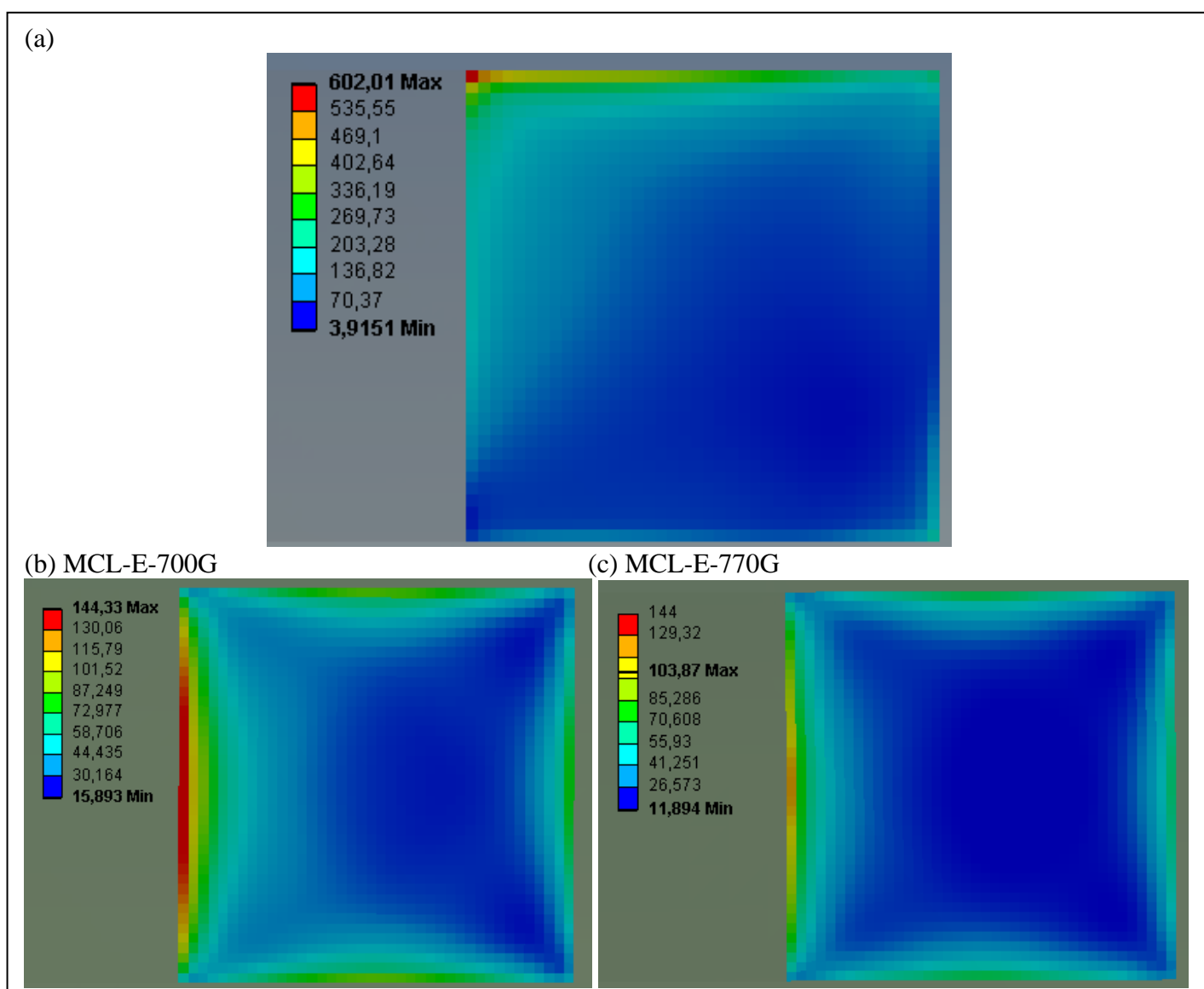


Figure III-8 Energie de déformation à la fin du troisième cycle (a) vue du dessus de la brasure montée en surface (b) vue du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-700G et (c) vu du dessus de la brasure enfouie avec MCL-E-770G

La différence principale entre l'assemblage avec le composant monté en surface et le composant enfoui est la répartition de l'énergie de déformation. En effet, lorsque le composant est monté en surface l'énergie de déformation se concentre dans les parties hautes de la brasure en l'orientant vers l'extérieur (cf. Figure II.4) alors que la répartition de l'énergie de déformation est plus homogène dans l'assemblage où le composant est enfoui même si la tendance de fortes déformations vers l'extérieur subsiste. Il faut également noter que l'homogénéisation se fait aussi verticalement même si les extrémités supérieures et inférieures restent les plus contraintes.

Le tableau III.5 présente les résultats relatifs au composant monté en surface et au composant enfoui avec deux types de pré-imprégnés.

Tableau III-5 Estimation de la durée de vie selon la méthodologie de Darveaux en fonction de la technologie (surface ou enfouissement)

| Package | ΔW_{ave} (MPa) | N_0 (Cycles) | α (Cycles) | Temps de simulation (heures) |
|----------------------------------|------------------------|----------------|-------------------|------------------------------|
| Composant monté en surface | 305 600 | 225 | 663 | ~5 |
| Composant enfoui avec MCL-E-700G | 156 700 | 585 | 2009 | ~9 |
| Composant enfoui avec MCL-E-770G | 114 600 | 923 | 3400 | ~9 |

Les résultats de simulation montrent que l'enfouissement d'un composant brasé tend à améliorer significativement la durée de vie de ses brasures. Ce gain est d'autant plus important que le coefficient de dilatation thermique du pré-imprégné autour du composant est faible. Dans les conditions de simulation, une amélioration de 3 fois la durée de vie est observée entre le composant en surface et le composant enfoui avec le MCL-E-700G et une amélioration de 5 fois pour le MCL-E-770G.

Cependant les simulations sont focalisées sur un composant monté en surface sans autre traitement. En pratique un underfill est couramment ajouté pour protéger les interconnexions d'une manière similaire à ce que fait la résine du pré-imprégné. L'autre point qui n'a pas été traité est la prise en compte des contraintes liées à l'assemblage des couches. En effet, en plus du brasage, l'assemblage subit l'enfouissement des composants, donc des conditions de température et de pression particulières générant des contraintes additionnelles au niveau des interconnexions. Ces considérations n'ont pas été traitées puisque le choix des vias avait déjà été décidé et que ceux-ci se montrent déjà plus prometteur.

III.3 Etude 2D de l'assemblage avec des vias

Dans le cadre du projet, ce sont des microvias qui sont utilisés comme interconnexions. Par conséquent, par soucis de comparaison, il est nécessaire de développer

un modèle d'étude similaire à la méthodologie de Darveaux. Pour débiter, le modèle est réalisé en 2D pour diminuer les temps de calcul et obtenir des tendances préliminaires.

III.3.1 Méthodologie de Manson-Coffin-Basquin

Les vias en cuivre ne se prêtent pas à la description à l'aide des paramètres d'Anand initialement développée pour les aciers puis étendue aux alliages sans plomb. Pour contrevenir à cela, nous nous sommes intéressés à une description mécanique du cuivre par la méthodologie de Manson-Coffin-Basquin. Cette méthodologie propose d'estimer la durée de vie par la déformation ou la contrainte développée à chaque cycle de déformation [Bas-10] [Par-95]. Dans le cadre de l'étude de fatigue d'un matériau, deux phénomènes peuvent être observés : le durcissement ou l'adoucissement selon si une déformation (cf. Figure III.9) ou une contrainte (cf. Figure III.10) est appliquée. Les boucles d'hystérésis finissent par se stabiliser après une phase d'accommodation jusqu'à l'apparition d'une fissure (cf. Figure III.11). L'estimation de la durée de vie selon la méthodologie de Manson-Coffin-Basquin repose sur les courbes donnant la déformation appliquée par cycle en fonction du nombre de cycle à rupture (cf. Figure III.12). L'analogie est possible avec les courbes de Wöhler qui sont définies à contrainte donnée. Deux lois ont été dégagées de ces courbes. La loi de Basquin qui relie l'amplitude de déformation élastique au nombre de cycles à rupture et la loi de Manson-Coffin qui relie l'amplitude de déformation plastique au nombre de cycles à la rupture. Ces lois permettent de dégager la loi totale de Manson-Coffin-Basquin :

$$\text{Loi de Basquin : } \frac{\Delta \varepsilon_{el}}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_R)^b \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Loi de Manson-Coffin : } \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} = \varepsilon'_f (2N_R)^c \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Loi totale : } \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{el}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} \quad (\text{III.6})$$

Où $\Delta \varepsilon_{el}$ est l'amplitude de déformation élastique

σ_f est le coefficient de fatigue de la force

E est le module de Young

b est l'exposant de fatigue de la force

$\Delta \varepsilon_{pl}$ est l'amplitude de déformation plastique

ε'_f est le coefficient de fatigue de la ductilité

c est l'exposant de fatigue de la ductilité

N_R est le nombre total de cycles avant rupture

$\Delta \varepsilon$ est l'amplitude totale de déformation par cycle

Afin de déterminer les paramètres de l'équation III.6, la littérature propose de nombreuses valeurs pour le cuivre [Vin-11] ou certains de ses alliages [Har-17] ainsi que différentes méthodes de détermination [Har-17]. Originellement, Manson [Man-65] [Tes-73] testa 69 métaux pour évaluer les exposants b et c moyens. Ensuite, la détermination propre à un matériau passe par 4 points de mesure de la déformation élastique et plastique pour la rupture à $N = 1/4, 10, 10^4$ et 10^5 cycles. Dans ces deux méthodes, σ_f et ε'_f sont définis selon la

résistance ultime R_m et la réduction d'aire (liée au coefficient de Poisson) d'un essai de traction. D'autres méthodes ont par la suite vu le jour et leur pertinence est notamment discutée dans [Har-17]. Ne pouvant fabriquer des échantillons à caractériser, notre choix s'est porté sur la détermination du pire des cas pour définir une limite inférieure à la durée de vie des vias dans la structure. Le tableau III.6 présente les valeurs des paramètres pour le cuivre et certains de ses alliages utilisés pour tracer les courbes de la figure III.13 à l'aide de l'équation 6.

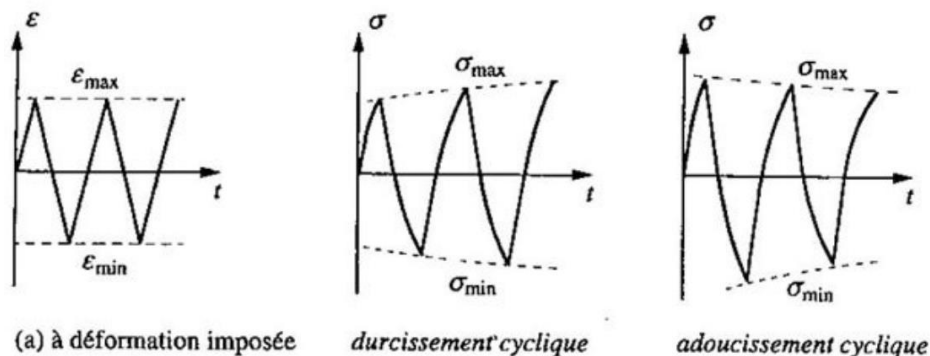


Figure III-9 Réponse d'un matériau à des cycles de déformation imposée [Uni-10]

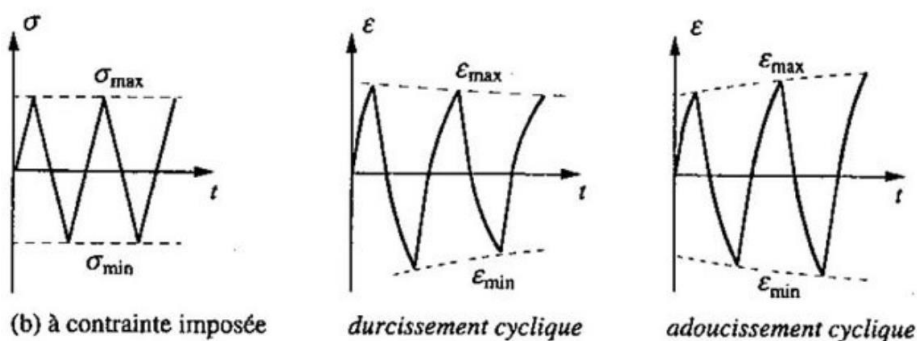


Figure III-10 Réponse d'un matériau à des cycles de contrainte imposée [Uni-10]

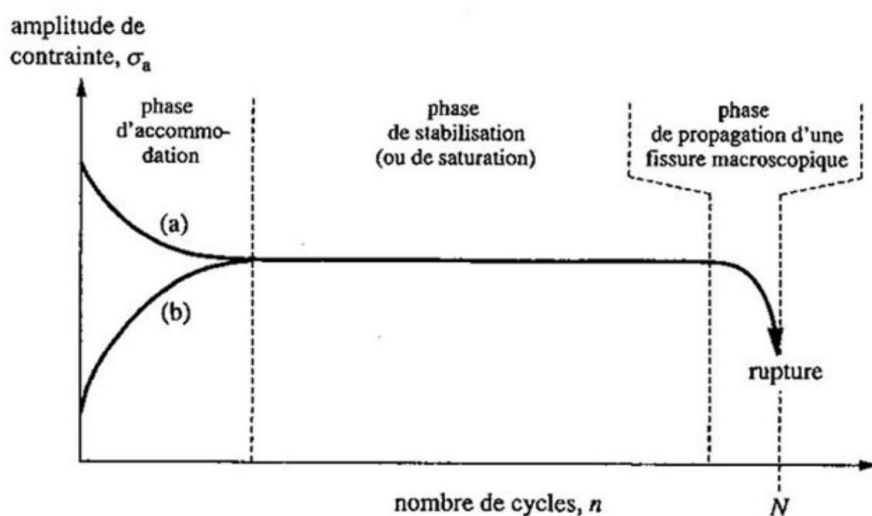


Figure III-11 Courbe schématique de la réponse d'un matériau à une déformation imposée en fonction du nombre de cycles [Uni-10]

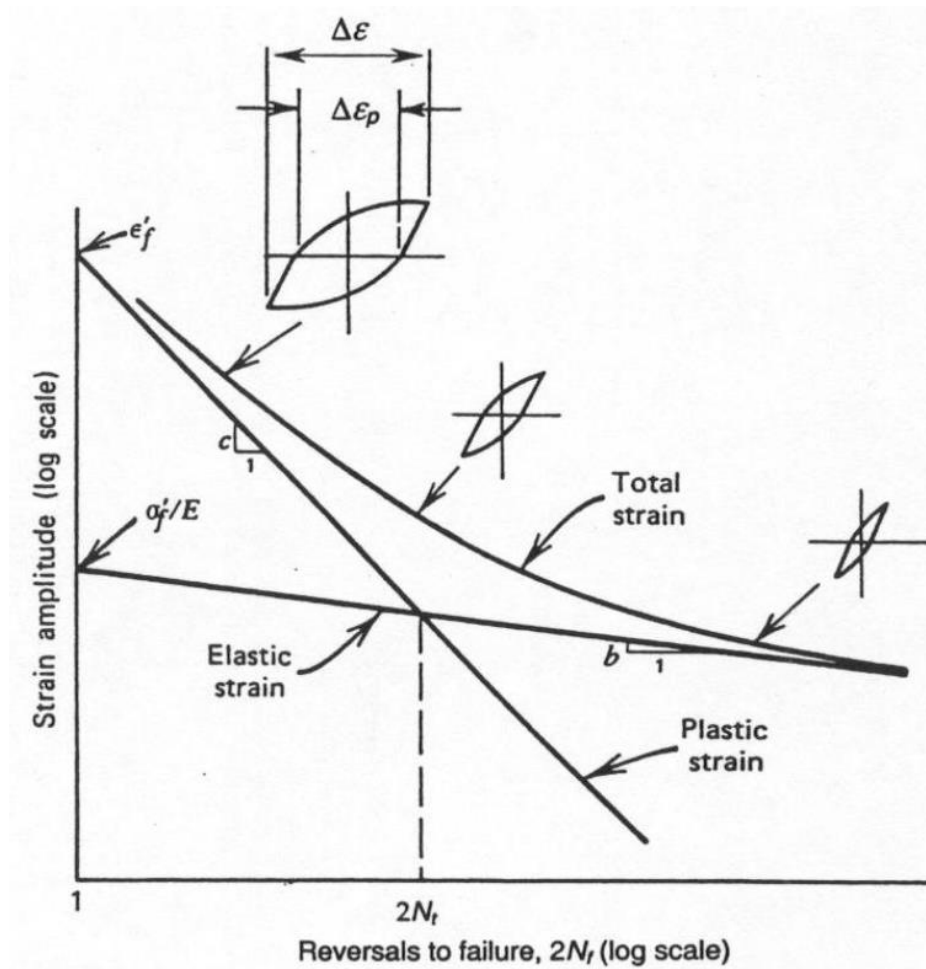


Figure III-40 Courbes schématiques des lois de Basquin (déformation élastique), de la loi de Manson-Coffin (déformation plastique) et de la loi totale de la déformation en fonction du nombre de cycles à la rupture [Fat]

Tableau III-6 Paramètres de Manson-Coffin-Basquin pour différents types de cuivre et certains alliages de cuivre [Vin-11][Har-17]

| Matériau | Loi de Basquin | | Loi de Coffin-Manson | |
|--|------------------|--------|----------------------|-------|
| | σ_f (MPa) | b | ϵ'_f | c |
| CG (cristal grain) Cu [Mug-88] (loi plastique) | - | - | 1,02 | -0,62 |
| CG Cu [Luk-74] (loi totale) | 308 | -0,075 | 2,18 | -0,66 |
| UFG 8Bc ECAP Cu [Vin-11] | 630 | -0,13 | 0,22 | -0,5 |
| ECAP 1 pass Cu [Vin-11] | 537 | -0,11 | 0,23 | -0,54 |
| ECAP 1 pass #011 Single Cristal [vin-11] | 602 | -0,11 | 0,31 | -0,52 |
| Cu ₉₀ Ni ₁₀ Manson universal Method [Har-17] | 608 | -0,12 | 0,955 | -0,6 |
| Cu ₉₀ Ni ₁₀ Muralidharan-Manson's modified universal method [Har-17] | 552 | -0,09 | 0,518 | -0,56 |

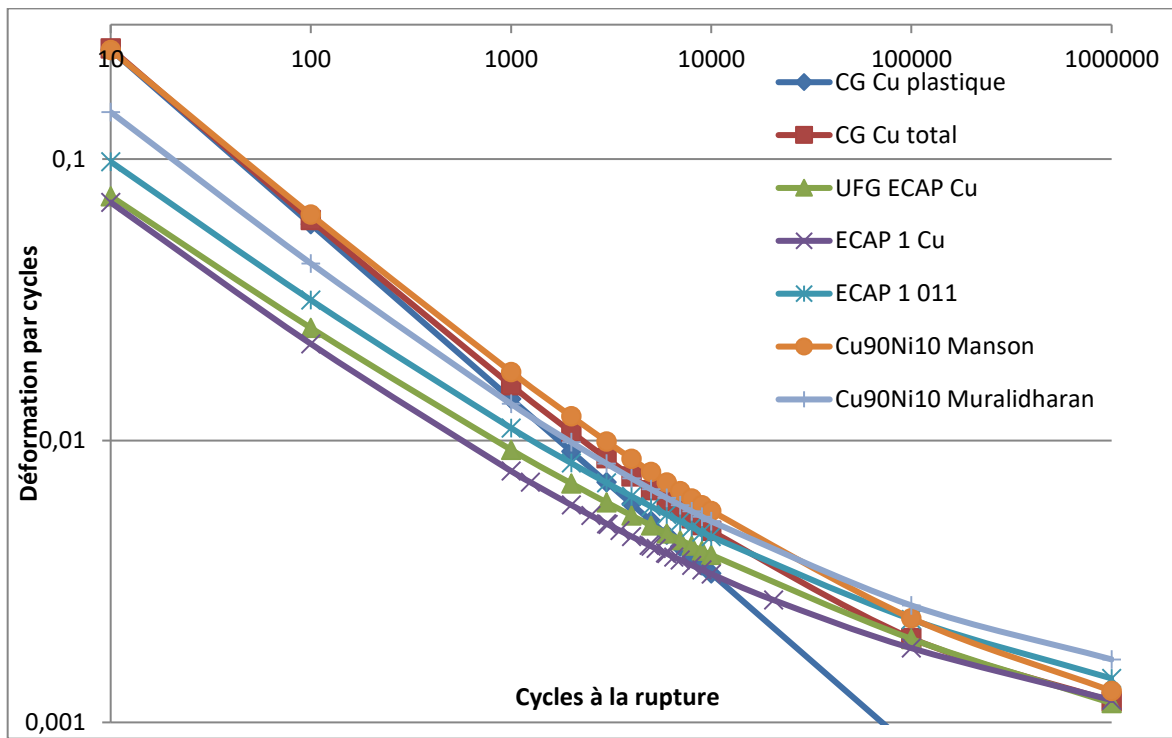


Figure III-13 Courbes de Manson-Coffin-Basquin de différents alliages de cuivre

Les courbes de la Figure III.13 permettent de sélectionner le cuivre le plus critique, c'est-à-dire celui conduisant à la durée de vie la plus faible pour les cycles de déformation. Un objectif de 1000 cycles communément étant visé, ce sont les **caractéristiques du cuivre « ECAP 1 Cu » qui seront considérées dans la suite des travaux.**

III.3.2 Résultats de simulation

L'objectif est de présenter diverses étapes des simulations pour la mémoire Flash enfouie. Cela permet notamment d'établir les différences entre les études linéaires et non linéaires. L'impact des cycles de températures sera ensuite discuté. Enfin, nous appliquerons la méthode mise en place aux composants plus grands que sont le processeur de traitement d'image STV0991 et le régulateur de tension L5965.

La mémoire Flash est d'abord étudiée seule. Elle est positionnée dans une cavité de 150 μ m de profondeur, dans une couche cœur de même hauteur entourée par deux couches de pré-imprégné de 75 μ m de hauteur. Seules les couches d'enfouissement sont considérées comme l'expose la figure III.14.

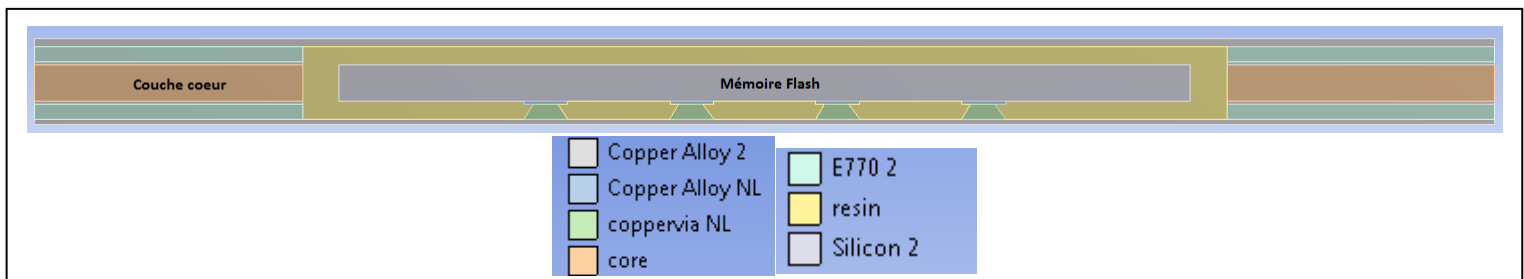


Figure III-14 Modélisation des couches concernées par l'enfouissement de la mémoire Flash

III.3.2.1 Propriétés linéaires

La résolution la plus simple et la plus rapide est de se limiter aux propriétés élastiques linéaires des matériaux. Poser de telles hypothèses permet d'observer les premières tendances et d'identifier et confirmer les zones à risque. La figure III.15 met en avant la déformation élastique qui se manifeste sur les vias au cours d'un cycle.

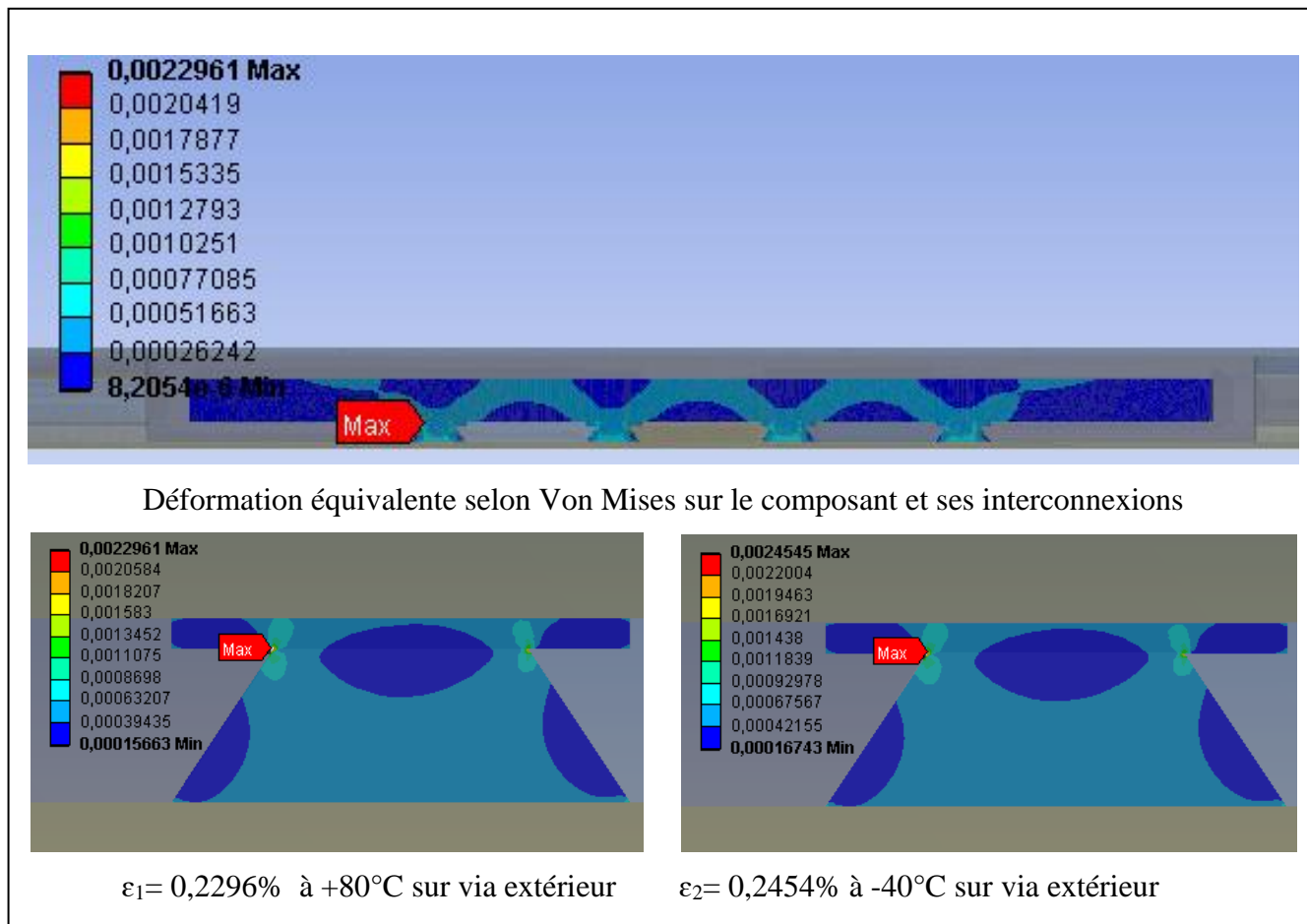


Figure III-15 Déformation linéaire élastique sur le via à $+80^\circ\text{C}$ et -40°C

Les coins supérieurs des vias sont les zones les plus contraintes et les vias les plus contraints sont les vias extérieurs. Cette tendance concorde avec les résultats des joints de brasure et s'explique par la flèche de déformation due aux variations de température. Dans le cas de propriétés linéaires, il est à noter que la contrainte repasse par une valeur nulle à la température de référence $T_{\text{ref}} = 22^\circ\text{C}$. De plus, chaque cycle amène à considérer une déformation totale relative de $\Delta\varepsilon = 0,475\%$ selon les critères de l'équivalence de Von Mises. La simplification faite est $\|\Delta\varepsilon\| = \|\varepsilon_1\| + \|\varepsilon_2\|$ avec ε_1 et ε_2 les résultats à T_{max} et T_{min} . Cette simplification apporte une surévaluation de $\|\Delta\varepsilon\|$ car $\|\Delta\varepsilon\| \leq \|\varepsilon_1\| + \|\varepsilon_2\|$. La durée de vie sera donc sous-évaluée. Le report de ce résultat sur la courbe de Manson-Coffin-Basquin sélectionnée (ECAP 1 Cu, Figure III.13) conduit à une **durée de vie de 3500 cycles** (cf. Figure III.16). Il est à noter qu'il aurait fallu ne prendre en compte que les paramètres de Basquin pour respecter l'hypothèse linéaire élastique, les paramètres de Coffin-Manson considérant la plasticité des matériaux. Cependant une durée de vie quasi nulle aurait été

déterminée. Rappelons que la déformation totale, la somme des déformations élastiques, plastiques et thermiques s'écrit sous la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_{th} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} \quad (III.7)$$

Or l'hypothèse d'un régime linéaire élastique amène à $\varepsilon_p = 0$ donc :

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_{th} \quad (III.8)$$

Nous avons fait le choix d'injecter la déformation totale équivalente de Von Mises dans l'équation pour rester dans une évaluation la plus critique possible.

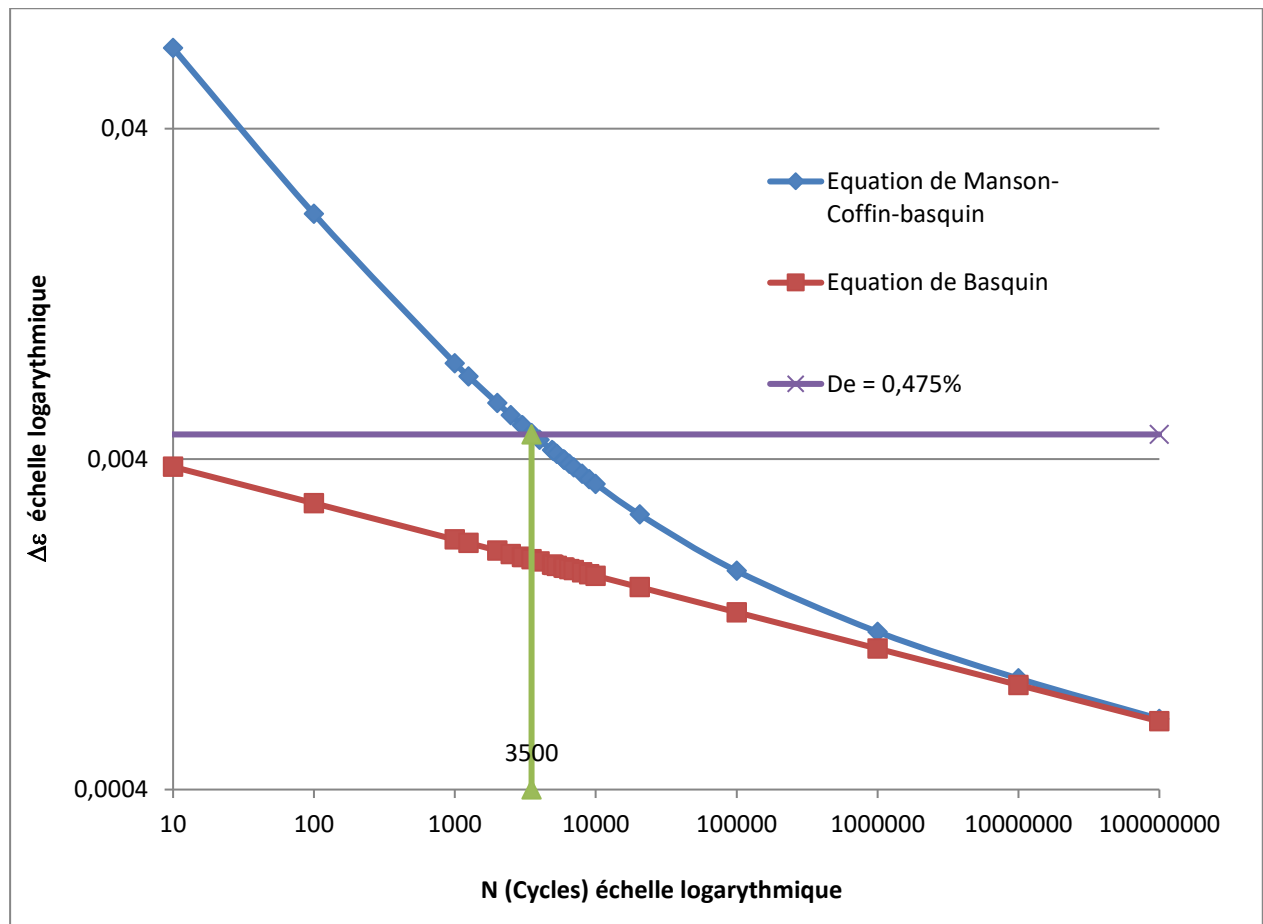


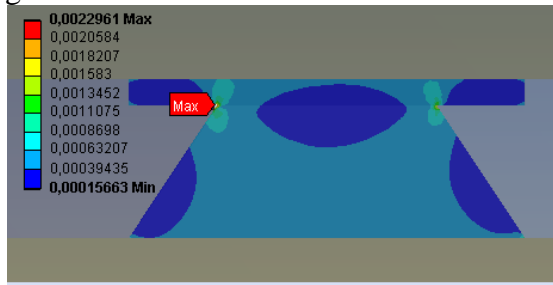
Figure III-16 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime linéaire

III.3.2.2 Propriétés non-linéaires

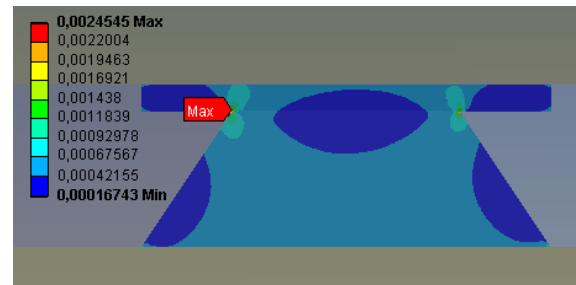
Le passage des propriétés en régime non-linéaire dans les simulations va grandement augmenter le temps de calcul. Un nombre de cycles plus important est en outre nécessaire. En effet, là où tous les cycles sont identiques en régime linéaire, la déformation plastique va induire une accommodation de la structure à la contrainte (cf. Figure III.17). Il devient alors nécessaire alors soit de mener les simulations jusqu'à stabilisation des cycles soit de parvenir à évaluer la convergence. La figure III.17 met en avant la déformation totale qui se manifeste sur les vias au cours d'un cycle.

Déformation équivalente selon Von Mises

Régime linéaire :

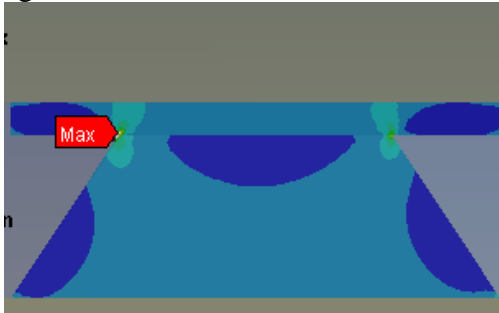


à +80°C sur un via

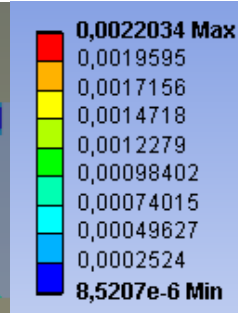


à -40°C sur un via

Régime Non-linéaire :



à +80°C sur un via (cycle 25)



à -40°C sur un via (cycle 25)

Figure III-17 Déformation totale sur le via à +80°C et -40°C en linéaire et en non-linéaire au 25^{ème} cycle

Evidemment, la tendance s'avère être similaire qu'en régime linéaire élastique, de même que le motif de déformation, comme le montre la figure III.18 qui compare les résultats de simulation en régime linéaire et non-linéaire (aux 5^{ème} et 25^{ème} cycles) à la température maximale de 353K. La figure III.19 montre l'évolution de la déformation totale par cycle en fonction du cycle aboutissant à une convergence de $\Delta \epsilon = 0,42\%$ de déformation totale par cycle. Ainsi, une **durée de vie de 5000 cycles** est estimée par injection de ce résultat dans la courbe de Manson-Coffin-Basquin (cf. Figure III.20).

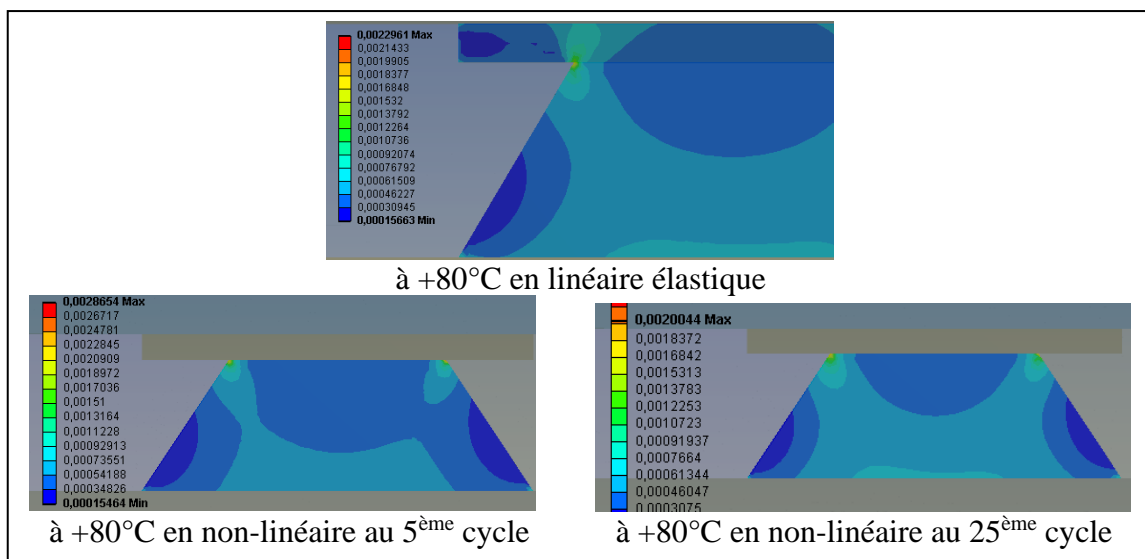


Figure III-18 Résultats de simulation centrés sur la zone à risque en régime linéaire et non-linéaire à 80°C aux 5^{ème} et 25^{ème} cycles.

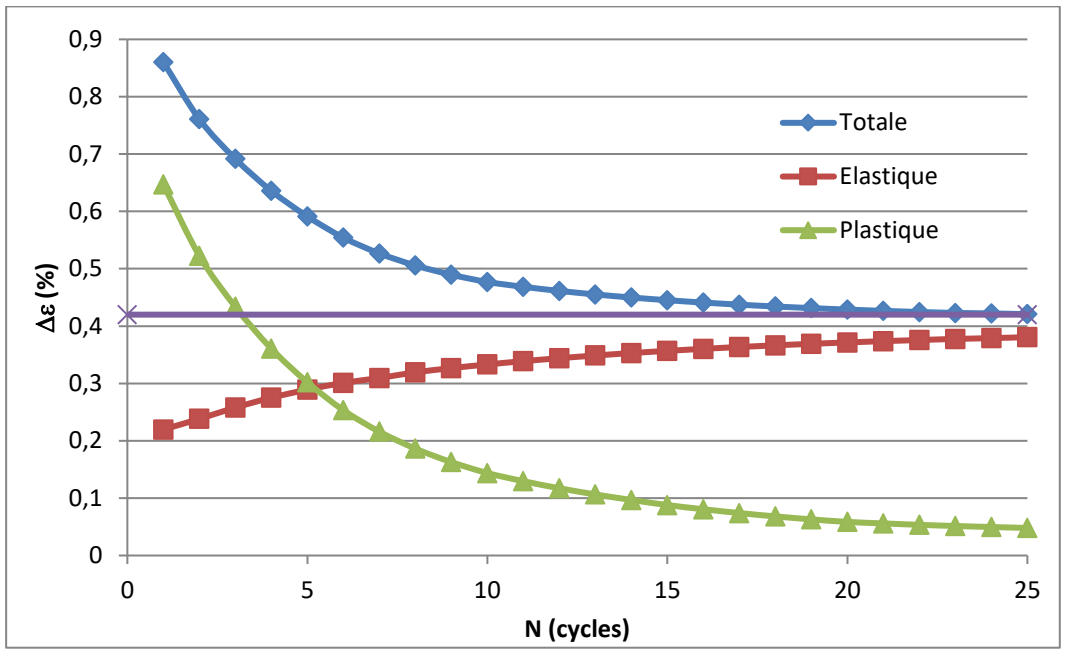


Figure III-19 Résultats de simulation de la déformation par cycle en fonction du cycle

Le constat est que la déformation est plus importante en tenant compte de la non-linéarité des propriétés dans les premiers cycles mais très rapidement la déformation par cycle devient plus faible. La dissymétrie du via est également plus apparente dans les premiers cycles avec une déformation plus importante vers l'extérieur du composant. La déformation se propage également vers le cœur du via. Les résultats semblent montrer une convergence de $\Delta\epsilon$ mais celle-ci survient tardivement. Il est donc gourmand en ressources de simuler l'ensemble des cycles jusqu'à la convergence. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer la convergence avec un nombre de cycles réduit.

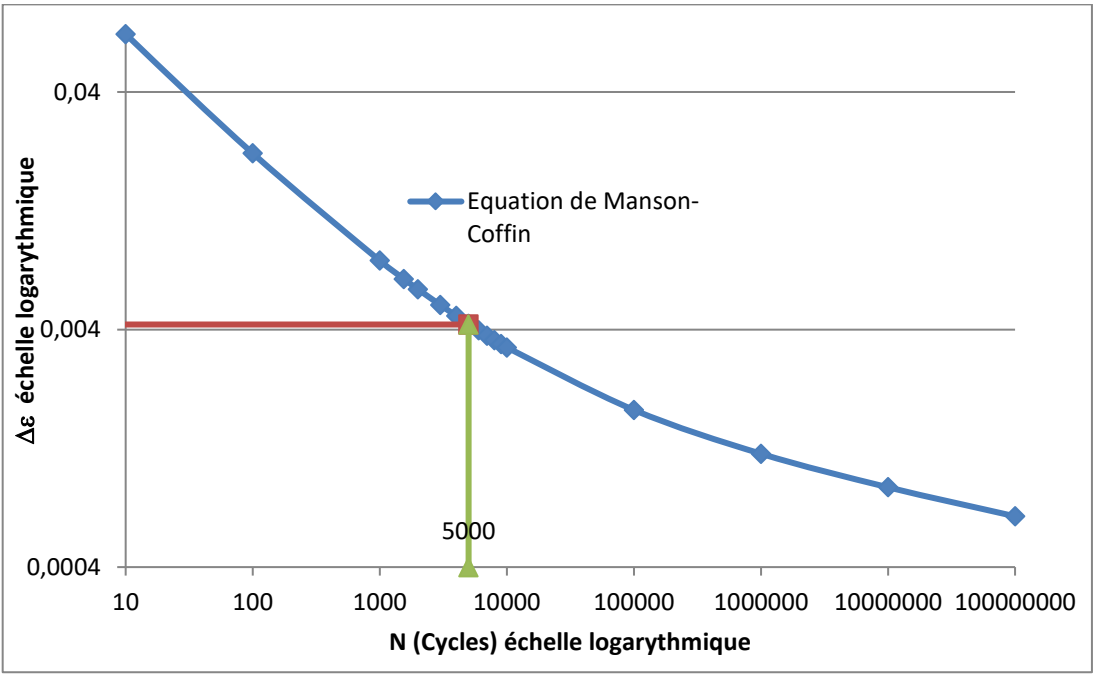


Figure III-20 Injection du résultat sur la courbe de Manson-Coffin en régime non-linéaire

L'observation de la dérivée de $\Delta\varepsilon$ en fonction de N est l'élément utilisé pour démontrer la convergence : celle-ci tend vers 0. Après une dizaine de cycles à $<10^{-4}\%$ nous considérons que la convergence est atteinte, les résultats des calculs étant donnés avec une précision de $10^{-5}\%$. Ces variations peuvent donc être imputées au logiciel et non plus au phénomène physique. Les estimations de convergence ont été faites en considérant une équation différentielle d'ordre 2 avec une dérivée seconde constante. Lorsque la convergence est atteinte la dérivée première atteint 0. L'élément particulier à mettre en avant est la légère croissance de $\Delta\varepsilon$ après la décroissance des 25-30 premiers cycles. Cela coïncide avec $|d\Delta\varepsilon/dN| < 2.10^{-3}\%$ qui pourrait concorder avec la précision des calculs. En effet, la répétition des simulations a montré une variance de $5.10^{-3}\%$ dans $\Delta\varepsilon$. Comme le montre le tableau III.7, 25 cycles semblent suffisants pour parvenir à la convergence en régime non-linéaire avec une erreur relative de l'ordre de 1%.

Tableau III-7 Divers résultats selon le nombre de cycles simulés

| Nombre de cycles simulés | $\Delta\varepsilon$ total au dernier cycle (%) | Convergence estimée de $\Delta\varepsilon$ total (%) | $d\Delta\varepsilon/dN$ (%) | N (cycles) Dernier/convergence |
|--------------------------|--|--|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0,86 ($\pm 2.10^{-2}$) | 0,86 | 0 | ~780 |
| 5 | 0,591 ($\pm 10^{-2}$) | 0,471 | -0,044 | ~2000/~3680 |
| 10 | 0,476 ($\pm 5.10^{-3}$) | 0,448 | -0,0126 | ~3550/~4250 |
| 25 | 0,421 ($\pm 5.10^{-3}$) | 0,418 | -0,0014 | ~5000/~5150 |
| 50 | 0,422 ($\pm 5.10^{-3}$) | | $\sim 10^{-4}$ | ~5000 |

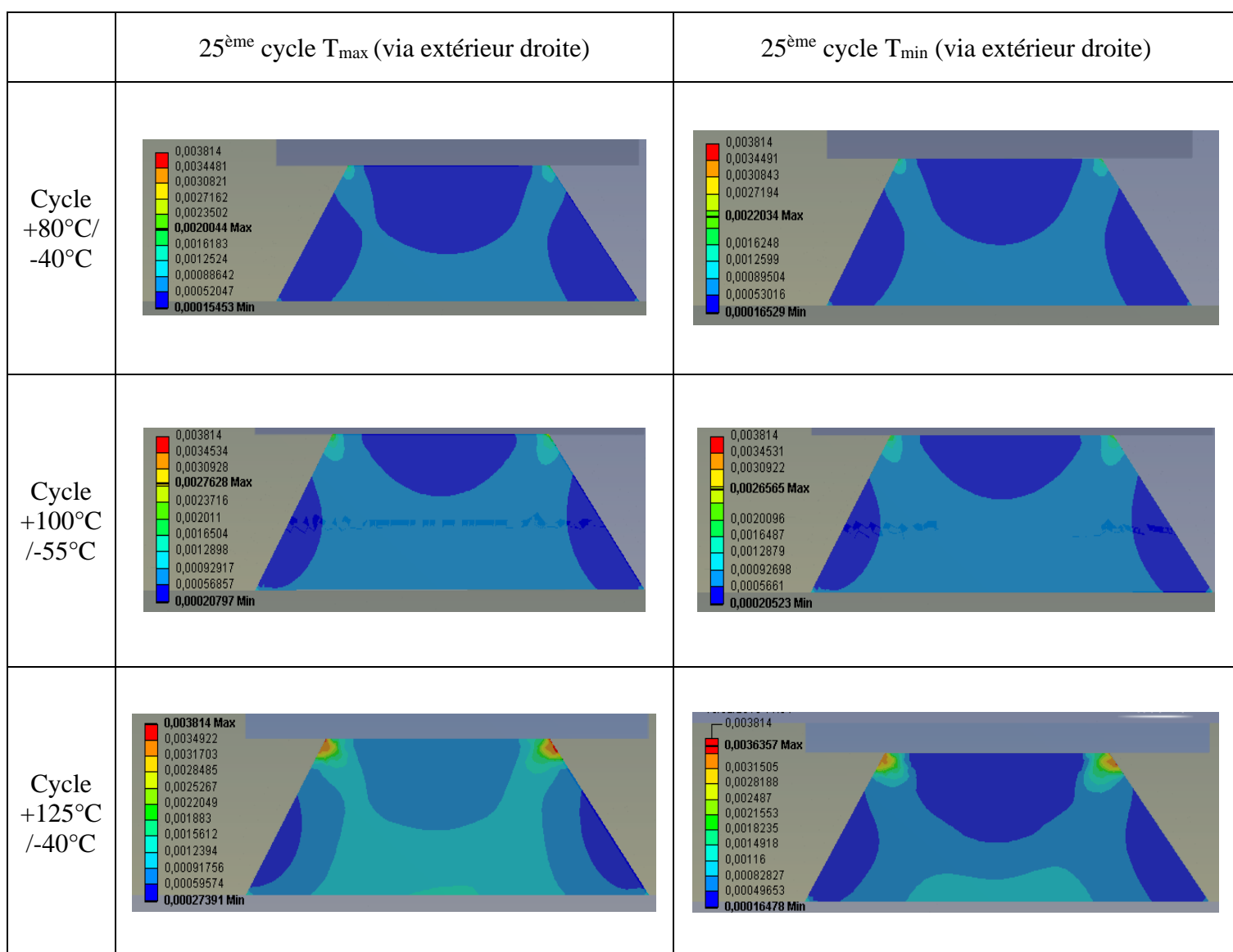
III.3.2.3 Paramétrages des cycles de température

Le choix des cycles de température dépend grandement des spécifications du circuit et des composants. Les conditions de température, les durées des paliers et les vitesses d'échauffement et de refroidissement affectent les résultats des tests. Respecter les conditions de fonctionnement du circuit serait l'idéal mais parfois difficile à évaluer. Les conditions propres au prototype développé seront abordées dans le chapitre 4 ainsi que la méthodologie pour convertir les résultats de cycles thermiques en durée de vie « réelle ». Le tableau III.8 présente les résultats de simulation pour trois profils de températures avec les mêmes conditions de temps (cf. Figure III.3), tandis que la figure III.21 compare l'évolution de la déformation selon le cycle et le tableau III.9 compare l'état du via critique dans les trois cas non-linéaires au 25^{ème} cycle.

Tableau III-8 Evaluation de la durée de vie en fonction du cycle appliqué

| Méthode | $\Delta\varepsilon$ total (%) | N (cycles) | Temps de simulation (heures) |
|--------------------------|-------------------------------|------------|------------------------------|
| Linéaire 80°C/-40°C | 0,475 ($\pm 5.10^{-3}$) | 3500 | 0,15 (pour 5 cycles) |
| Non-linéaire 80°C/-40°C | 0,42 ($\pm 5.10^{-3}$) | 5000 | 13,5 (pour 25 cycles) |
| Non-linéaire 100°C/-55°C | 0,54 ($\pm 5.10^{-3}$) | 2500 | 16 (pour 25 cycles) |
| Non-linéaire 125°C/-40°C | 0,766 ($\pm 5.10^{-3}$) | 1050 | 20 (pour 25 cycles) |

Tableau III-9 Mise en avant des différences entre les cycles de température (résultats à échelle identique)



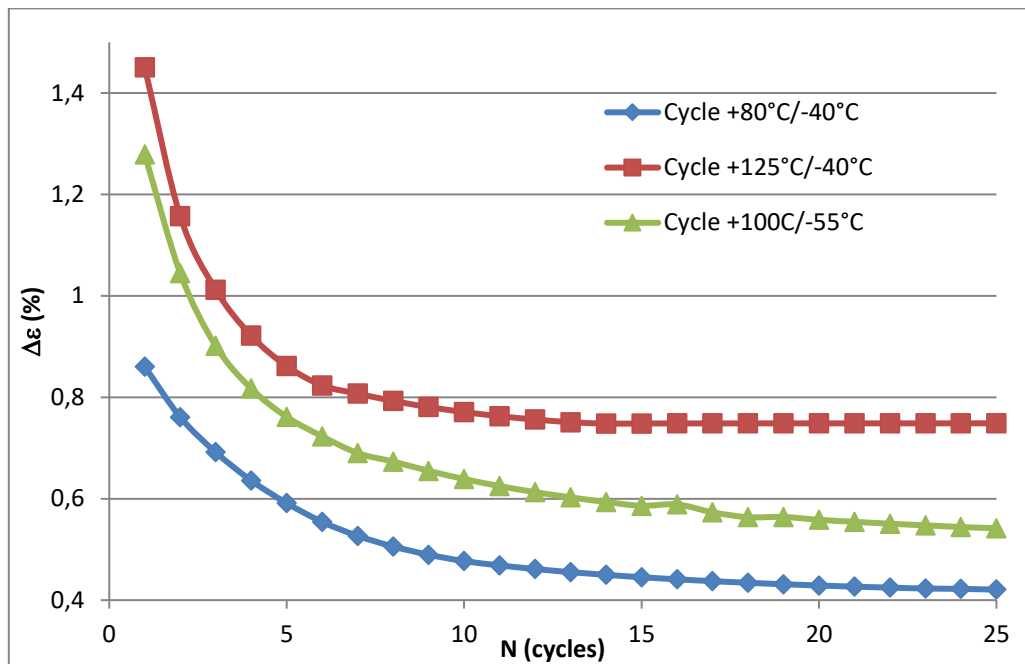


Figure III-21 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du cycle de température en régime non linéaire

Sans surprise un plus grand écart de température implique une plus grande déformation par cycle mais augmente également le temps de calcul. En revanche, cette augmentation n'est pas linéairement dépendante de ΔT . Cela s'explique par les dépendances en température intégrées aux matériaux et notamment la résine qui voit son module de Young diminuer avec la hausse de température. La résine devenant plus souple, les vias sont plus libres de se déformer.

Enfin, les résultats du cycle +125°C/-40°C ne seront pas pris en compte puisque les limites de fonctionnement des composants enfouis dans le cadre du projet sont comprises entre 105°C et 125°C.

III.3.2.4 Influence du composant : taille, nombre et distance des interconnexions

Dans le cadre du projet EDDEMA, trois composants actifs seront enfouis : la mémoire Flash, le processeur STV et le régulateur de tension L5965. Les simulations précédentes ont été réalisées sur la mémoire Flash qui est le composant le moins volumineux qui compte le moins d'interconnexions. Il est donc maintenant nécessaire d'étudier l'influence du composant lui-même sur la durée de vie. Les trois éléments qui diffèrent sont la taille des composants (en particulier la longueur représentée dans le plan), le nombre d'interconnexions et la distance entre ces interconnexions. Ces éléments sont présentés dans le tableau III.10. Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau III.11. A noter que dans une optique d'optimisation des simulations, pour les composants plus grands que sont le L5965 et le STV 0991, une symétrie est appliquée au milieu du composant.

Tableau III-10 Spécifications des composants

| Composant | Dimensions | Nombre entrées/sorties | Distance min entre vias |
|-----------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| Flash | 3,5 mm x 2 mm x 0,15 mm | 8 (4x2) | 400µm |
| L5965 | 3,9 mm x 4,2 mm x 0,15 mm | 45 (8x8) | 320µm |
| STV | 5,5 mm x 5,5 mm x 0,15 mm | 196 (14x14) | 180µm |

Tableau III-11 Résultats de simulation selon le composant et le régime considéré

| Spécifications | $\Delta\varepsilon$ (%) | N (Cycles) |
|----------------------------------|-------------------------|------------|
| Flash Linéaire 80°C/-40°C | 0,475 | 3500 |
| Flash Non-linéaire 80°C/-40°C | 0,42 | 5000 |
| L5965 Linéaire 80°C/-40°C | 0,425 | 4900 |
| L5965 Non-linéaire 80°C/-40°C | 0,382 | 6700 |
| STV 0991 Linéaire 80°C/-40°C | 0,50 | 3000 |
| STV 0991 Non-linéaire 80°C/-40°C | 0,41 | 5300 |

Plus le composant est gros, plus il y a d'entrées/sorties, et plus la distance entre les interconnexions est faible. Il apparaît difficile de conclure indépendamment sur l'effet de la taille du composant et de la distance entre les vias. En effet, c'est la mémoire Flash, le composant le plus petit avec l'écart entre les vias le plus important, qui voit sa déformation la plus importante dans les vias en régime non-linéaire mais le composant L5965, qui présente des tailles et une distance entre les vias intermédiaires, a la déformation la plus basse. Par ailleurs un espace réduit entre les vias semble induire une plus grande déformation plastique (résultat du composant STV). Dans tous les cas, la phase d'accommodation des vias (cf. Figure III.22) dure environ 25 cycles pour les trois composants. En revanche, l'effet de la position du via sous le composant devient significatif lorsque le composant grossit. Le via extérieur est clairement plus déformé que le via central, comme on peut le voir sur la figure III.23.

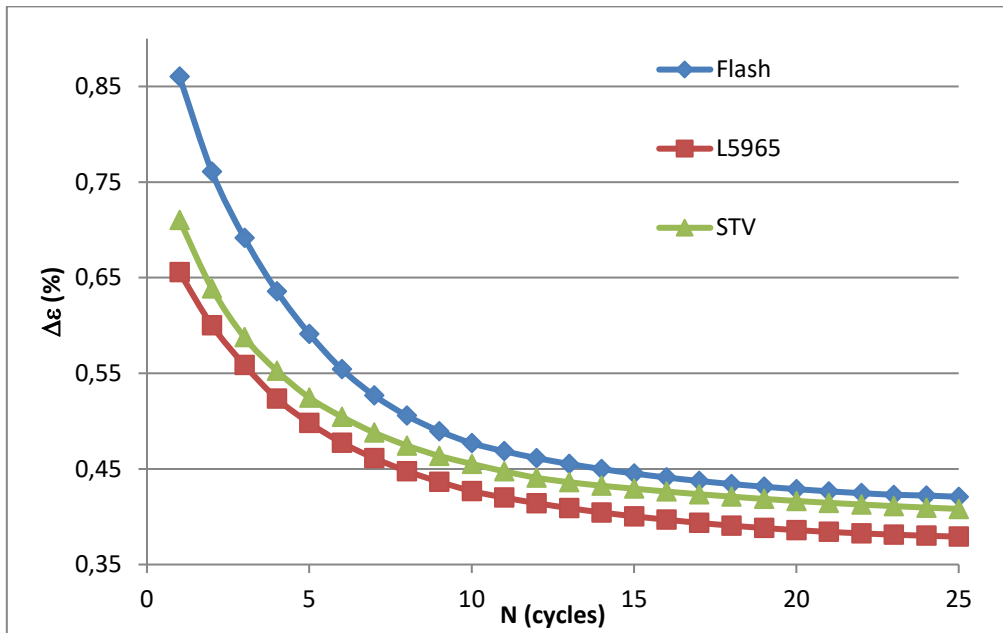


Figure III-22 Résultats de simulation de la déformation équivalente totale par cycle en fonction du composant

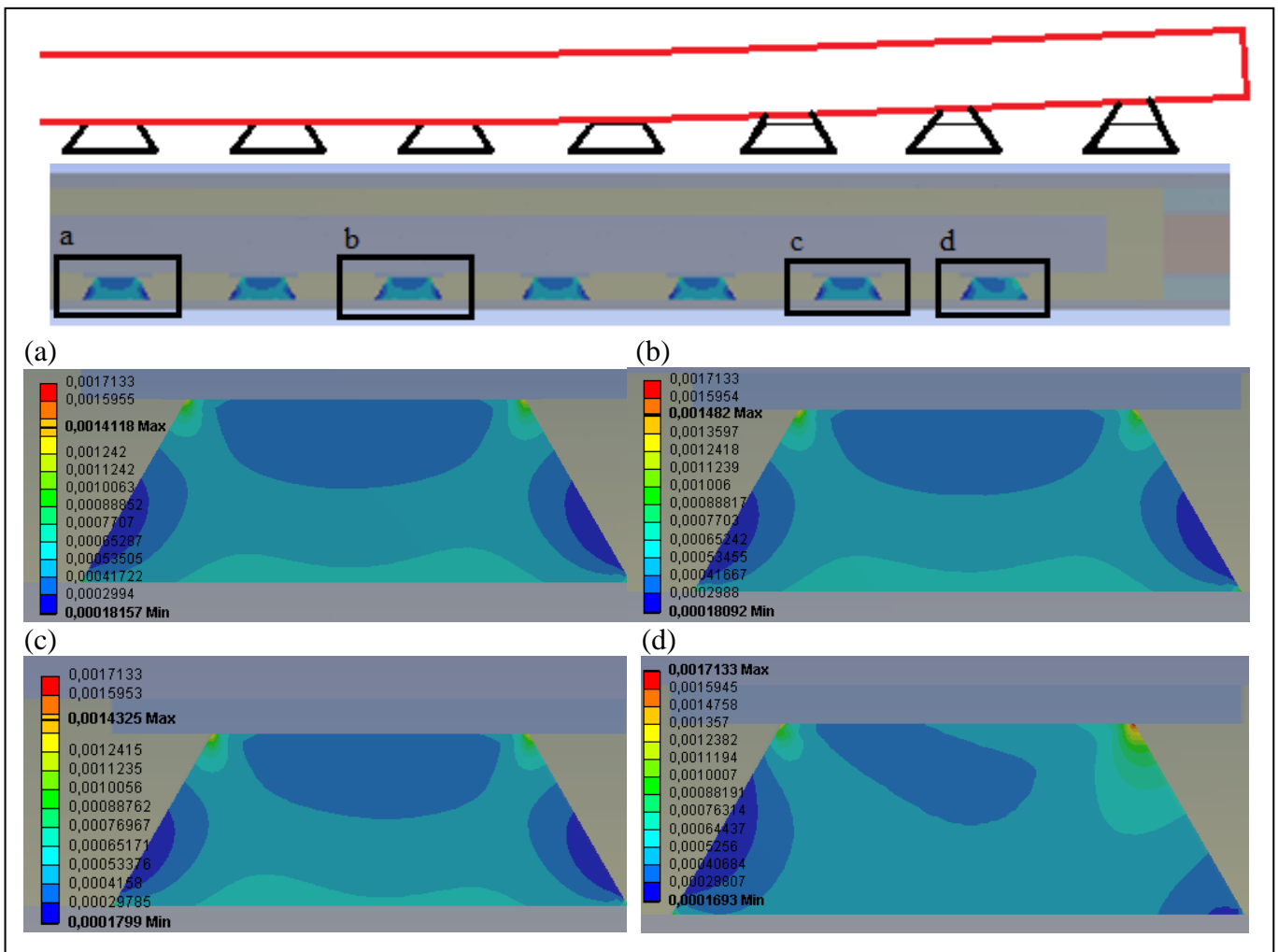


Figure III-23 Schéma du fléchissement du composant et mise en avant des différences de déformation des différents vias du composant STV du via central sous le composant (a) au via extérieur (d)

Sur le via extérieur (d), la déformation s'étend davantage vers l'extérieur. Cette tendance existe encore sur le via (c) d'à côté mais de façon bien moins prononcée et tend à s'équilibrer en se rapprochant du centre. Ces observations s'expliquent en partie par le fléchissement du composant qui affecte bien plus les vias extérieurs en tirant sur l'interconnexion.

III.4 Etude 3D de l'assemblage avec des vias

La suite logique des travaux est de confronter les résultats de simulation en 2D avec des simulations 3D. L'étude en 3 dimensions allonge énormément le temps de calcul comme nous l'avons déjà montré lors de l'étude avec les brasures. De plus, dans le cadre des vias, comme nous l'avons déjà mentionné, il sera nécessaire de simuler plus que les trois cycles de la méthode de Darveaux en régime non-linéaire pour assurer la convergence, démultipliant les ressources nécessaires. La comparaison avec les simulations 2D permettra d'en déterminer les limites physiques et ainsi de statuer sur leur validité et donc leur intérêt.

Dans le cadre des simulations 3D, les vias sont de forme cylindrique. A l'image des études menées sur les brasures, une double symétrie est appliquée sur la mémoire Flash : seul le quart de la structure est donc modélisé (cf. Figure III.24).

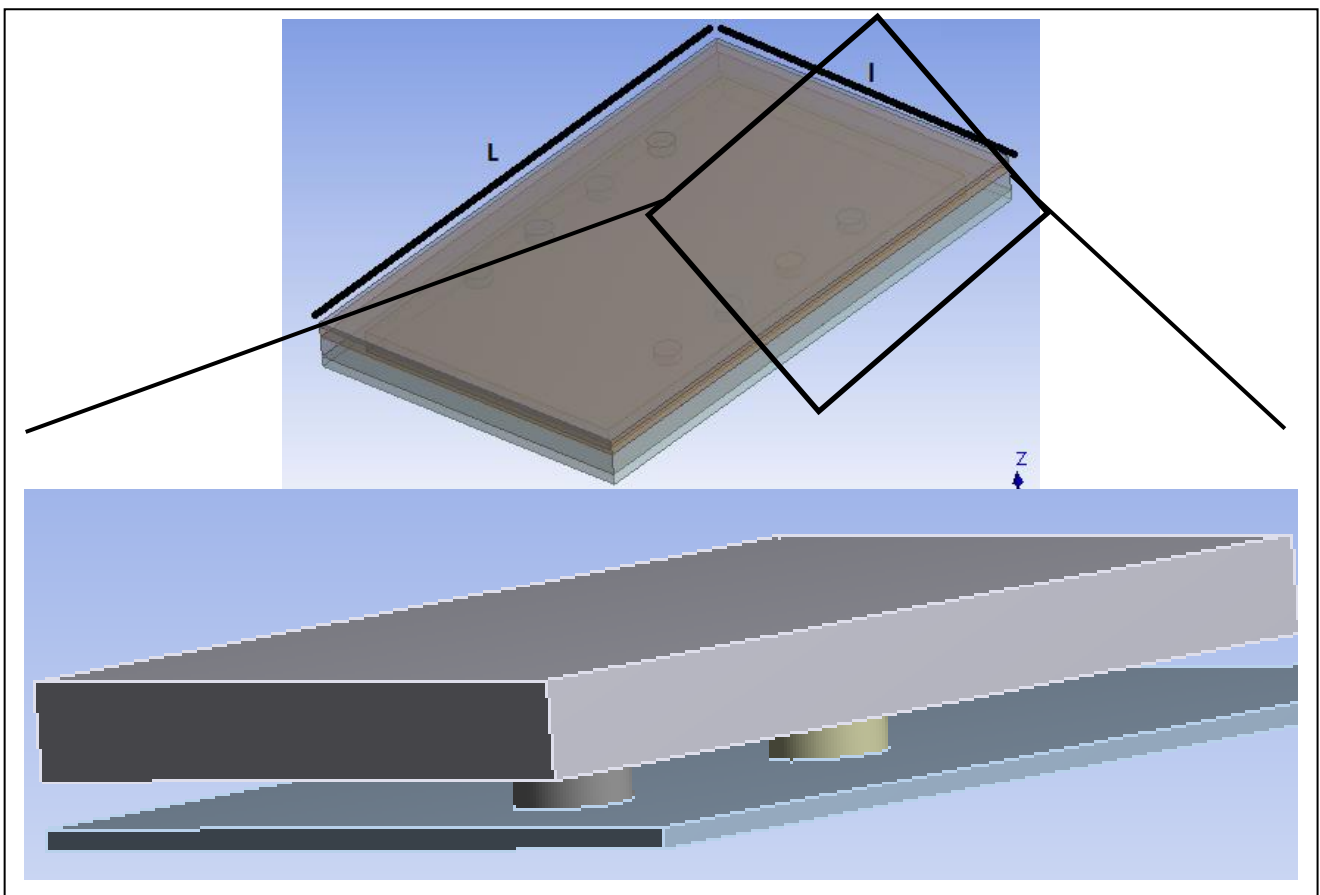


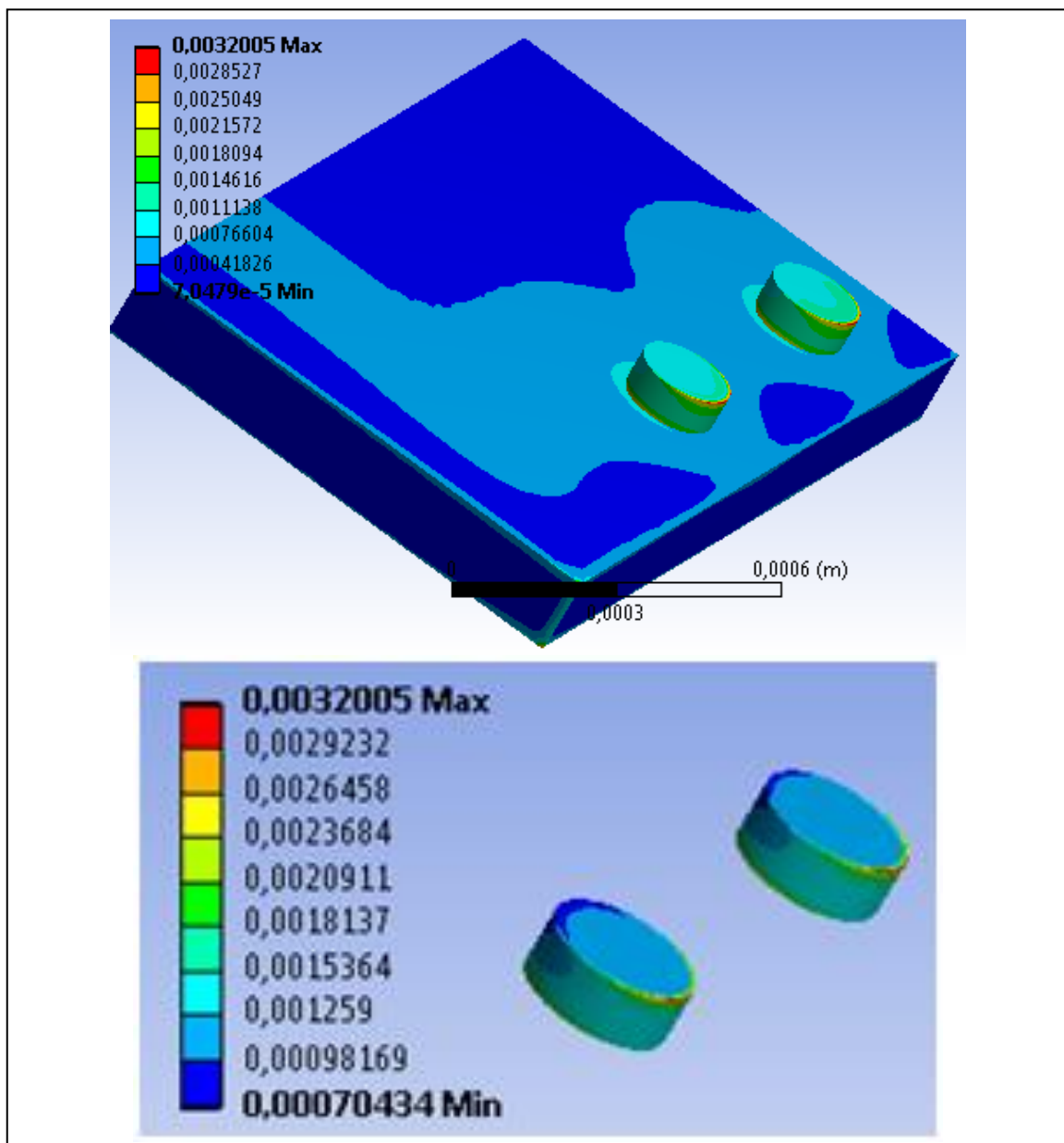
Figure III-24 Structure 3D de la mémoire Flash, via cylindrique droit et double symétrie

III.4.1 Résultats de simulation

III.4.1.1 Propriétés élastiques linéaires

La figure III.25 montre l'aspect général de la déformation sur les vias et sur le composant à +80°C en linéaire. Le premier point à noter est que la déformation la plus importante apparaît dans la largeur l du composant et non dans sa longueur L (cf. Figure III.24) qui a été représentée en 2 dimensions. Ceci, appuie le critère d'espacement entre les vias sur la déformation comme élément déterminant.

La figure III.26 reprend quatre vues précises pour discussion des résultats. Les figures III.26.a et b sont des vues du dessus et du dessous des vias tandis que les figures III.26.c et d sont des vues en coupe dans le sens de la longueur et dans le sens de la largeur.



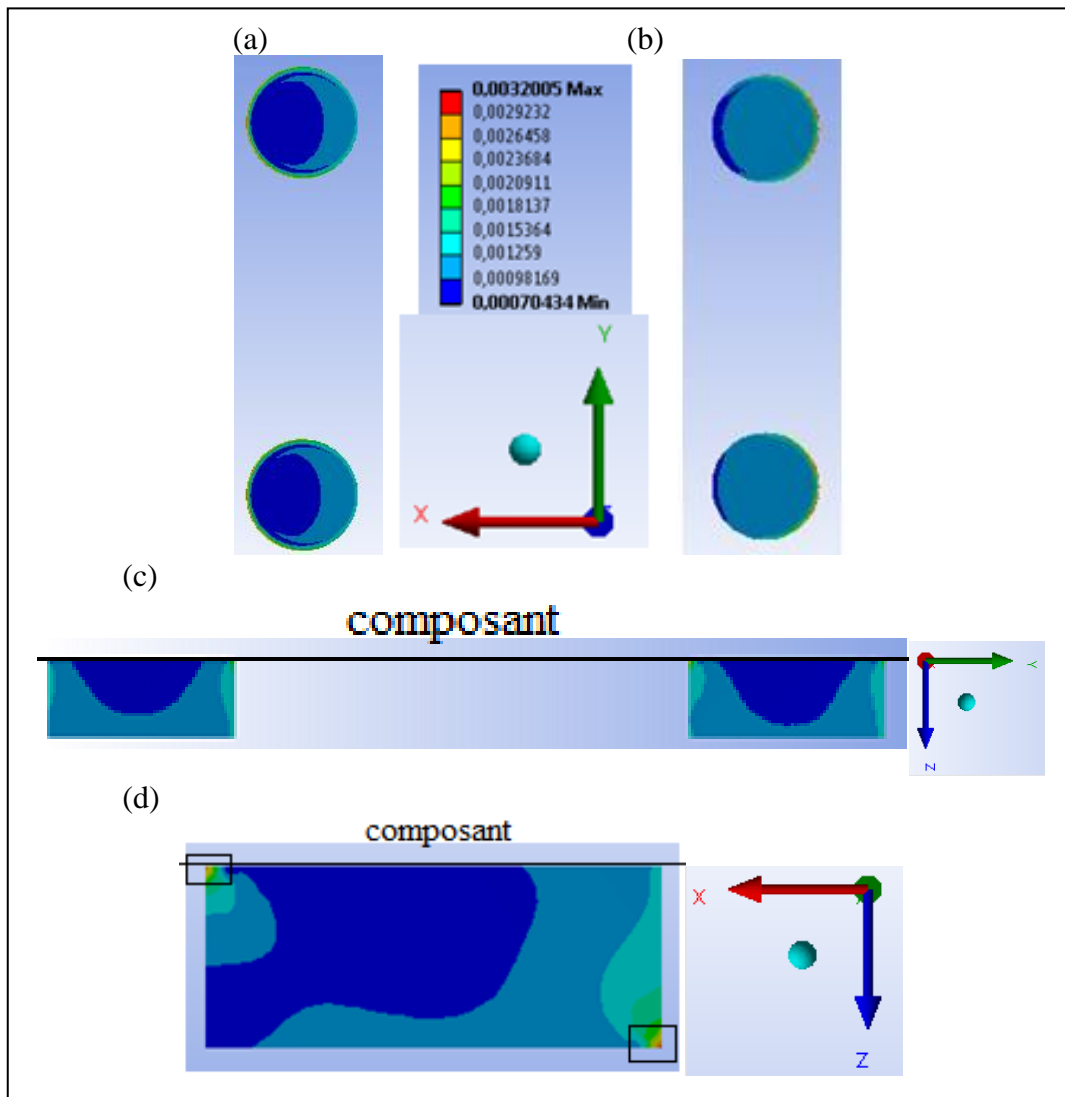


Figure III-26 Déformation à +80°C dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe le sens de dans la largeur

Il est important à de noter que les résultats en 3D dans le sens de la longueur rappellent les résultats obtenus en deux dimensions mais avec une géométrie différente (cylindre droit). En revanche, dans le cas du composant Flash, il apparait que la déformation la plus importante est observée dans le sens de la largeur. Les contraintes sont bien plus importantes dans ce sens-là et le via subit une déformation en raison du fléchissement du composant. Dans le sens de la longueur la densité de vias est plus importante, l'effet de fléchissement est donc amoindri.

Ce phénomène rappelle la discussion apportée dans le cadre des composants fictifs de la partie précédente ajoutée à la géométrie du cylindre droit. La figure III.27 illustre l'effet d'ancrage apporté par les vias sur le composant dans le cadre des déplacements selon la hauteur (axe z).

Le modèle de Manson-Coffin-Basquin sera appliqué à la déformation maximale dans les directions Y (longueur) et X (largeur) (cf. Tableau III.12), la première sera ainsi comparée aux résultats en 2D.

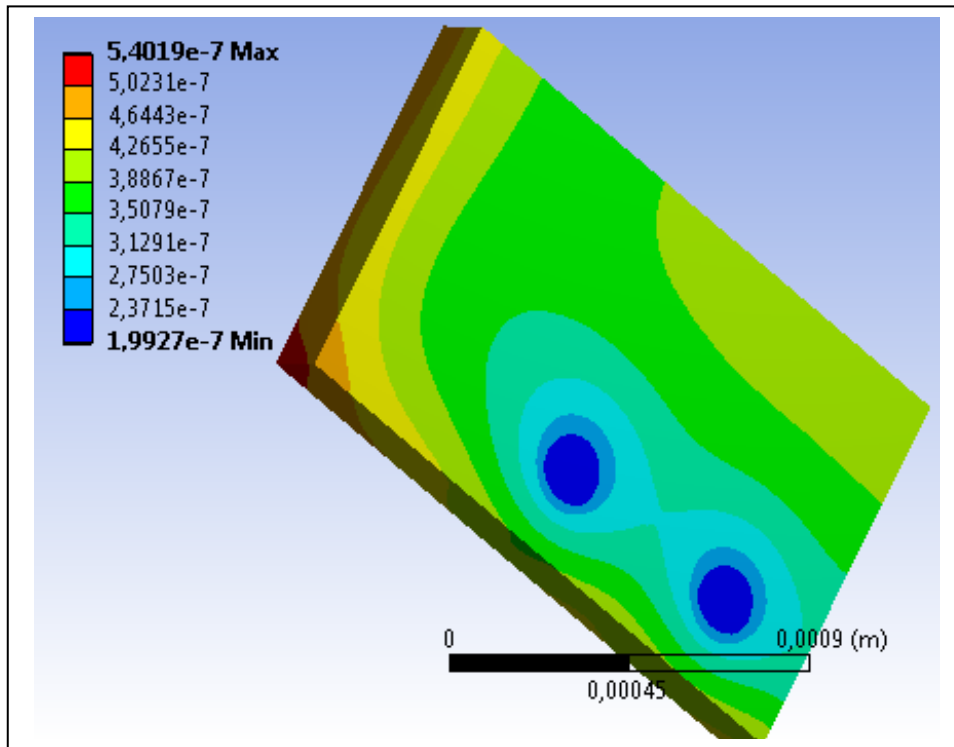


Figure III-27 Déplacement (en m) en mètre selon l'axe z du composant

Tableau III-12 Résultats de simulation selon l'axe d'étude

| | $\Delta\varepsilon$ (%) | N (cycles) |
|-----------------------------------|-------------------------|------------|
| 2D linéaire (équivalent longueur) | 0,475 | 3500 |
| 3D longueur (axe Y) | 0,45-0,47* | 4200-3600 |
| 3D largeur (axe X) | 0,66 | 1500 |

*Fourchette due au maillage qui n'est pas aligné avec le milieu du via

L'étude 3D en régime linéaire prouve ainsi la pertinence de l'étude en 2D pour un composant ne présentant pas de symétrie selon sa diagonale. La déformation de la simulation 2D est légèrement supérieure et conduit donc à une durée de vie inférieure. En revanche, le point critique (cf. Figure III.26.d) apparaît dans la direction présentant le plus grand espace entre deux vias, c'est-à-dire la largeur. Par conséquent, cette direction serait à privilégier pour des simulations 2D dans le cas de composants avec peu d'interconnexions.

III.4.1.2 Propriétés non-linéaires

Les phénomènes observés en 3D non linéaire sont globalement les mêmes que pour les simulations en 2D. La période d'accommodation est toujours présente faisant augmenter significativement le temps de calcul en raison des 3 dimensions. La figure III.28 fait le bilan des résultats de simulation au 25^{ème} cycle tandis que le tableau III.13 compare la déformation maximale des résultats en régimes linéaire et non-linéaire.

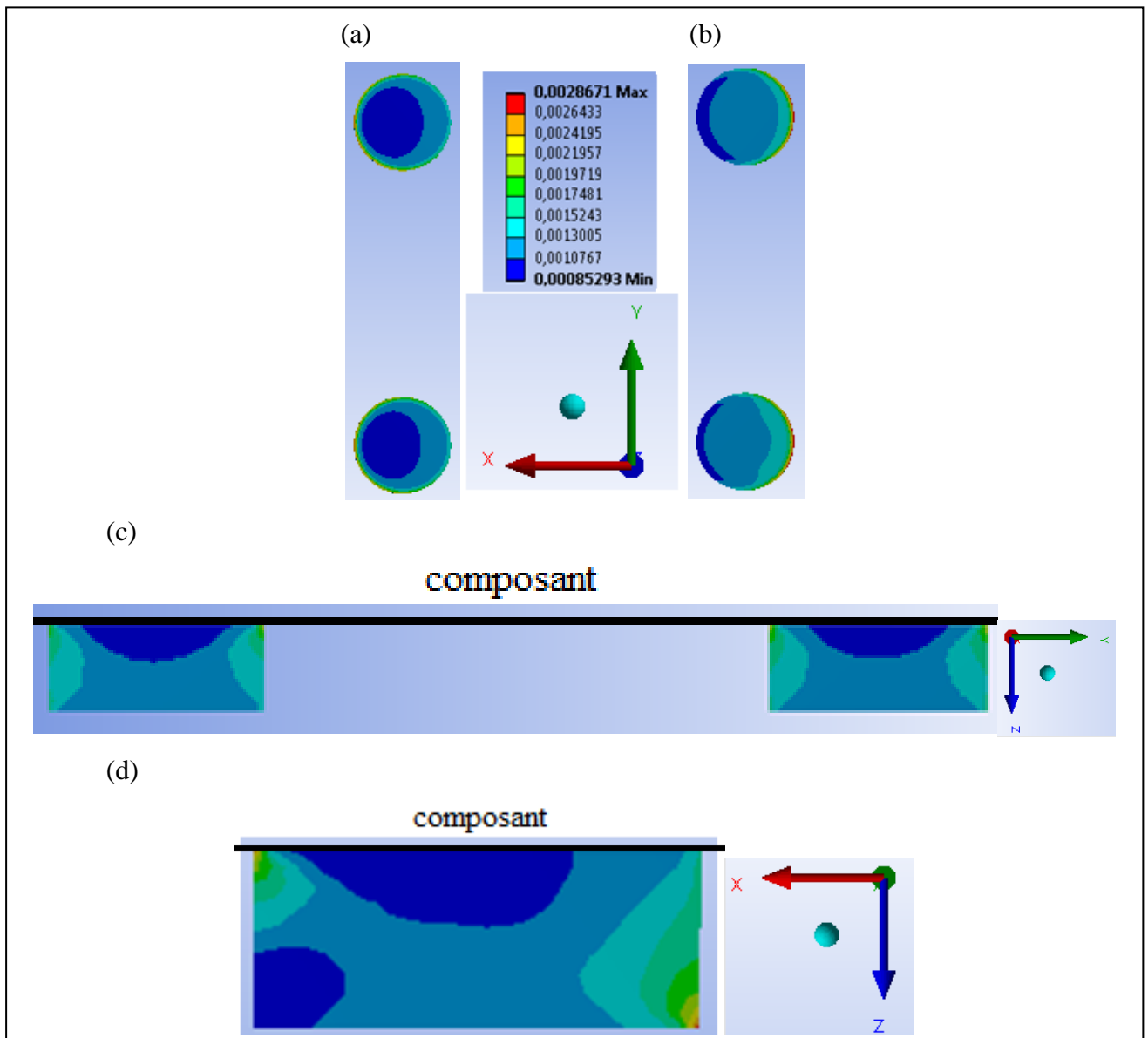


Figure III-28 Résultats en non-linéaire de la déformation à +80°C au 25^{ème} cycle dans les vias (a) vue du dessus, (b) vue du dessous, (c) vue en coupe dans le sens de la longueur et (d) vue en coupe dans le sens de la largeur

Les conclusions des simulations en 3D en régime non linéaire sont similaires aux conclusions en 2D : le point de convergence est obtenu pour une déformation plus faible qu'en linéaire et la zone de déformation est plus étendue sur le via.

Tableau III-13 Comparaison des résultats Linéaire (L) et Non-linéaire (NL) selon l'axe d'étude

| | $\Delta\varepsilon$ (%) | N (cycles) |
|------------------------|-------------------------|------------|
| 3D L longueur (axe Y) | 0,45-0,47* | 4200-3600 |
| 3D NL longueur (axe Y) | 0,39-0,42* | 6300-5000 |
| 3D L largeur (axe X) | 0,66 | 1500 |
| 3D NL largeur (axe X) | 0,53 | 2600 |

*Fourchette due au maillage qui n'est pas aligné avec le milieu du via

Naturellement, l'écart relatif entre les résultats en régime linéaire et non-linéaire est plus important pour une déformation initiale plus grande donc ici dans la largeur. En revanche, comme en 2D, les simulations linéaires amènent à des résultats plus pessimistes et peuvent donc être suffisants pour une étude théorique selon le cahier des charges. Dans le cas de composant ne présentant pas de symétrie, il est nécessaire de se montrer prudent et de privilégier l'étude 3D pour prévenir d'une mauvaise interprétation.

III.4.1.3 Paramétrages des cycles de température

L'observation des cycles de température révèle les mêmes tendances qu'en simulation 2D (cf. Tableau III.14). De plus, il faut noter que le nombre de cycles indiqués ne tient pas compte du facteur d'accélération de vieillissement, induit par le choix du cycle conduisant à la durée de vie du circuit. Ce facteur d'accélération sera présenté dans le chapitre IV.

La figure III.29 met en avant la déformation critique pour les trois cycles de température. Nous constatons que le via est d'autant plus déformé que la température augmente. Il faut bien sûr rappeler que le cycle $+125^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}$ dépasse la plage de température maximale de fonctionnement des actifs considérés dans ce projet.

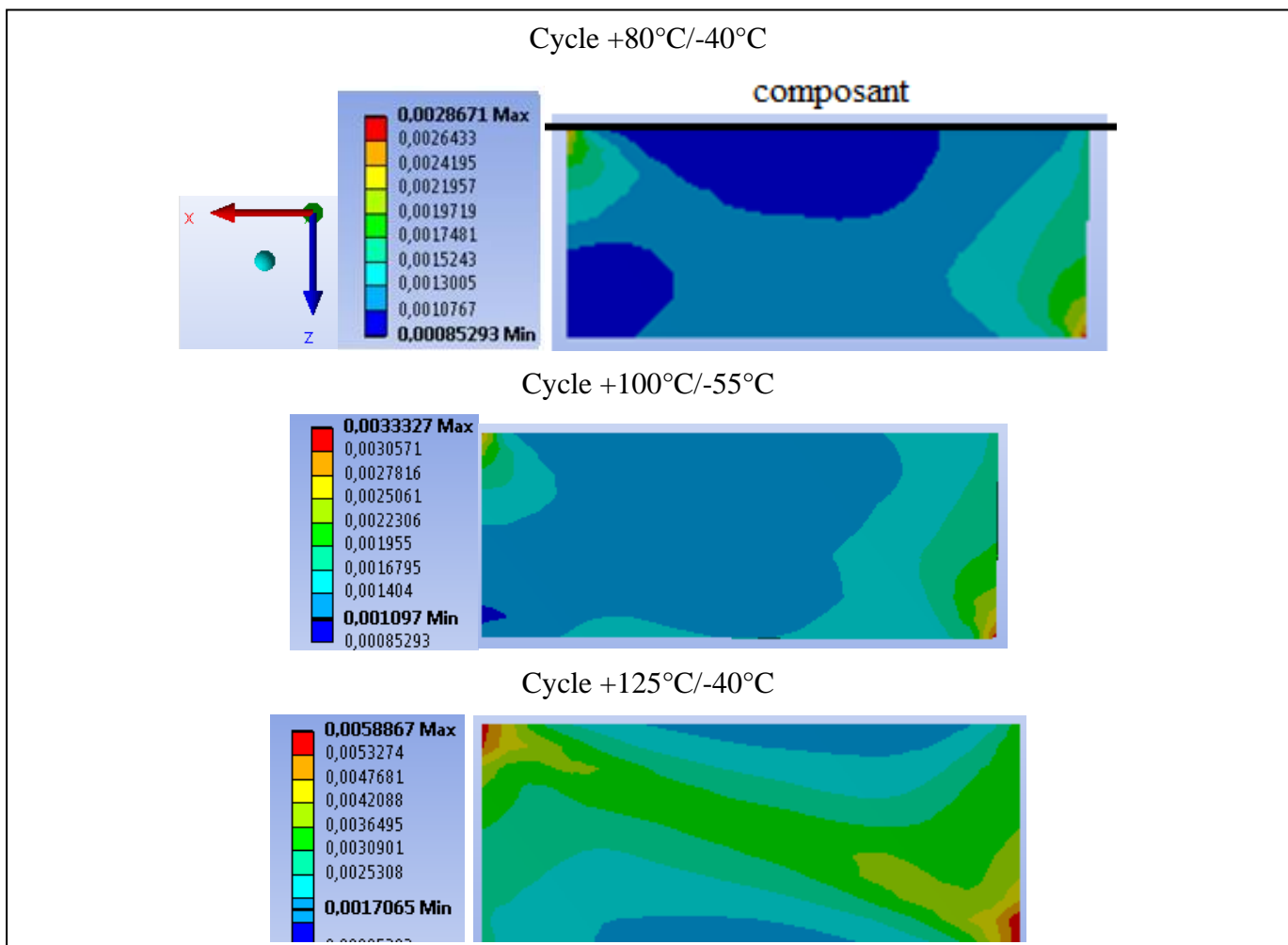


Figure III-29 Vue en coupe de la déformation sur le via extérieur dans le sens de la largeur du composant Flash au 25^{ème} cycle

Tableau III-14 Résultats de simulation en mode non-linéaire selon les cycles de température

| | $\Delta\varepsilon$ (%) | N (cycles) |
|--------------|-------------------------|------------|
| +80°C/-40°C | | |
| 3D longueur | 0,39-0,42* | 6300-5000 |
| 3D largeur | 0,53 | 2600 |
| +100°C/-55°C | | |
| 3D longueur | 0,49-0,52* | 3200-2800 |
| 3D largeur | 0,676 | 1400 |
| +125°C/-40°C | | |
| 3D longueur | 0,78-0,82* | 1000-900 |
| 3D largeur | 1,223 | 350 |

*Fourchette due au maillage qui n'est pas aligné avec le milieu du via

III.4.1.4 Influence du composant

Le composant Flash est le composant présentant la plus grande dissymétrie dans la répartition des vias tandis que le composant STV est celui dont la répartition est la plus homogène (cf. Figure III.30.a). Dans la mesure où les simulations des composants plus grands sont très gourmandes en ressources et en espace de stockage, les simulations menées en mode non-linéaire se limitent à 10 cycles de température, uniquement sur le composant STV, le plus grand, pour démontrer la faisabilité de ces simulations.

La figure III.30.b présente l'aspect des déformations sur les vias à +80°C lors du 10^{ème} cycle de température. Les vias intérieurs présentent, comme attendu, un aspect homogène tandis que les vias situés sur les bords ont une déformation accentuée vers l'extérieur, les vias des coins étant les plus critiques. La figure III.31 présente une vue en coupe des vias localisés sur la diagonale du composant.

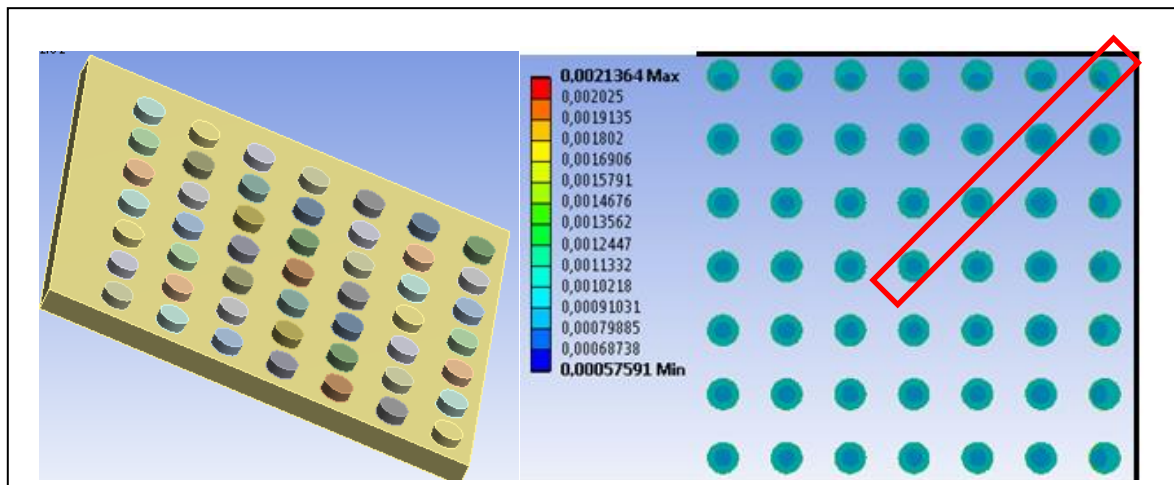


Figure III-30 (a) Répartition des vias sur le composant STV (1/4 de la structure) et (b) Vue du dessus de la déformation des vias à +80°C au 10^{ème} cycle avec encadré les vias étudiés

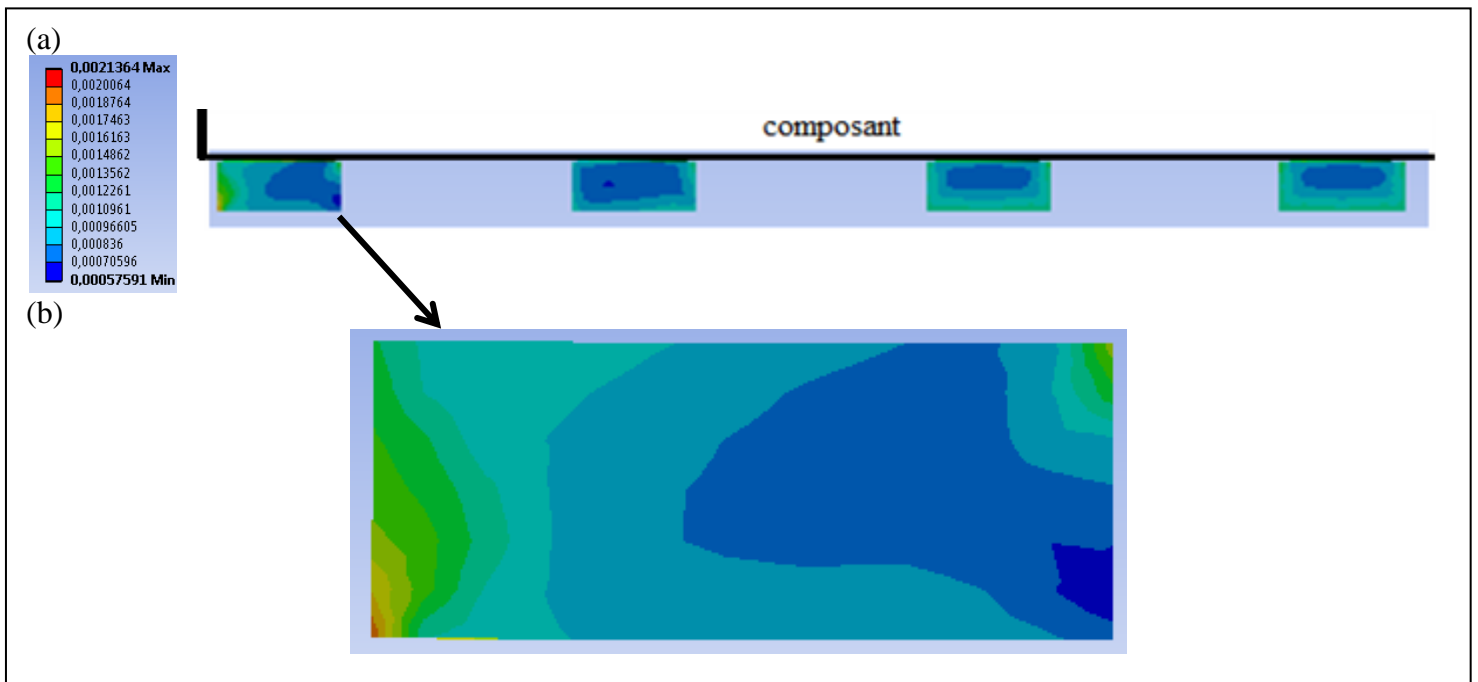


Figure III-31 Vue en coupe de la déformation (a) dans les 4 premiers vias (encadré précédemment) de la diagonale du composant (b) dans le via formant le coin

L'aspect général de la déformation rappelle les résultats précédents (cf Figure III.23) avec des coins supérieurs fortement déformés et une base plus homogène. Seul le via du coin présente une déformation différente orientée du sommet supérieur vers le sommet inférieur (cf Figure III.31.b). La différence par rapport aux simulations en 2D est l'aspect droit des vias. Celui-ci homogénéise la déformation sur la hauteur cf. Figure 31.a) tandis que l'aspect conique en 2D concentre d'avantage la déformation sur le haut du via (cf. Figure III.23). Dans tous les cas, le tableau III.15 présente les résultats comparatifs de l'estimation de la durée de vie des vias du composant STV selon la méthode employée.

Tableau III-15 Bilan des résultats de simulation pour le composant STV selon la méthode employée

| Méthode | $\Delta\varepsilon$ (%) | N (cycles) |
|---------------------------------|-------------------------|------------|
| STV 2D Linéaire | 0,50 | 3000 |
| STV 2D Non Linéaire (25 cycles) | 0,41 | 5300 |
| STV 3D Non linéaire (10 cycles) | 0,41 | 5300 |

En définitive, les tendances observées sont les mêmes quel que soit le composant mais les limites du logiciel apparaissent à travers les temps de simulations.

III.4.2 Bilan comparatif : via 3D, via 2D et brasure

Les simulations apportent de précieuses informations sur les tendances de comportement dans les assemblages. Tout d'abord, relativement aux résultats obtenus précédemment, il est observé que la modélisation 2D avec des propriétés mécaniques linéaires offre un résultat rapide, cependant moins précis que le modèle tenant compte de la non-linéarité des propriétés. L'avantage est que cette imprécision mène à un nombre de cycles pessimiste qui peut être utilisé comme limite critique. Si ce résultat est suffisant pour le cahier

des charges, il est inutile de pousser plus loin l'étude. De plus, dans le cadre d'une méthode unique, les différences de résultats entre les modèles 3D et 2D sont moindres si le composant présente une répartition homogène d'interconnexions. Les différences majeures ont été observées pour le composant Flash puisque l'étude 2D portait sur l'axe relatif à la longueur du composant.

Ensuite, il faut précisément pointer les différences et ressemblances observées dans les différentes simulations présentées.

Le premier point qui se retrouve quel que soit le modèle est la localisation des zones critiques « fragiles » : ce sont les interfaces entre les interconnexions et les pistes et plus généralement le haut des vias. La figure III.32 met en avant ce point pour les différentes simulations menées. Les similarités de la déformation entre le via 2D et la vue en coupe dans la longueur du via 3D sont également bien présentes.

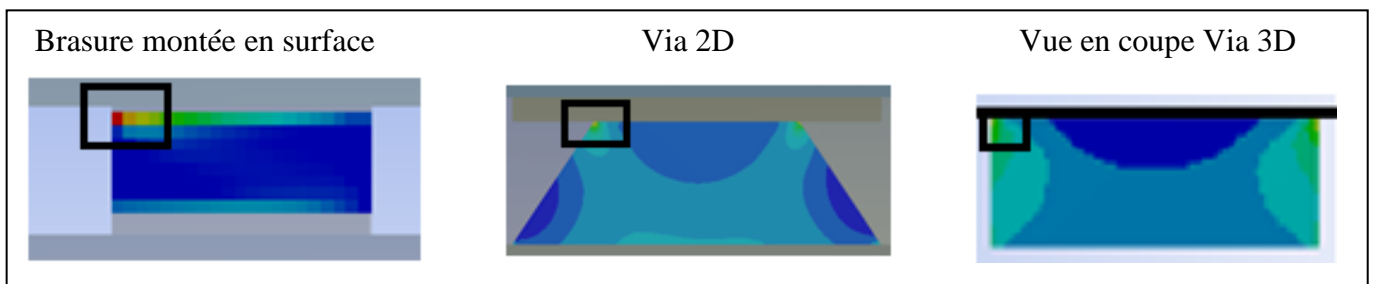


Figure III-32 Localisation des points critiques pour chacun des cas simulés

Il faut également revenir sur les ressemblances entre la brasure enfouie et le via enfoui. Les deux modèles 3D mettent en avant la déformation dans la largeur du composant Flash. Le constat est que ce sont bien les mêmes zones qui sont affectées (cf. Figure III.33) malgré les différences de géométrie.

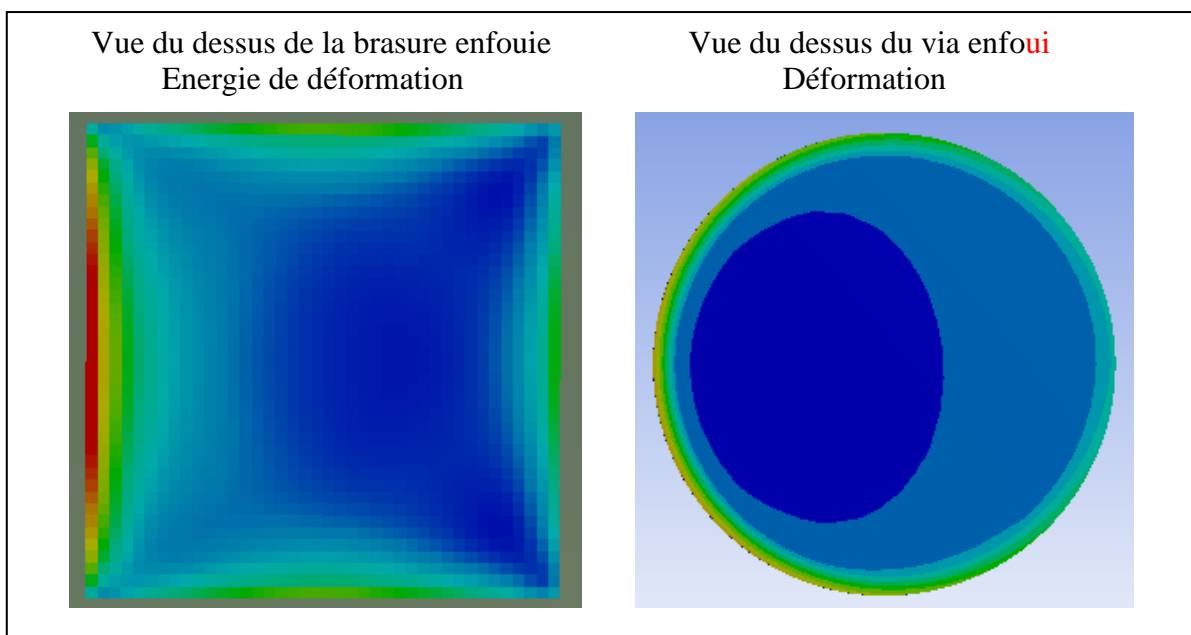


Figure III-33 Répartition de l'énergie de déformation de la brasure enterrée et de la déformation du via enterré

Des différences dans les estimations tendent cependant à montrer le gain occasionné par la structure enfouie avec vias sur les autres modes d'interconnexion (cf. tableau III.16). En utilisant la théorie de vieillissement accéléré qui sera explicitée dans le chapitre IV, le nombre de cycles tenus théorique permet de conclure quant au gain attendu du composant enfoui avec vias sur le composant monté avec des brasures.

Tableau III-16 Comparaison des méthodes d'interconnexion

| Méthode d'interconnexion | Cycles | Durée de vie (cycles) |
|--|--------|-----------------------|
| Brasure montée en surface (+80°C/-40°C) | 663 | 78.10 ³ |
| Brasure montée en surface (+80°C/-40°C) | 2000 | 235.10 ³ |
| Brasure enfouie MCL-E-700G (+80°C/-40°C) | 3400 | 400.10 ³ |
| Via 2D Non-linéaire (+80°C/-40°C) | 3500 | 190.10 ⁶ |
| Via 3D Non-linéaire (+80°C/-40°C) | 2600 | 97.10 ⁶ |

Il est à noter que, même si les performances (cycles tenus pour le cycle +80°C/-40°C) de la brasure enfouie avec le pré-imprégné MCL-E-770G semblent se rapprocher des vias 2D et sont supérieures à celles obtenues avec les vias 3D, les durées de vie, tenant compte du vieillissement accéléré, démontrent l'avantage des vias et surpassent très largement les 15 années de fonctionnement attendues. Le calcul du facteur d'accélération du vieillissement sera abordé dans le prochain chapitre.

De plus, les contraintes dues à la fabrication n'ont pas été prises en compte. Or les brasures subissent le procédé d'enfouissement impactant la durée de vie contrairement aux vias qui sont créés après l'assemblage. Cependant les vias et les brasures ne réagissent pas de manière identique aux étapes de fabrication qu'ils subissent. Des contraintes sont également apparues quant à l'utilisation des pré-imprégnés que nous discuterons dans le chapitre suivant.

III.5 Résultats complémentaires

En plus d'étudier des composants réels qui sont utilisés dans le cadre du projet, il est possible d'adapter à des modèles imaginaires pour évaluer l'influence de paramètres en particulier pour affiner la méthodologie d'étude développée. C'est pourquoi deux études ont été menées en supplément. Ces études sont par ailleurs menées en 2D puisqu'il a été vérifié que ce format respecte les tendances des modèles 3D. Sur le modèle de base du composant L5965, la distance entre les vias et la taille du composant (avec une même densité de vias)

feront l'objet de deux études. Le tableau III.17 présente les configurations sélectionnées pour les deux études.

L'objectif est de déterminer l'évolution des tendances selon les critères sélectionnés et d'observer les différences qui peuvent apparaître. Le tableau III.18 présente le nombre de cycles tenus par les interconnexions obtenu par les simulations selon la distance entre deux vias. Les variations sont faibles, à la limite de la précision liée à la répétabilité ($<5.10^{-3}\%$) des simulations si le nombre de vias est conservé. La déformation tend à augmenter avec la distance entre les vias, en particulier pour les vias intérieurs. Le via extérieur reste toujours le plus critique.

Tableau III-17 Paramétrages des simulations complémentaires

| Longueur du composant (mm) | Nombre de vias | Distance entre 2 vias (μm) | Distance entre le dernier via et le bord du composant (μm) |
|----------------------------|----------------|---|---|
| 4,2 | 4 | 900 | 350 |
| | 8 | 250 | 425 |
| | | 350 | 75 |
| | | 300 | 250 |
| 4,7 | 9 | | |
| 5,2 | 10 | | |

Tableau III-18 Résultats de simulation en fonction de l'écart entre les vias

| Distance entre 2 vias (μm) | $\Delta\varepsilon$ (%) (via intérieur) | $\Delta\varepsilon$ (%) (via extérieur) | N_{\min} (cycles) |
|---|---|---|---------------------|
| 250 | 0,31 | 0,38 | 6700 |
| 300 | 0,363 | 0,385 | 6500 |
| 350 | 0,38 | 0,39 | 6300 |
| 900 | 0,414 | 0,423 | 5000 |

Outre les différences de déformation totale, la figure III.34 met en avant les différences qui apparaissent en augmentant l'écart entre les vias. Ce sont les vias extérieurs qui présentent la plus grande variation même si la déformation de la base des vias augmente également. La hauteur de cette déformation apparaît de façon moindre dans l'écart de $900\mu\text{m}$ car la position du via intérieur sera plus proche de la position du second via et que la déformation de la base s'amenuise avec la distance au centre du composant. La zone la plus

déformée tend à s'étendre sur la hauteur du via quand la distance avec le bord du composant est diminuée.

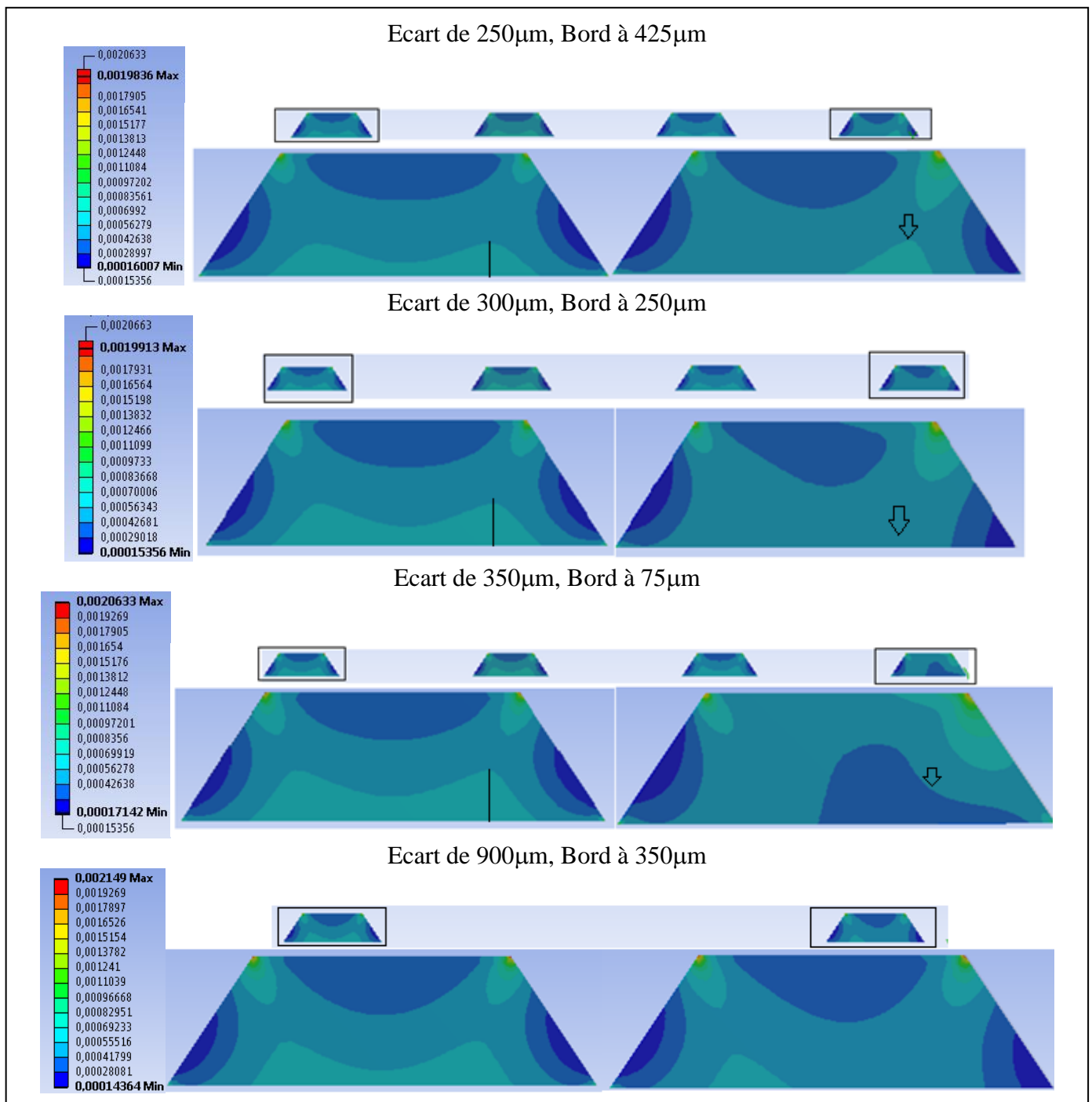


Figure III-34 Déformation des via intérieurs et extérieurs selon l'écart entre les vias

Ces résultats démontrent également la difficulté de contrôler l'ensemble des paramètres pour n'en modifier qu'un à chaque fois. Après la variation de l'écart entre les vias, le tableau III.19 présente les estimations de durée de vie selon la longueur du composant pour une même densité d'intégration.

De la même manière, le tableau III.19 présente les résultats en fonction de la longueur du composant en respectant la même densité de vias. Une légère augmentation est observée

avec la longueur du composant même si la différence n'est que peu significative au-delà de 4,7mm (cf. Figure III.35).

Tableau III-19 Résultats de simulation en fonction de la longueur du composant

| Longueur composant (mm) | $\Delta\varepsilon_{\max}$ (%) | N (cycles) |
|-------------------------|--------------------------------|------------|
| 4,2 | 0,382 | 6700 |
| 4,7 | 0,405 | 5600 |
| 5,2 | 0,406 | 5600 |

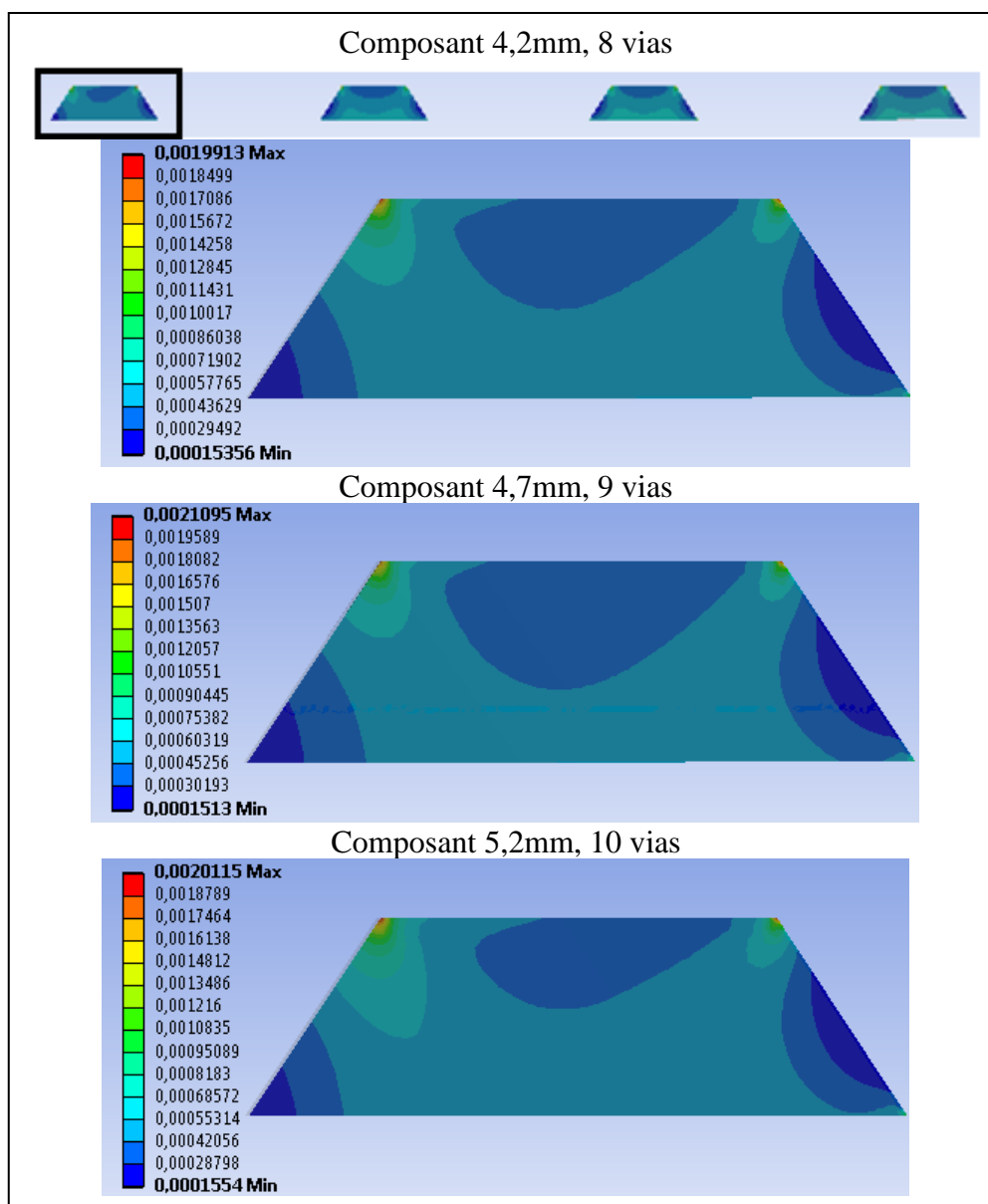


Figure III-35 Déformation sur le via extérieur en fonction de la longueur du composant

L'étude paramétrée du composant apporte un complément d'informations non négligeable. Deux facteurs sont ainsi fortement mis en avant sur la déformation : la distance entre les vias ainsi que la distance aux bords du composant. La longueur du composant semble perdre en influence en présence d'une forte densité de vias.

III.6 Conclusion

La méthodologie de simulation mise en place démontre plusieurs points. Tout d'abord, le bénéfice apporté par l'enfouissement des composants est mis en avant ainsi que le gain apporté par la mise en place de vias en remplacement de brasures. La brasure enfouie gagne en durée de vie par rapport au composant monté en surface. Les vias se sont également avérés plus résistants que les brasures dans des conditions d'enfouissement similaire sans même considérer les dommages de l'enfouissement sur les brasures. Ensuite, il a été évalué que les simulations usant de paramètres linéaires sont plus pessimistes dans l'évaluation de la fiabilité. Ainsi, si ces prédictions sont suffisantes, il est possible de gagner un temps précieux par cette modélisation. Dans le cas où les paramètres non-linéaires sont requis (estimation en linéaire insuffisante) pour estimer plus justement la durée de vie, il faut veiller à la convergence des résultats même si le résultat est exploitable dès qu'un critère d'estimation est dépassé selon le cahier des charges. Enfin, les simulations 2D ont démontré des résultats satisfaisants et proches des simulations 3D avec un gain de temps significatif dans la mesure où les dimensions critiques étaient correctement identifiées.

En revanche aucune règle de conception simple ne s'est dégagée par l'étude des trois composants du projet. Par conséquent, un protocole de simulation a été établi pour identifier l'influence de certains paramètres. Ainsi, la distance entre les vias et la distance entre le bord du composant et les vias extérieurs semblent être les paramètres les plus impactants. Pour une même densité de vias la longueur du composant semble bien moins affecter le comportement. Ces résultats permettent de définir les interconnexions (composant et position) de composants enfouis limitant la fiabilité au sein d'une structure.

L'ensemble de ces modèles repose sur l'hypothèse que la cavité, creusée dans le cœur du circuit pour accueillir le composant et la résine qui l'entoure, et son composant sont isolés. Or la réalité impose de vérifier l'impact de la structure entière. Il est donc maintenant nécessaire d'étudier plus précisément le comportement du composant dans son environnement qu'est le circuit développé au sein du projet : l'impact de la position des composants au sein de l'architecture et l'impact sur les estimations réalisées sur les interconnexions seront au cœur du dernier chapitre.

III.7 Références bibliographiques

[Bal-17] M. Balmont, I. Bord-Majek and Y. Ousten, "Comparative FEM thermo-mechanical simulations for built-in reliability: Surface mounted technology versus embedded technology for silicon dies," 2017 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, Warsaw, 2017, pp. 1-6. DOI : 10.23919/EMPC.2017.8346867 Available : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8346867&isnumber=8346823>

[Bas-10] Basquin, O.H. "The exponential law of endurance tests", Proceedings of ASTM, Vol. 10(II), Pages 625-630, 1910

[Boe-08] L. Boettcher, D. Manassis, A. Ostmann, S. Karaszkiwicz and H. Reichl, "Embedding of Chips for System in Package realization - Technology and Applications," 2008 3rd International Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference, Taipei, 2008, pp. 383-386. DOI: 10.1109/IMPACT.2008.4783892 Available : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4783892&isnumber=4783791>

[Che-14] Walide Chenniki, Isabelle Bord-Majek, Bruno Levrier, Komkrisd Wongtimnoi, Jean-Luc Diot et Yves Ousten « FEM simulations for built-in reliability of innovative Liquid Crystal Polymer-based QFN packaging and Sn96.5Ag3Cu0.5 solder joint », 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2014, 978-1-4799-4790-4/14/\$31.00 ©2014 IEEE

[Dar-00] R. Darveaux, « Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation », Proceedings of 50th Electronic Components & Technology Conference, p. 1048–1058, May 2000

[Fat] "CYCLIC DEFORMATION & STRAIN-LIFE (ϵ -N) APPROACH", Ali Fatemi, University of Toledo , https://www.efatigue.com/training/Chapter_5.pdf

[Har-17] Muhammad Faiz Harun, Roslina Mohammad, Norazli Othman, Astuty Amrin, Shreshivadasan Chelliapan, "METHODS FOR ESTIMATING THE FATIGUE PROPERTIES OF UNS C70600 COPPER-NICKEL 90/10", International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), Volume 8, Issue 11, November 2017, pp. 413–422, Article ID: IJMET_08_11_046 Available online at <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=11> ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359

[Lee-00] W.W. Lee, L.T. Nguyen, G.D Selvaduray, « Solder joint fatigue models: review and applicability to chip scale packages », Microelectronics Reliability, vol. 40, n°2, p. 231-244, Feb. 2000

[Luk-74] P. Luka' s', M. Klensil and J. Pola' k, Mater. Sci. Eng. 15 (1974) p.239.

[Man-65] Manson SS. Fatigue: a complex subject—some simple approximations. Experimental mechanics. 1965 Jul 24; 5(7):193-226.

[Mug-88] H. Mughrabi and R. Wang, Cyclic stress-strain response and high cycle behaviour of copper polycrystals, in Basic Mechanisms in Fatigue of Metals, P. Luká s̃ and J. Polá k, eds., Academia/Elsevier, Prague/Amsterdam, 1988, p.1.

[Par-95] Park J. and Song J., “Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties”, International Journal of Fatigue, Vol. 17, Pages 365-373, 1995

[Sch-13] R. Schwerz, B. Boehme, M. Roellig, K. -. Wolter and N. Meyendorf, "Reliability of embedding concepts for discrete passive components in organic circuit boards," 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, 2013, pp. 1243-1251. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575734

[Sye-04] A. Syed, "Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints," 2004 Proceedings. 54th Electronic Components and Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37546), Las Vegas, NV, USA, 2004, pp. 737-746 Vol.1. DOI: 10.1109/ECTC.2004.1319419

[Tes-73] Testin RA. Interim Report on Fatigue Behavior of High Hardness Nodular Cast Iron. University of Illinois; 1973 Mar.

[Uni-10] Partenaires UNIT, “Fatigue des matériaux et structures.” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Douai, 2010 https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/10226/mod_resource/content/0/Fatigue_papier.pdf

[Vin-11] Alexei Vinogradov, M. Maruyama, Y. Kaneko and S. Hashimoto, “Effect of dislocation hardening on monotonic and cyclic strength of severely deformed copper”, Philosophical Magazine 2011, 1–24, iFirst, DOI: 10.1080/14786435.2011.630693

Chapitre IV

Application au prototype du projet EDDEMA

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Table des figures : Chapitre IV | 144 |
| Table des tableaux : Chapitre IV | 146 |
| IV.1 Introduction | 148 |
| IV.2 Prototype développé..... | 148 |
| IV.2.1 Composants enfouis | 148 |
| IV.2.2 La fabrication du prototype..... | 151 |
| IV.2.3 Les conditions de fonctionnement | 153 |
| IV.3 Simulations sur les bases du prototype | 154 |
| IV.3.1 Positionnement des composants actifs..... | 154 |
| IV.3.2 Positionnement des composants actifs et passifs | 160 |
| IV.3.3 Sous-modèle de simulation | 164 |
| IV.4 Mesures expérimentales sur le prototype..... | 167 |
| IV.4.1 Evaluation de la fiabilité et de la robustesse | 167 |
| IV.4.2 Résultats expérimentaux | 169 |
| IV.6 Conclusion | 177 |
| IV.7 Références bibliographiques | 178 |

Table des figures : Chapitre IV

| | |
|---|------------|
| <i>Figure IV-1 Schéma du prototype avec en orange le couche de cuivre et en jaune les couches de pré-imprégnés : (a) Simplification prévue usant de la technologie d'enfouissement, (b) Schéma d'empilement du circuit 12 couches dans le cadre du projet EDDEMA avec deux couches d'accueil pour les composants enfouis.....</i> | <i>149</i> |
| <i>Figure IV-2 Etapes d'enfouissement des composants du projet avec les caractéristiques en température et en pression</i> | <i>151</i> |
| <i>Figure IV-3 Distribution des contraintes équivalentes dans le composant (a) à 20°C après le premier procédé d'enfouissement (sans via) (b) à 20°C après le second procédé d'enfouissement (avec via).....</i> | <i>152</i> |
| <i>Figure IV-4 (a) Plan d'expériences basé sur les simulations pour évaluer l'influence de la position des composants actifs entre eux (b) Architecture préliminaire pensée pour la couche d'accueil.....</i> | <i>155</i> |
| <i>Figure IV-5 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 1 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)</i> | <i>156</i> |
| <i>Figure IV-6 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 2 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)</i> | <i>156</i> |
| <i>Figure IV-7 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 3 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)</i> | <i>157</i> |
| <i>Figure IV-8 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 4 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)</i> | <i>157</i> |
| <i>Figure IV-9 Déformation de la couche cœur (a) en l'absence de composant et de cavité (référence) (b) en l'absence de composants mais avec les cavités et (c) avec les composants et (d) une autre disposition avec les trois composants</i> | <i>158</i> |
| <i>Figure IV-10 Simulation du procédé d'enfouissement de la structure avec passifs (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa).....</i> | <i>160</i> |
| <i>Figure IV-11 (a) Architecture finale de la couche d'accueil, en rouge les composants passifs (b) Simplification avec des blocs de céramique</i> | <i>161</i> |
| <i>Figure IV-12 Résultats de simulation du procédé d'enfouissement de la structure avec passifs (a) contraintes dans la couche cœur (Pa), (b) contraintes sur les composants, (c) déformation selon l'axe z au niveau de la couche cœur (m) et (d) déformation selon l'axe z avec toutes les couches considérées (m).....</i> | <i>161</i> |
| <i>Figure IV-13 Résultats de simulation : (a) Modèle 2D de composants 2D enfouis alignés, (b) Déformation verticale dans la couche d'accueil avec composants (gauche) et sans composant (droite) (c) Déformation verticale à la fin du procédé de fabrication (m)</i> | <i>163</i> |
| <i>Figure IV-14 Architectures alternatives imaginées dans le développement du prototype avec une couche supplémentaire de composants enfouis.....</i> | <i>164</i> |
| <i>Figure IV-15 Principe de sous-modèle appliqué au circuit EDDEMA</i> | <i>165</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Figure IV-16 Contraintes résiduelles à la fin des étapes de fabrication dans le prépreg autour des vias après les étapes de fabrication (Pa).....</i> | <i>165</i> |
| <i>Figure IV-17 Déformation totale équivalente sur les vias après cinq cycles de températures (a) par modèle isolé, (b) par sous-modèle</i> | <i>166</i> |
| <i>Figure IV-18 Déformation totale équivalente dans les vias diagonaux après 5 cycles de température +80°C/-40°C en tenant compte de la fabrication.....</i> | <i>166</i> |
| <i>Figure IV-19 Inspection au rayon X d'un échantillon test du prototype 1 réalisée par SERMA technologies.....</i> | <i>169</i> |
| <i>Figure IV-20 Vue d'une microsection d'un composant passif dans le prototype 1</i> | <i>170</i> |
| <i>Figure IV-21 Evolution temporelle de la valeur de résistance du composant passif R209 enfoui.....</i> | <i>170</i> |
| <i>Figure IV-22 Vue de la microsection autour d'un composant concerné par le phénomène de réduction de résistance après les chocs thermiques</i> | <i>171</i> |
| <i>Figure IV-23 Vue d'une microsection après le bain thermique.....</i> | <i>171</i> |
| <i>Figure IV-24 Schéma du principe de TDM utilisé par Insidix [Ins].....</i> | <i>172</i> |
| <i>Figure IV-25 Mesures de déformation et de topographie en 11 étapes d'un cycle de température entre -50°C et +200°C sur (a) un échantillon sans composant et (b) un autre avec composants et cavité et leur image par rayon X respective.....</i> | <i>173</i> |
| <i>Figure IV-26 Comparaison de l'aspect de la déformation entre (a) les mesures sur un prototype non fonctionnel, (b) la déformation estimée dans la couche cœur et (c) la déformation en présence de l'ensemble des couches</i> | <i>174</i> |
| <i>Figure IV-27 Identification de la zone principale de défaillance : (a) Position attendue des composants et cavités dans le PCB, (b) défaillance observée à 200°C par TDM, (c) Image par rayon X de l'échantillon et (d) Image acoustique à 15MHz</i> | <i>176</i> |

Table des tableaux : Chapitre IV

| | |
|--|------------|
| <i>Tableau IV-1 Caractéristiques clés des principaux composants enfouis.....</i> | <i>150</i> |
| <i>Tableau IV-2 Données matériaux du matériau de pré-imprégné initialement prévu (E770G) et de son remplaçant (R1570).....</i> | <i>150</i> |
| <i>Tableau IV-3 Conditions de température et pression des étapes clés de l'enfouissement.....</i> | <i>152</i> |
| <i>Tableau IV-4 Profil de mission du prototype.....</i> | <i>153</i> |
| <i>Tableau IV-5 Bilan selon les architectures (en rouge le cas le moins favorable, en vert le cas le plus favorable).....</i> | <i>159</i> |
| <i>Tableau IV-6 Comparaison entre l'architecture optimisée avec 3 composants actifs et l'architecture finale.....</i> | <i>162</i> |
| <i>Tableau IV-7 Coefficient de dilatation thermique considéré pour les pré-imprégné lors des simulations.....</i> | <i>167</i> |
| <i>Tableau IV-8 Comparaison des mesures de TDM à plusieurs températures clés.....</i> | <i>175</i> |

IV.1 Introduction

Les simulations menées jusque-là se positionnent sur des composants isolés dans leurs cavités respectives. L'objectif de l'étude est maintenant de s'intéresser au dispositif complet. Ce chapitre fait le lien entre le global (le prototype) et le détail (l'interconnexion) mais également entre la simulation théorique et la mesure expérimentale en précisant l'apport de ces travaux de recherche au projet EDDEMA. La modélisation du dispositif complet est évidemment une utopie puisque si l'ensemble des détails (nombreux passifs, vias) du circuit ne peut être pris en compte dans les simulations. Le modèle en trois dimensions des composants avec leurs interconnexions était déjà à la limite de faisabilité des simulations (en raison du nombre de nœuds considérable). Pour autant, il est possible d'observer les tendances en simplifiant l'objet de l'étude.

Tout d'abord, les éléments clés du dispositif seront présentés en revenant sur la fabrication et les conditions de fonctionnement de l'assemblage qui définissent sa durée de vie. Deux niveaux d'étude seront ensuite évalués à l'aide d'une méthodologie basée sur les simulations numériques : aborder les interconnexions en considérant la fabrication, les conditions aux limites d'utilisation du produit final (ici une caméra), le tout en étudiant les comportements plus globaux du système dans son ensemble.

IV.2 Prototype développé

Pour rappel le projet EDDEMA a pour objectif de développer un système de caméra utilisant la technologie d'enfouissement afin de réduire de 50% le volume par rapport à sa version précédente. Par conséquent, le souhait de Valeo est de réaliser un circuit de 12 couches avec trois composants actifs et près de 80 composants passifs enfouis. La carte électronique fait 23,1mm sur 22mm pour une épaisseur inférieure au millimètre sans les composants montés en surface. L'objectif de cette partie est d'établir un profil de vie du système et de ses composants pour comprendre les contraintes et les risques de défaillance encourus.

IV.2.1 Composants enfouis

Les trois composants enfouis dans le cadre du projet EDDEMA sont une mémoire Flash, un processeur STV et un régulateur de tension L5965. En dehors de ces trois composants actifs un très grand nombre de composants passifs sont enfouis. Ces composants sont de types résistances ou condensateurs, mais certains de ces composants passifs sont plus épais que la première couche d'accueil. Par conséquent deux procédés d'enfouissement sont réalisés selon l'épaisseur des composants, 150 μ m et 330 μ m. Bien sûr, dans une optique de symétrie, la couche d'accueil est centrée dans l'empilement des couches. La figure IV.1 présente l'assemblage vertical du prototype.

Les contraintes géométriques des composants sont des facteurs importants mais il est également important de rappeler d'autres éléments contraignant tels que la plage de

température dans laquelle les composants peuvent fonctionner (cf. Tableau IV.1). L'étude de la gestion thermique est réalisée par Institute of Sensor and Actuator Systems à l'université de technologie de Vienne, partenaire du projet EDDEMA. La prise en compte de ces contraintes en plus des conditions de fonctionnement permet de justifier les tests réalisés et les paramètres de simulation sélectionnés.

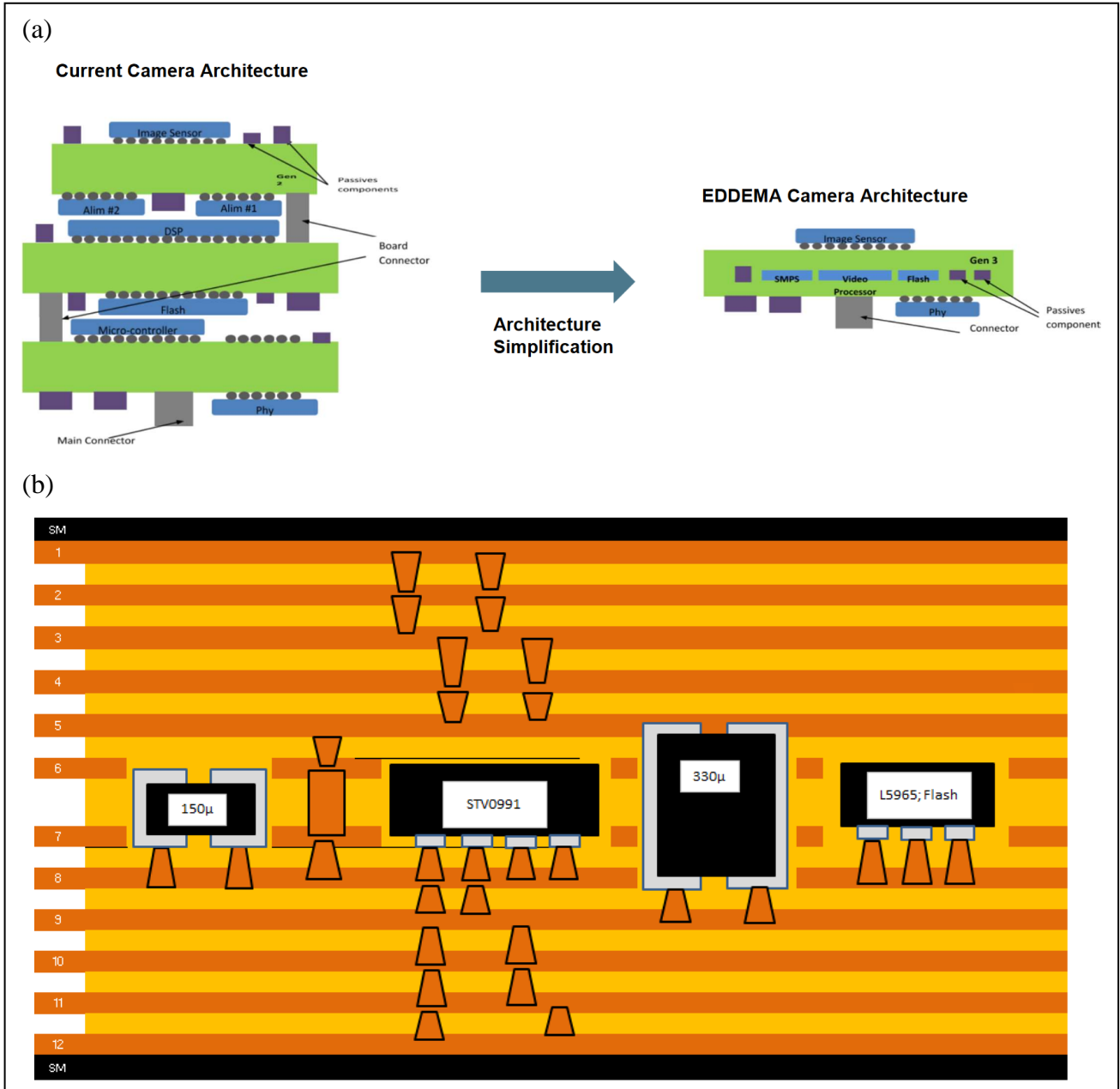


Figure IV-1 Schéma du prototype avec en orange le couche de cuivre et en jaune les couches de pré-imprégnés : (a) Simplification prévue usant de la technologie d'enfouissement, (b) Schéma d'empilement du circuit 12 couches dans le cadre du projet EDDEMA avec deux couches d'accueil pour les composants enfouis

Le prototype a connu plusieurs évolutions durant le projet, modifiant sa structure, son architecture et ses matériaux. Initialement le circuit devait être un circuit 10 couches mais au vu du nombre de composants enfouis et de la densité d'interconnexion le nombre de couches a augmenté à 12. Ce choix rajoutera des étapes de laminage pour les couches supplémentaires.

Tableau IV-1 Caractéristiques clés des principaux composants enfouis

| Composants | Dimensions (mm x mm) | Epaisseur (µm) | Plage de fonctionnement en température (°C) |
|------------|----------------------|----------------|---|
| Flash | 3,7 x 2,2 | 150 | -40°C/125°C |
| L5965 | 3,9 x 4,2 | 150 | -40°C/+125°C |
| STV0991 | 5,5 x 5,5 | 150 | -40°C/+105°C |
| Passif 1 | 0,6 x 0,3 | 150 | -55°C/+125°C |
| Passif 2 | | 330 | |
| Passif 3 | 1 x 0,5 | 150 | |
| Passif 4 | | 330 | |

Les détails des caractéristiques des composants actifs peuvent être retrouvés dans leur fiche technique respective. La mémoire flash N25Q032A [Mic] est un composant de Micron tandis que le régulateur L5965 [STM-19] et le processeur STV0991 [STM-18] sont des composants fabriqués par ST Microelectronics.

Un autre changement durant le projet concerne la nature des couches. Les couches devaient être composées de pré-imprégné E770G du fournisseur Hitachi (considéré dans les simulations précédentes) mais celui-ci sera finalement remplacé par le pré-imprégné R1570 de Panasonic. Le cœur sera quant à lui composé de R1577 de Panasonic. Ces changements devraient affecter les valeurs numériques obtenues par simulation mais nullement les tendances observées et la réflexion qui en a découlé. La raison majeure de ce changement est la température de transition vitreuse (T_g) du pré-imprégné E770G trop importante pour le bien-être des composants enfouis et un coefficient de dilatation thermique du pré-imprégné R1570 plus proche de celui du cuivre permettant de réduire les contraintes de déformation lors de la fabrication. En effet, quand ils ne fonctionnent, les composants peuvent tolérer une température plus importante que celle indiquée dans le tableau IV.1 mais il est préférable, pour ne pas les altérer et assurer leur fiabilité, de ne pas excéder de trop ces températures. Le tableau IV.2 résume les données fournisseurs des matériaux initialement prévus et de remplacement expliqué ultérieurement.

Tableau IV-2 Données matériaux du matériau de pré-imprégné initialement prévu (E770G) et de son remplaçant (R1570)

| Matériaux | CTE | | Module de flexion (GPa) | Coefficient de Poisson | T_g |
|-----------|-------------|-----------|-------------------------|------------------------|-------|
| | X/Y (ppm/K) | Z (ppm/K) | | | |
| E770G | 1,8 | 10,5 | 31 | 0,19 | 270 |
| R1570 | 15 | 34 | 38 | 0,19 | 165 |

Dans la suite, les propriétés du pré-imprégné R1570 de Panasonic sont donc considérées dans les simulations.

IV.2.2 La fabrication du prototype

Les conditions d'enfouissement des composants ont été présentées dans le chapitre II mais il est nécessaire de revenir sur les particularités du prototype du projet EDDEMA. Comme la figure IV.1 le montre, le circuit comporte deux couches d'accueil pour les composants enfouis. Une première pour les composants de 150 μm d'épaisseur, c'est-à-dire les trois composants actifs et certains composants passifs et une seconde pour les composants de 330 μm d'épaisseur, uniquement des passifs. Cette double couche d'accueil impose de recourir à deux fois au procédé décrit dans la figure IV.2 et de faire subir aux vias de la première couche d'accueil ces conditions. Cette méthode d'enfouissement a déjà fait l'objet de présentations pour d'autres applications [Wei-18]. Ensuite, le procédé de laminage des couches extérieures est répété pour chacune de ces couches, c'est-à-dire 6 fois. L'ensemble de ces étapes implique de faire subir des contraintes supplémentaires aux vias liant les composants au circuit.

L'enfouissement d'un composant se résume à le positionner dans une cavité et de l'immobiliser à l'aide d'une couche adhésive, d'effectuer une étape de presse légère à une température inférieure au T_g du matériau pour finaliser l'immobilisation du composant, de retirer la couche adhésive et de venir effectuer un pressage à une température cette fois supérieure au T_g . Une fois ces étapes réalisées, les lignes conductrices peuvent être dessinées et les vias creusés par laser. Le tableau IV.3 donne les conditions de pression et de température ainsi que la durée de chaque étape.

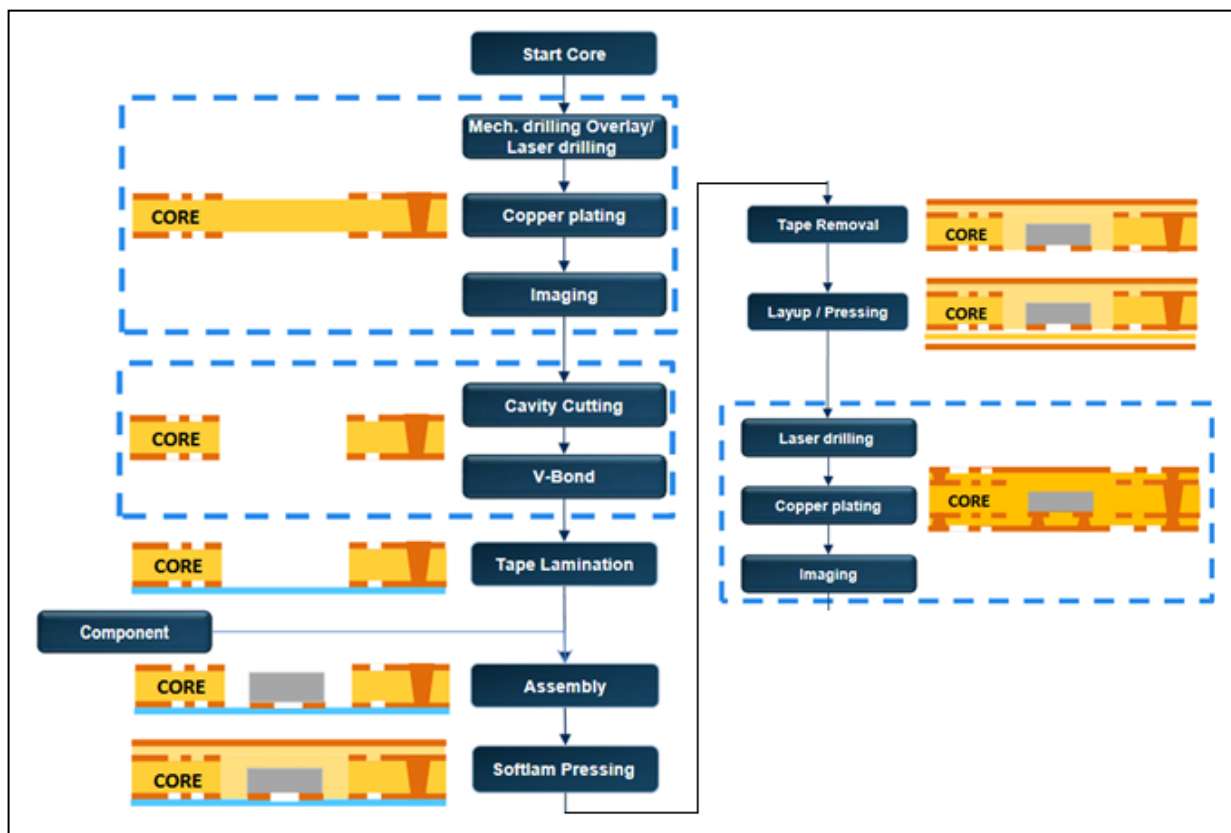


Figure IV-2 Etapes d'enfouissement des composants du projet avec les caractéristiques en température et en pression

Tableau IV-3 Conditions de température et pression des étapes clés de l'enfouissement

| Etape | Température (°C) | Pression (bar) | Temps (min) |
|-------------------------------|------------------|----------------|-------------|
| Embedded 1 - Softlam pressing | 140 | 14 | 40 |
| Embedded 1 -Layup/pressing | 190 | 22 | 60 |
| Embedded 2 – Softlam pressing | 140 | 14 | 60 |
| Embedded 2 – Layup/pressing | 190 | 22 | 60 |
| Autres couches | 190 | 22 | 60 |

Ainsi les microvias connectant les composants enfouis de la première couche d'accueil vont devoir supporter la première et seconde presse nécessaires à l'enfouissement des composants de la seconde couche d'accueil ainsi que toutes les étapes de « lamination » des couches extérieures. Il faut cependant noter que d'après W. Kpobie la principale source de contrainte vient du rétrécissement de la résine lors de l'enfouissement [Kpo-16].

La figure IV.3.a met en avant l'état du composant STV après la première étape d'enfouissement et la figure IV.3.b après la seconde étape d'enfouissement des composants plus épais et de la connexion des vias. Nous constatons que la contrainte est plus forte sur le haut du composant, ce qui concorde avec les résultats de [Kpo-16]. Rajouter des étapes de fabrication va tendre à augmenter ces contraintes. La présence des vias contribue à rigidifier la structure.

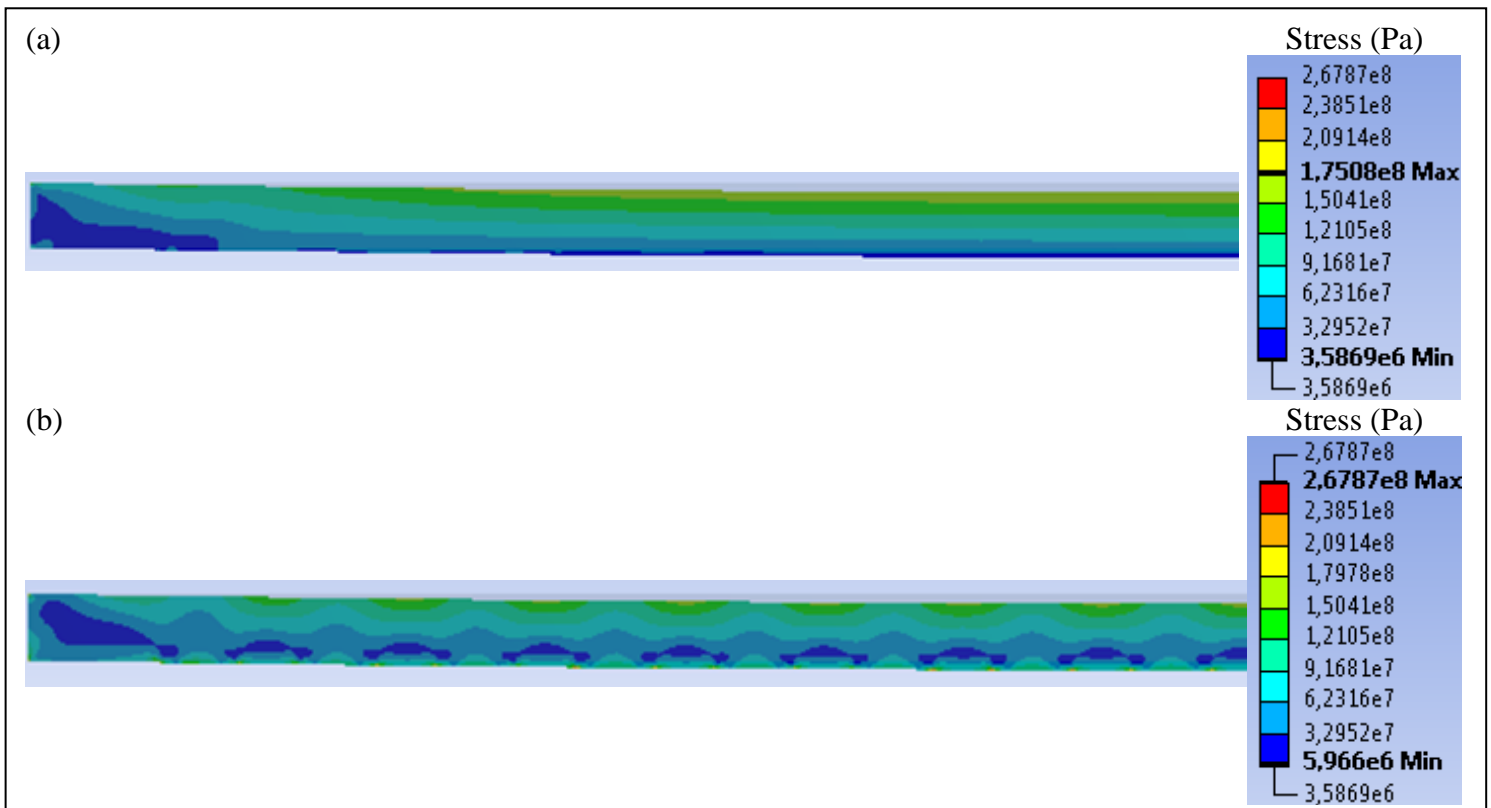


Figure IV-3 Distribution des contraintes équivalentes dans le composant (a) à 20°C après le premier procédé d'enfouissement (sans via) (b) à 20°C après le second procédé d'enfouissement (avec via)

L'expertise apportée sur l'étape de fabrication repose principalement sur les compromis dans le positionnement des composants des couches enfouis. Il faut rappeler que la disposition de ces composants devait répondre aux exigences thermiques, mécaniques et de compatibilité électromagnétique. La partie IV.3 résume les éléments identifiés et met en avant les éléments limitant pour établir l'architecture finale sachant que les travaux de thèses sont représentatifs des exigences thermomécaniques. Les études sur la dissipation thermique et la compatibilité électromagnétique ont été menées par les partenaires de l'université de Vienne et de l'ESIGELEC de Rouen [Xu-19].

IV.2.3 Les conditions de fonctionnement

En dehors de la fabrication, le prototype est défini par un profil de mission. Les spécifications de celui-ci doivent définir le temps de fonctionnement du système, la plage de température de fonctionnement avec une distribution prévisionnelle des durées et les conditions d'humidité. Toutes ces spécifications définies par VALEO sont données dans le tableau IV.4.

Tableau IV-4 Profil de mission du prototype

| Spécifications | Critère | | |
|--------------------------|-----------------|-------|--------------|
| Durée de vie | 15 ans | | |
| Temps de fonctionnement | 8000 heures | | |
| Plage de température | | | Distribution |
| | Max température | +80°C | 1% (80h) |
| | | +75°C | 8% (640h) |
| | | +40°C | 65% (5200h) |
| | | +23°C | 20% (1600h) |
| | Min température | -40°C | 6% (480h) |
| Taux d'humidité relative | 60%-100% | | |

A ce profil de mission sont ajoutés des conditions de vibrations et d'autres critères. Comme il semble difficile de tester en conditions réelles des systèmes ayant pour vocation une longue durée de vie, il est nécessaire de mettre en place des stratégies permettant d'évaluer la fiabilité de ce type de système. C'est le rôle de notre partenaire SERMA d'effectuer ces tests. Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de la thèse se concentrent sur la durée de vie (temps de fonctionnement) en fonction des conditions de température. Cette évaluation passe par le vieillissement accéléré avec l'aide de cycles de température défini précédemment dont les résultats seront présentés dans la partie IV.4. Le nombre de cycle sera enfin relié à la durée de vie dans les conditions de fonctionnement.

IV.3 Simulations sur les bases du prototype

Dans la définition des premiers prototypes, c'est l'organisation du circuit qui était au cœur de la problématique. Le haut degré d'intégration imposait d'optimiser l'espace pour les liaisons entre les composants tout en respectant les diverses exigences de fabrication, de tenue mécanique, de tenue thermique et de compatibilité électromagnétique. Du point de vue mécanique, il a été regardé comment positionner les composants, comment les composants interagissaient entre eux et comment simplifier la structure pour la considérer dans son ensemble.

IV.3.1 Positionnement des composants actifs

Dans un premier temps, un plan d'expériences basé sur les ~~de~~ simulations numériques (cf. Figure IV.4.a) a été établi pour évaluer l'interaction entre les composants actifs et leur cavité dans la couche d'accueil. Ce plan de simulation se base sur la première organisation pensée pour le prototype (cf. Figure IV.4.b). L'objectif est d'étudier l'influence de l'alignement des composants entre eux et de la distance qui les sépare mais aussi de l'inversion de leurs positions afin de déterminer le cas le plus favorable.

Les résultats de simulation pour la fabrication montrent que les composants ont une faible incidence entre eux au-delà du bord de leur cavité. Quatre configurations seront retenues comme exemple :

- Position 1 : les composants alignés avec le composant STV au centre et une distance de 2mm entre eux (cf. Figure IV. 5)
- Position 2 : les composants alignés avec le composant flash au centre et une distance de 1mm entre eux (cf. Figure IV. 6)
- Position 3 : les composants alignés avec le composant STV au centre et une distance de 0,5mm entre eux (cf. Figure IV. 7)
- Position 4 : les composants positionnés dans une diagonale selon la figure IV.4.b (cf. Figure IV. 8)

La séparation en cavité avec une couche cœur plus rigide permet à la résine d'adopter la forme de la cavité et des composants. Les contraintes sont alors majoritairement induites par le resserrement de la résine autour du composant venant le compresser. Notons quelques effets de proximité sur les contraintes de la couche cœur. La largeur du composant définit la distance à laquelle il sera « vu » par un autre (positions 1 et 3) et les bords du PCB (position 2) cause des effets similaires à la présence d'un composant sur la répartition des contraintes. L'effet observé est que l'alignement des composants réduit la contrainte selon cet axe assurant une « protection » réciproque. De plus, la forme prise par la couche est plus fortement liée à la position des composants (cf. Figure IV.9.d). En effet, les composants en silicium sont des éléments plus rigides (fort module de Young) et plus stables thermiquement (faible CTE) que les couches de PCB affectant ainsi la déformation « classique » d'un PCB, sans composant enfoui (cf. Figure IV.9). Ainsi, il est étudié la réponse du PCB sans les cavités, avec les cavités mais sans les composants et avec les composants dans leur cavité.

L'alignement des composants va définir un axe de courbure plus importante pour le PCB (positions 1, 3 et 4) tandis que l'ordre va affecter la courbure normale aux composants (positions 1 et 2).

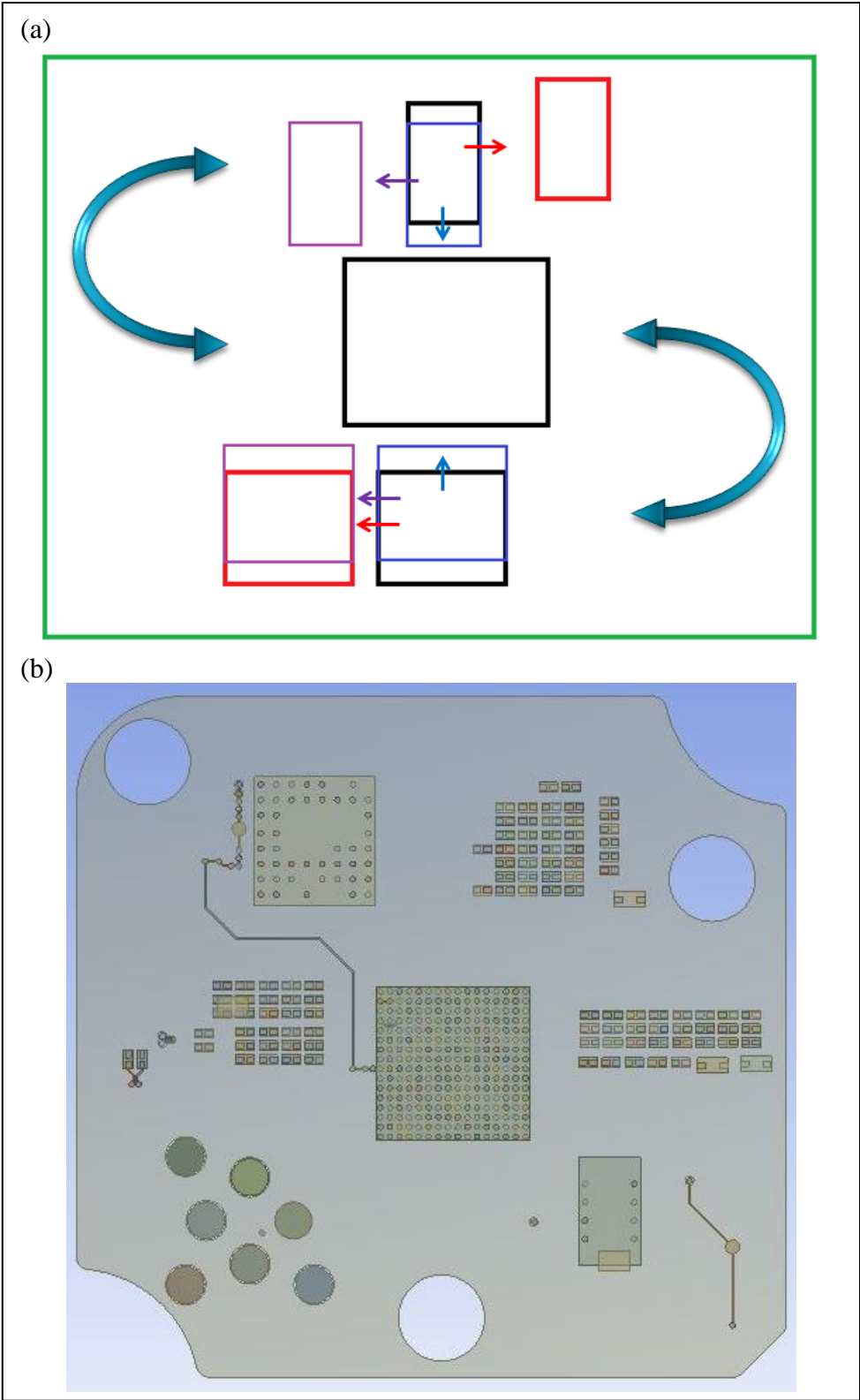


Figure IV-4 (a) Plan d'expériences basé sur les simulations pour évaluer l'influence de la position des composants actifs entre eux
(b) Architecture préliminaire pensée pour la couche d'accueil

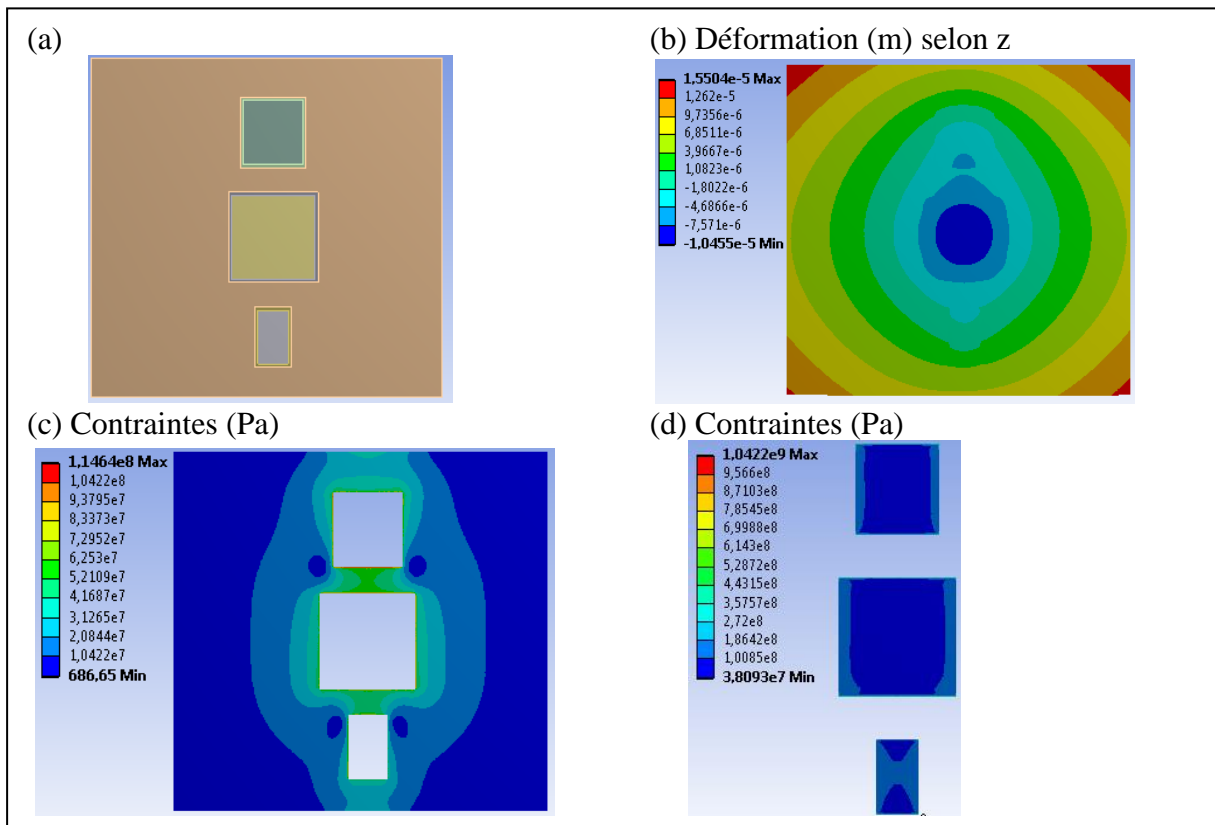


Figure IV-5 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 1 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)

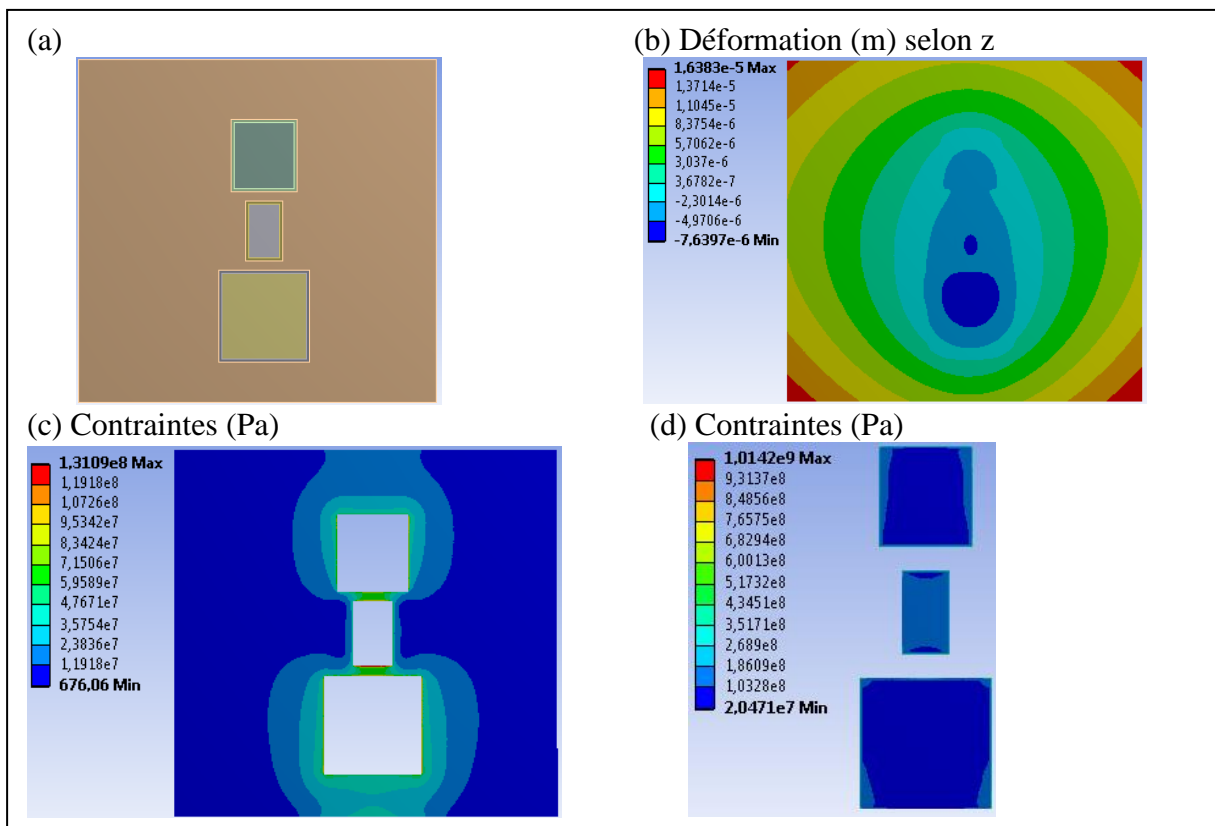


Figure IV-6 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 2 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)

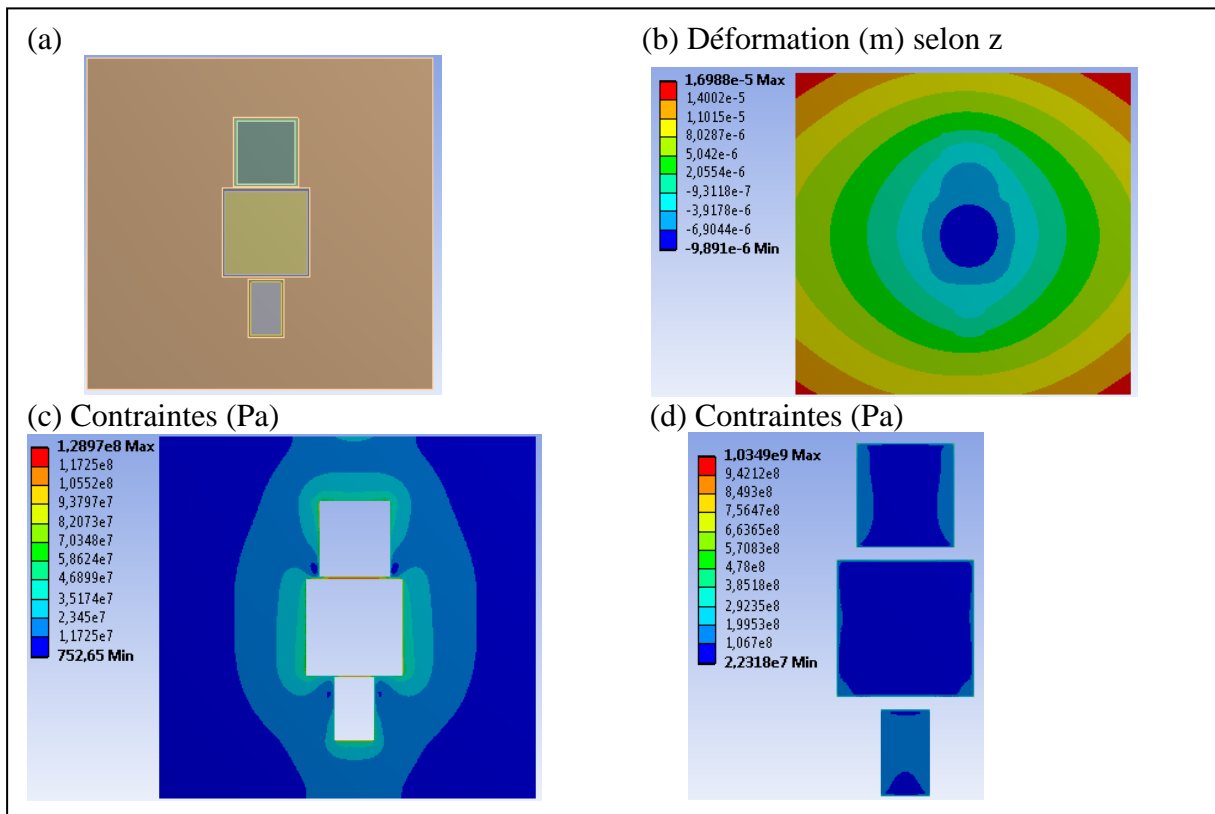


Figure IV-7 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 3 (a) Architecture, (b) Déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)

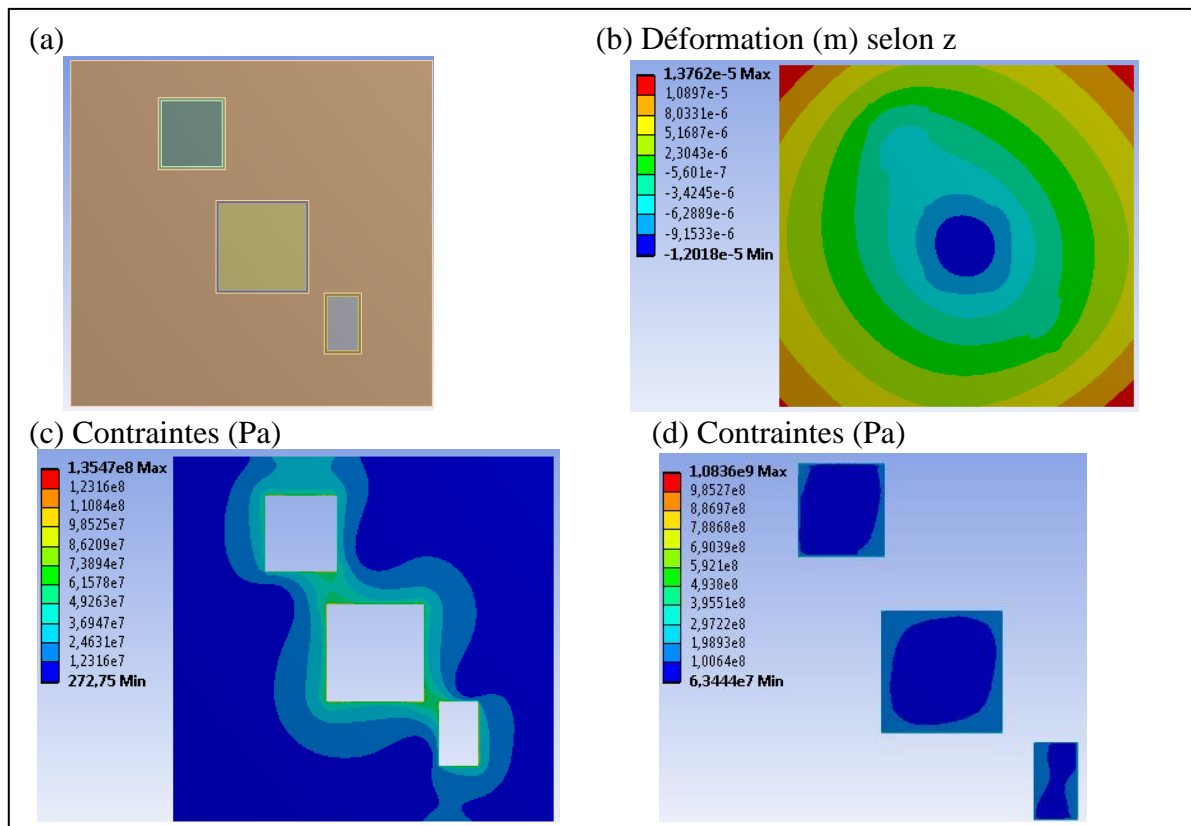


Figure IV-8 Simulation du procédé d'enfouissement pour la position 4 (a) Architecture, (b) déformation selon l'axe z (m), (c) contraintes dans la couche cœur (Pa) et (d) contraintes sur les composants (Pa)

Afin de minimiser les déformations, il semble préférable de répartir les composants et blocs de composants de manière homogène sur la surface. Diverses dispositions ont été testées comme l'exemple de la figure IV.9.c.

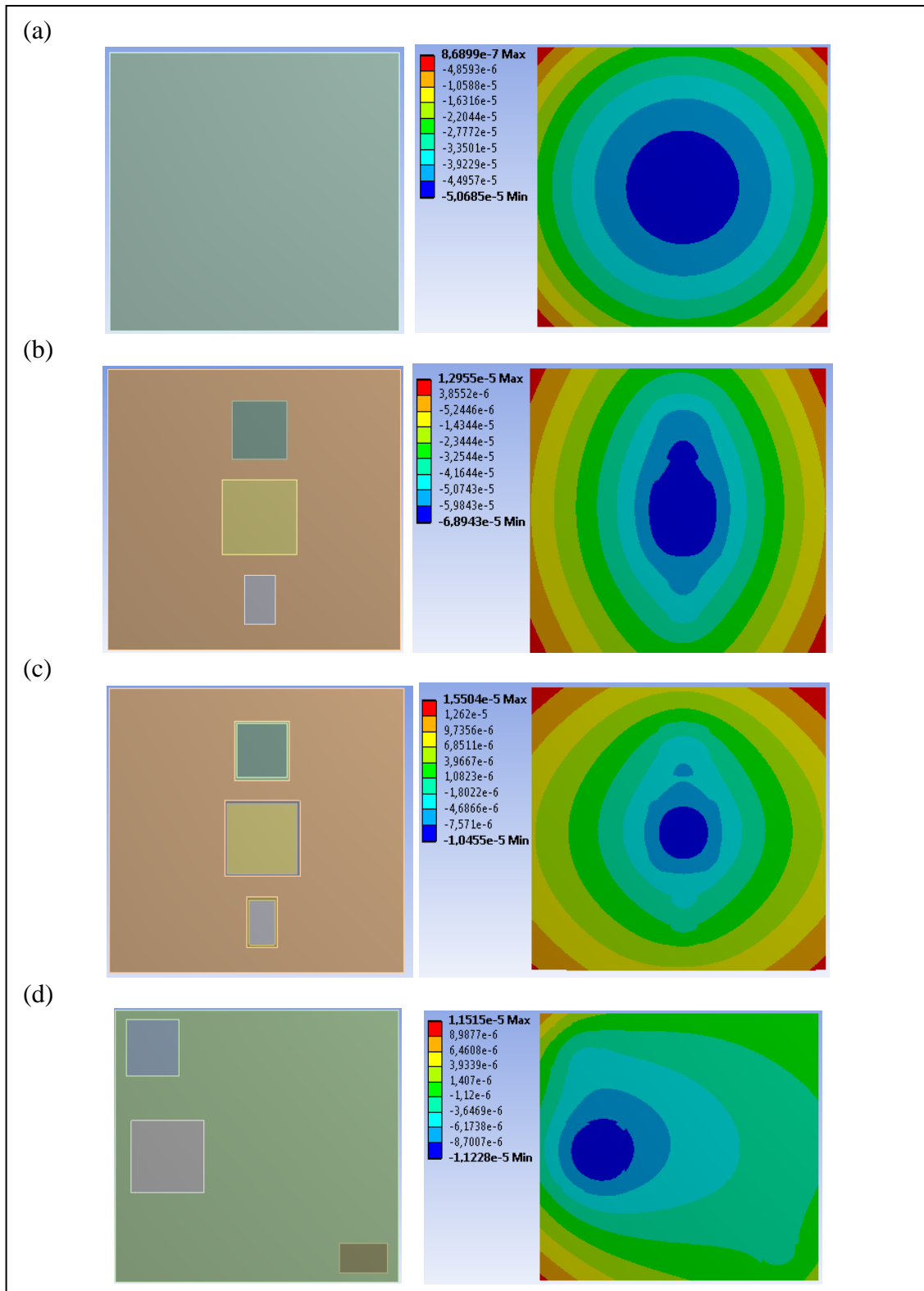
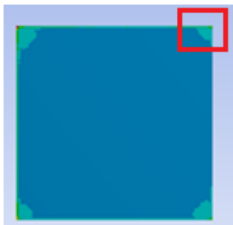
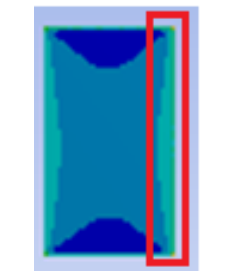



Figure IV-9 Déformation de la couche cœur (a) en l'absence de composant et de cavité (référence) (b) en l'absence de composants mais avec les cavités et (c) avec les composants et (d) une autre disposition avec les trois composants

Le tableau IV.5 établit un bilan des contraintes et déformations observées pour les différentes architectures sélectionnées. Le point important à noter est que les limites de rupture du silicium (~3-3,5GPa) [Azo-01] et des céramiques (de 2GPa à 100GPa) [Azo-01] ne sont en aucun cas dépassées dans le cadre des simulations. Plusieurs règles de positionnement se démarquent :

- La distance entre les composants : rapprocher les composants entre eux augmente la contrainte que le grand composant (STV) impose aux autres (position 1 et 3).
- La taille des composants : le composant le plus grand « écrase » les autres composants. Il contraint également les composants à une plus grande distance. Et cet effet est accentué en diagonale.
- Excentrer les composants permet de réduire la contrainte lors de variation de températures. Cet élément entre en considération après la fabrication puisque le circuit est découpé à la fin du procédé.

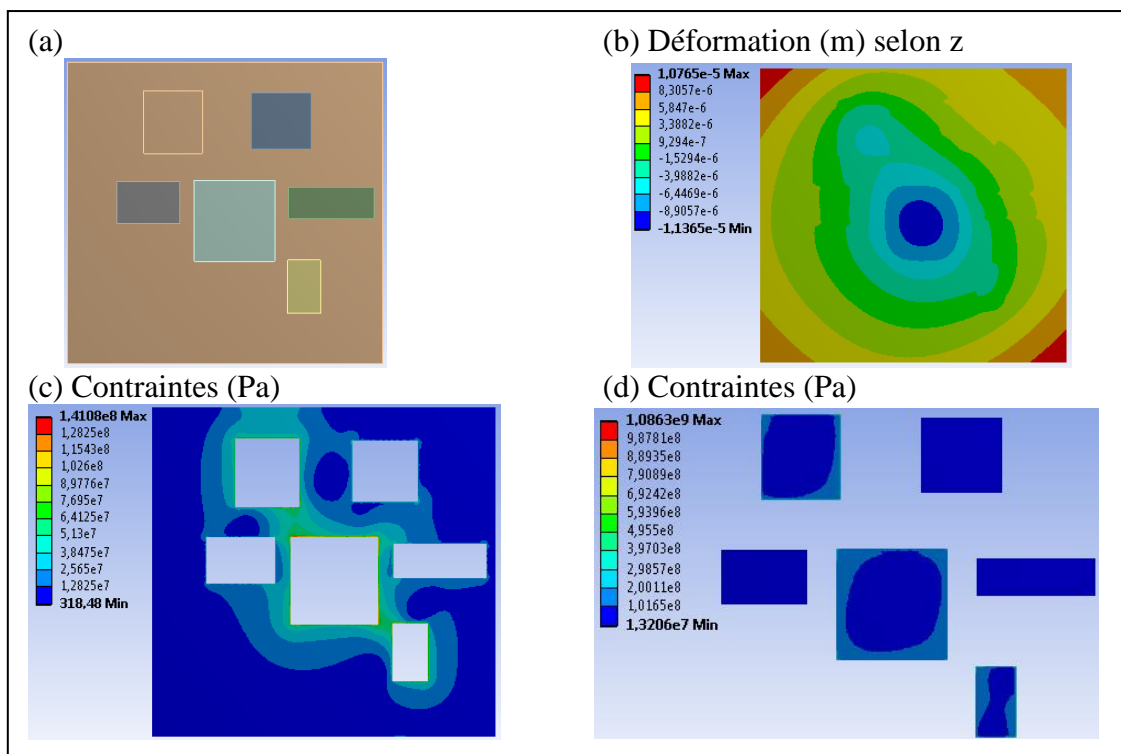
Tableau IV-5 Bilan selon les architectures (en rouge le cas le moins favorable, en vert le cas le plus favorable)

| Position | 1 | 2 | 3 | 4 | Position plus favorable étudiée | |
|------------------------------|---|------|------|------|---------------------------------|-----|
| Δz (μm) | 25,9 | 23,9 | 26,8 | 25,7 | 22,7 | |
| Contraintes max cœur (MPa) | 115 | 131 | 129 | 135 | 114 | |
| Contraintes max STV (MPa) |  | 1042 | 996 | 1035 | 1083 | 992 |
| Contraintes max Flash (MPa) |  | 988 | 1014 | 1013 | 1051 | 904 |
| Contraintes max L5965 (MPa) |  | 984 | 975 | 997 | 1012 | 927 |

IV.3.2 Positionnement des composants actifs et passifs

Les composants actifs ne sont pas les seuls éléments à prendre en considération pour l'étude du positionnement et de la tenue mécanique. Leur grand nombre rend leur impact non négligeable comme le montre la figure IV.4.b. Pour représenter ces blocs, une homogénéisation des propriétés des passifs et de la résine est proposée selon la méthode proposée par Kneer [Kne-65] et reprise par [Mur-87] [Fas-85] [Zat-00]. Cela revient à ajouter des composants plus imposants que la réalité, ce qui affectera la répartition des contraintes et la déformation. En dehors des composants, il faut également pointer l'aspect géométrique de la structure qui n'est pas un rectangle complet (deux coins sont rognés) ainsi que les 3 vias pour les vis de fixation et les 7 vias traversant toute la structure pour connecter les deux faces opposées. Ces éléments interviennent tardivement dans la fabrication du circuit mais ont besoin de place pour être réalisés conditionnant ainsi la répartition possible des composants.

La figure IV.10 montre l'évolution de la déformation et des contraintes en ajoutant des blocs équivalents pour modéliser les passifs.



Au vu de l'ensemble des résultats, quels sont les éléments limitant le positionnement ? Tout d'abord, quelques règles de design sont issues de l'expérience des fabricants de PCB et d'études menées précédemment [Kpo-16][Jan-13][Sch-13]. Ces règles définissent principalement :

- les distances entre composants positionnés dans la même cavité d'accueil,

- les distances entre le composant et le bord de la cavité pour assurer un bon écoulement de la résine dans les intervalles libres et prévenir de léger déplacement des composants
- la distance entre deux cavités pour prévenir des détériorations du cœur.

Ces règles correspondent aux observations des contraintes selon la position des composants. Mais l'élément qui a déterminé l'architecture finale est sans conteste la compatibilité électromagnétique étudiée par l'IRSEEM [Xu-19]. Les composants ont ainsi été positionnés selon la figure IV.11.a Le changement majeur à prendre en considération est le positionnement des passifs qui ne sont plus regroupés pour former un gros composant équivalent mais qui sont distribués en couronne autour des composants (cf. Figure IV.11.b). De la même manière que les architectures précédentes, la Figure IV.12 donne la contrainte dans la couche cœur et la déformation de la structure.

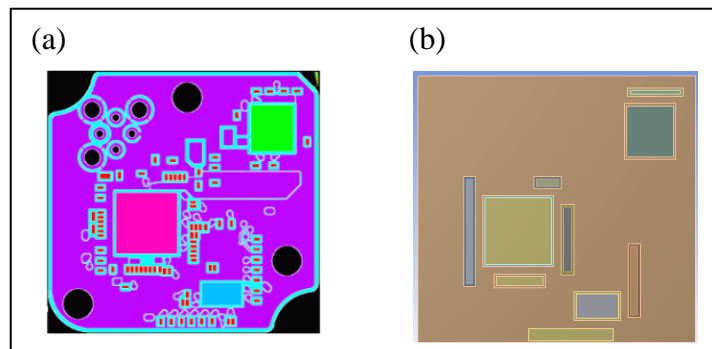


Figure IV-11 (a) Architecture finale de la couche d'accueil, en rouge les composants passifs
(b) Simplification avec des blocs de céramique

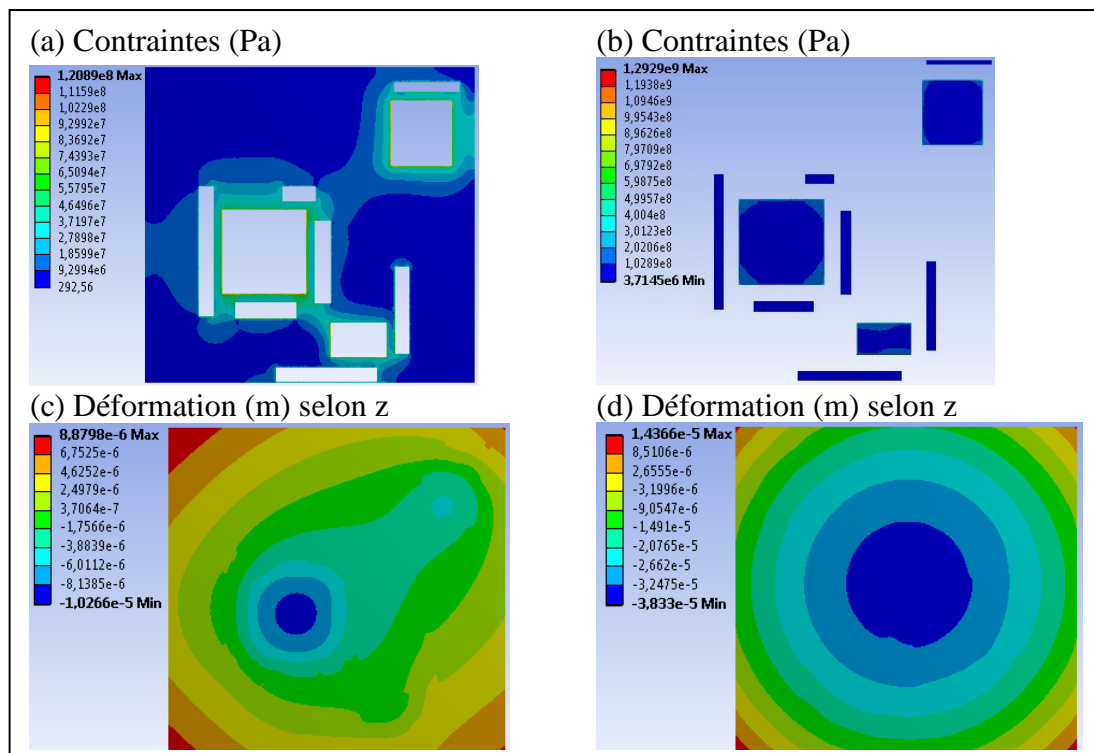


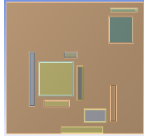

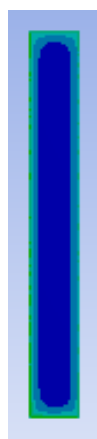


Figure IV-12 Résultats de simulation du procédé d'enfouissement de la structure avec passifs (a) contraintes dans la couche cœur (Pa), (b) contraintes sur les composants, (c) déformation selon l'axe z au niveau de la couche cœur (m) et (d) déformation selon l'axe z avec toutes les couches considérées (m)

Par rapport aux résultats précédents, la contrainte maximale dans la couche d'accueil augmente, les contraintes autour des composants actifs étant les plus fortes (cf. Tableau IV.6). La déformation est en revanche plus faible.

Tableau IV-6 Comparaison entre l'architecture optimisée avec 3 composants actifs et l'architecture finale

| Position | Position favorable sélectionnée en IV.3.2  | Blocs  | Architecture finale  | | |
|-------------------------------|--|--|--|---|------|
| Δz (μm) | 22,7 | 22 | 18,9 | | |
| Contraintes max cœur (MPa) | 114 | 141 | 121 | | |
| Contraintes max STV (MPa) | 992 | 1086 | 1292 | | |
| Contraintes max Flash (MPa) | 904 | 1049 | 1153 | | |
| Contraintes max L5965 (MPa) | 927 | 1010 | 1216 | | |
| Contraintes max passifs (MPa) | Pas de passifs |  | 40,1 |  | 40,8 |

Les simulations 3D ont été limitées jusqu'à présent à la première couche d'enfouissement ainsi que la seconde couche. Le procédé de fabrication associé n'a pas été pris en compte ainsi que toutes les couches extérieures. De plus les simulations 2D ont été menées de telle manière à considérer les composants isolés. Il a été vu que les contraintes sur les composants étaient davantage liées à leur position dans la couche cœur et à leur propre cavité qu'à leur positionnement les uns par rapport aux autres. En revanche pour la deuxième

couche d'accueil, les propriétés de celle-ci pourraient être affectées par les composants déjà présents. La réalisation de simulation 3D devient plus sensible dans la mesure où des éléments complexifiant la structure s'ajoutent (contour, vias, fixations, ...) mais la simulation 2D est envisageable pour avoir une meilleure compréhension des conséquences d'une première couche cœur avec des composants enfouis. La figure IV.13 présente une tranche fictive alignant les composants actifs et des composants passifs de diverses tailles. Les composants laissent une empreinte plus ou moins forte dans la couche d'accueil (cf. Figure 13.b). Cette empreinte a fait l'objet d'études antérieures [Osm-13]. Enfin, les couches extérieures doivent être ajoutées. Ces couches n'ont que peu d'effet sur les contraintes et la déformation de la couche cœur mais viennent homogénéiser la déformation (cf. Figure IV.13.c). Ces couches extérieures qui alternent entre du cuivre et du pré-imprégné peuvent être homogénéisées pour simplifier les simulations. L'homogénéisation réalisée est grossière puisqu'elle ne tiendra pas compte du taux de cuivre par couche ou de la présence de vias entre les différentes étapes de laminage.

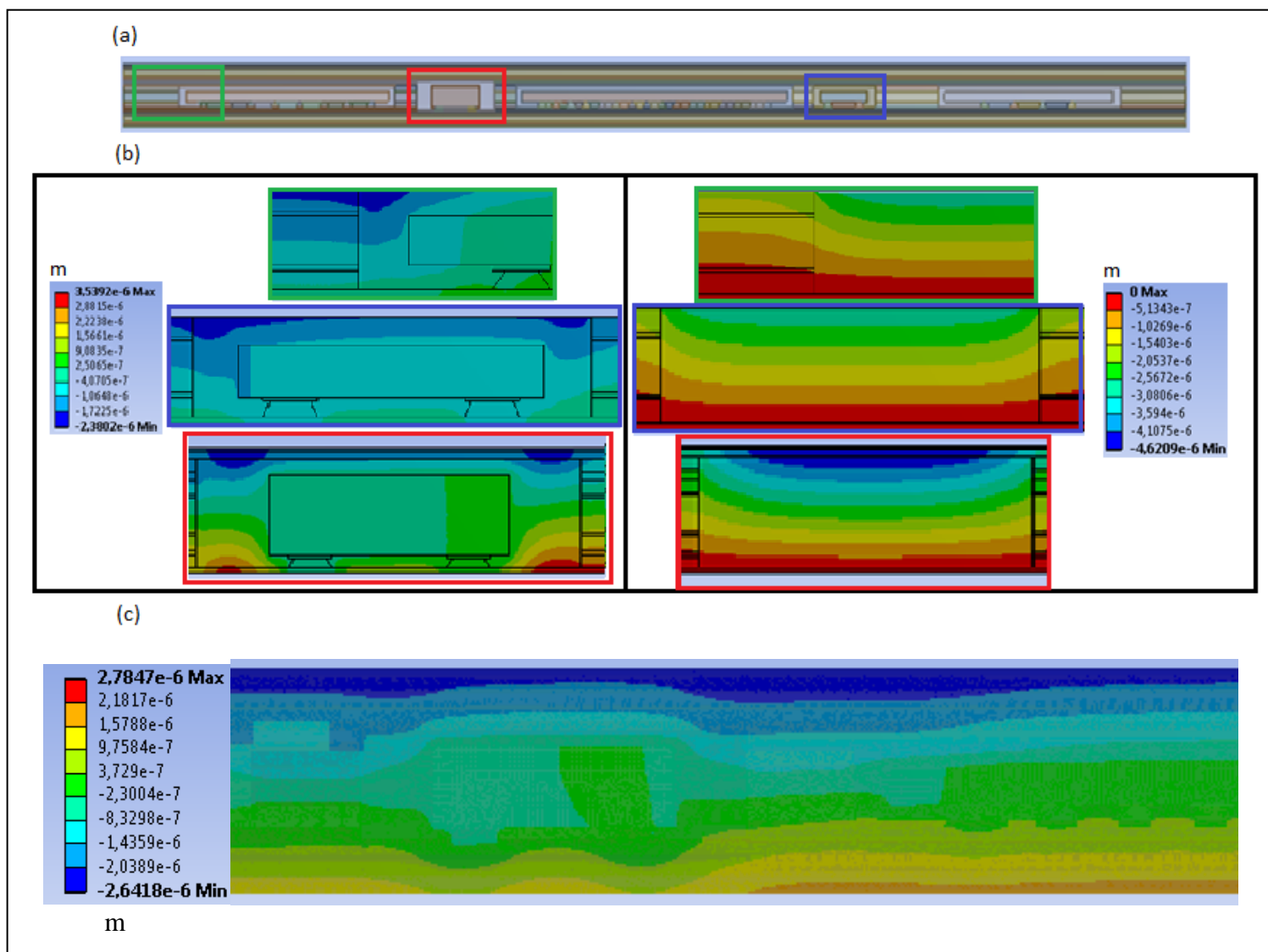


Figure IV-13 Résultats de simulation : (a) Modèle 2D de composants 2D enfouis alignés, (b) Déformation verticale dans la couche d'accueil avec composants (gauche) et sans composant (droite) (c) Déformation verticale à la fin du procédé de fabrication (m)

Dans le cadre du projet, d'autres architectures ont été pensées mais n'ont pas été mises en œuvre pour le développement. En plus de vouloir enfouir un nombre plus important de composants, la possibilité de répartir les composants enfouis sur deux étages plutôt que sur une seule couche a été envisagée (cf. Figure IV.14). Cette solution permettrait de relâcher certaines contraintes des couches d'accueil en permettant d'espacer davantage les composants entre eux. De la même manière la couche se déforme moins en présence de composants enfouis mais il serait judicieux de réfléchir à comment rendre les étages complémentaires dans la conception.

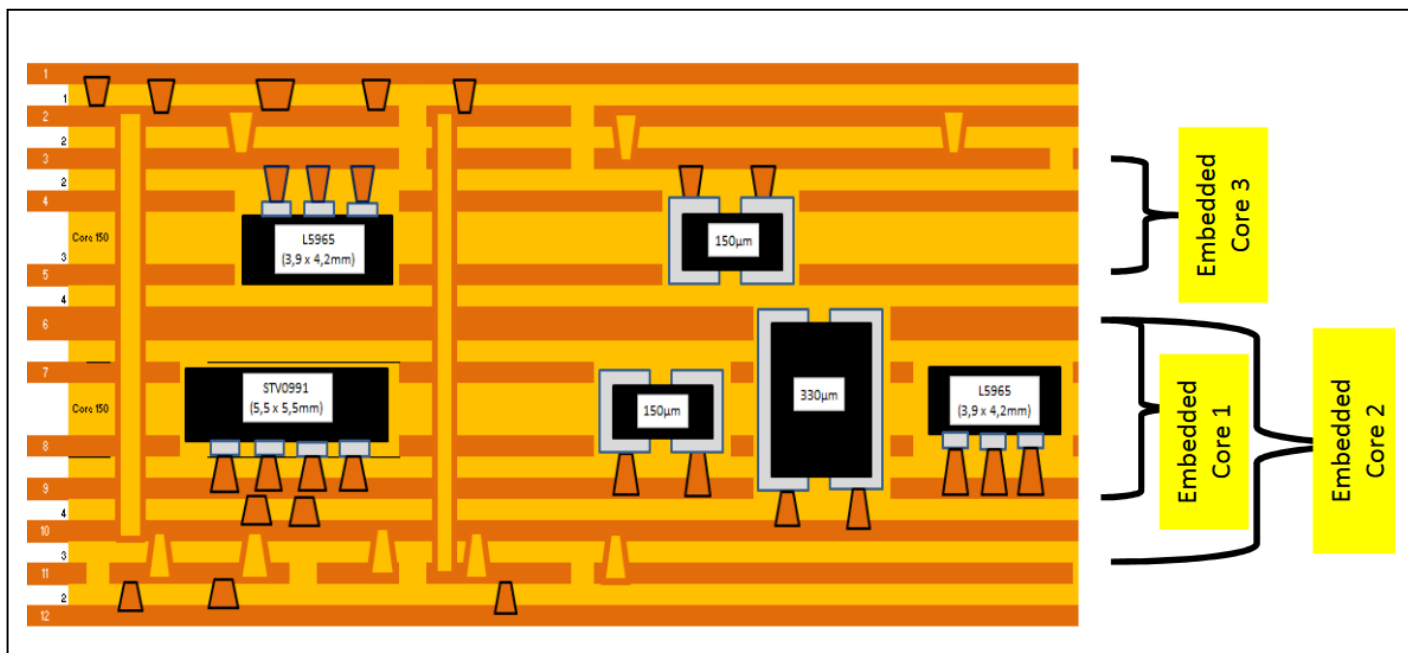


Figure IV-14 Architectures alternatives imaginées dans le développement du prototype avec une couche supplémentaire de composants enfouis

IV.3.3 Sous-modèle de simulation

Dans l'ensemble du chapitre 3, les composants étaient considérés indépendamment de la structure dans laquelle il était prévu de les enfouir et des contraintes liées à la fabrication. L'objectif, ici, est de corriger ce point. Même si le travail pour préciser le comportement réel du prototype n'a pu être réalisé en l'absence d'un prototype fourni dans des temps raisonnables, utiliser la déformation obtenue par simulation est possible pour évaluer les tendances. Une méthode d'évaluation de l'impact du circuit sur le vieillissement des vias a ainsi été proposée. La réalisation de simulations utilisant le principe de sous-modèle présentée dans le chapitre II est la solution étudiée (cf. Figure IV.15).

La simulation des conditions de fabrication permettra de déterminer les déformations aux frontières des modèles utilisés dans le chapitre III, liées aux cycles thermiques relatifs à la fabrication avant ceux du vieillissement. Tenir compte de la fabrication permet notamment de prendre en considération la contrainte résiduelle (cf. Figure IV.16) de celle-ci et donc d'établir un état initial différent de ce qui a été considéré dans le chapitre précédent. En revanche, la structure reste simplifiée puisque le tracé du circuit, les vias et les trous de fixations n'ont pas été prise en compte.

Ce choix permet d'évaluer l'impact des conditions limites sur l'évaluation proposée précédemment (cf. Figure IV.17) et peut justifier l'intérêt de pousser l'étude vers une représentation plus précise du circuit et l'utilisation du sous-modèle pour étudier les vias.

Par ailleurs, les résultats présentés ici tiennent compte du changement de matériaux qui a été opéré au cours du projet pour tenter de toujours plus se rapprocher de la réalité du prototype final. Le point est fait sur la différence des deux procédés de fabrication selon le matériau et l'impact que cela a sur le vieillissement de manière analytique.

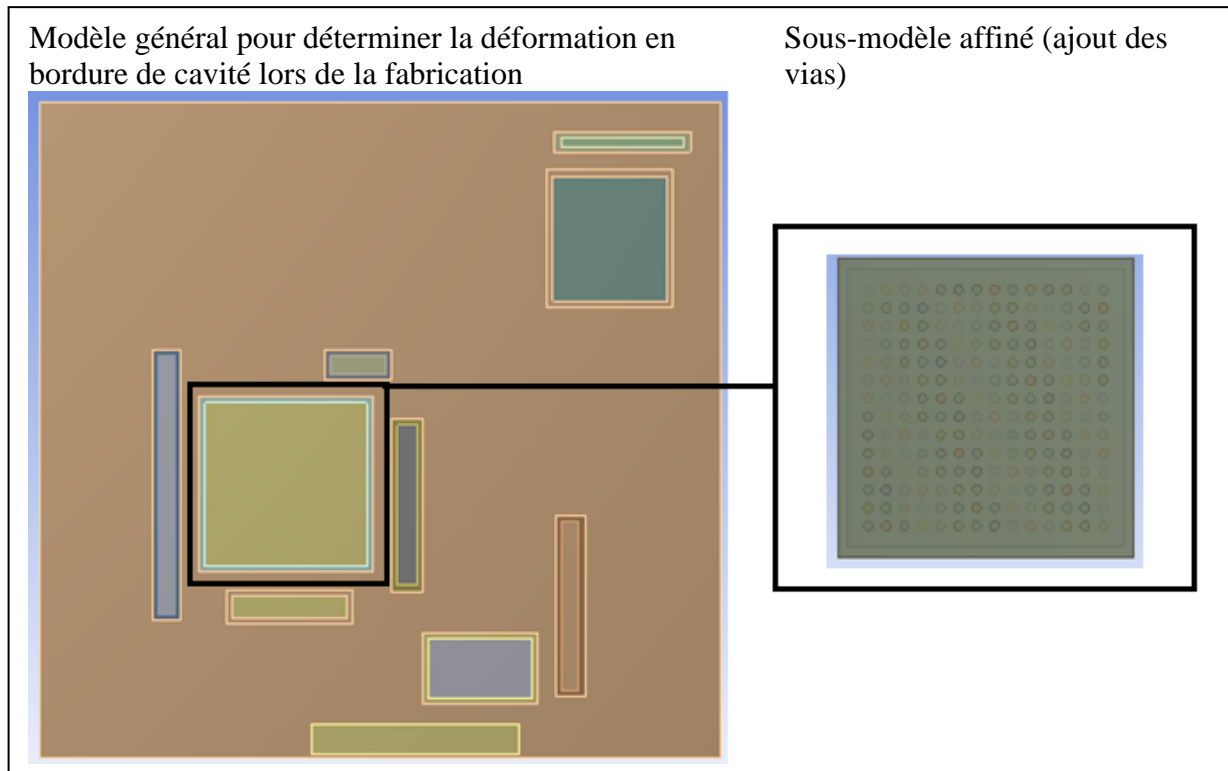


Figure IV-15 Principe de sous-modèle appliqué au circuit EDDEMA

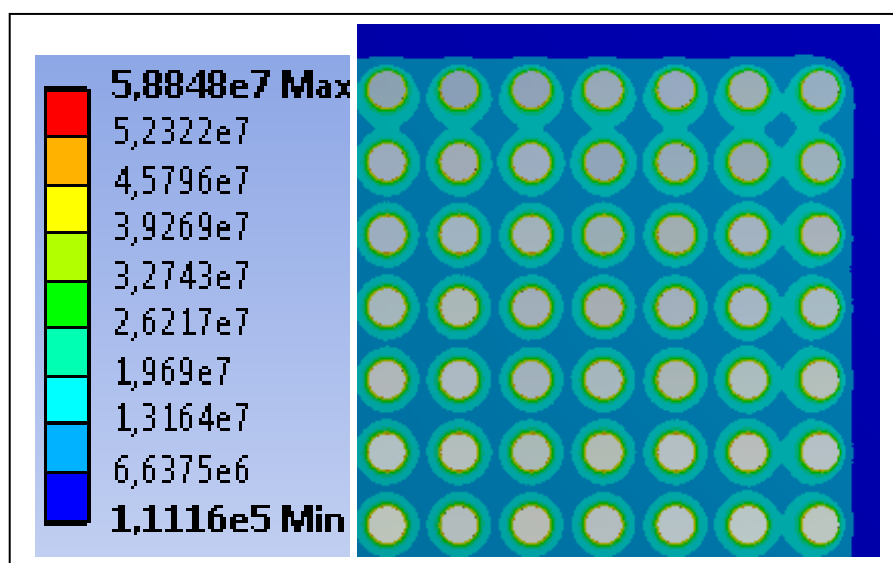


Figure IV-16 Contraintes résiduelles à la fin des étapes de fabrication dans le préreg autour des vias après les étapes de fabrication (Pa)

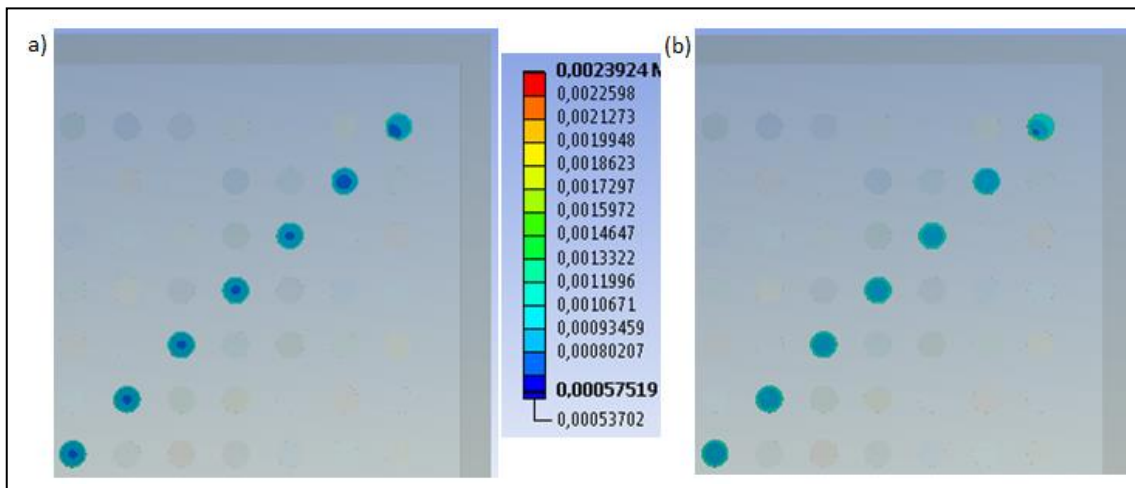


Figure IV-17 Déformation totale équivalente sur les vias après cinq cycles de températures (a) par modèle isolé, (b) par sous-modèle

La contrainte résiduelle évaluée concorde avec les résultats 2D précédents. Une contrainte de l'ordre de la dizaine de Méga Pascals est évaluée autour des vias. De plus, la figure IV.17 montre que considérer la cavité indépendamment de la structure pour l'étude des vias est une approximation correcte. En effet, même si les vias présentent une déformation moyenne plus élevée, les résultats sur la déformation maximale sont très proches après 5 cycles de température $\Delta\epsilon_a = 0,431\%$ (4700 cycles) et $\Delta\epsilon_b = 0,465\%$ (3800 cycles) et restent inférieurs aux résultats obtenus lors de l'étude en 2D en régime linéaire : $\Delta\epsilon_{2D,L} = 0,50\%$ (3000 cycles) pour des écarts extrêmement importants en termes de temps de simulation (plus d'une semaine).

La méthode du chapitre III est appliquée pour réaliser les cycles thermiques liés à la fabrication. Cinq cycles de température entre $+80^\circ\text{C}$ et -40°C (cf. Figure IV.18) sont appliqués sur le modèle avec vias en régime non-linéaire. Ainsi une déformation maximale par cycle de $\Delta\epsilon = 0,3\%$ est évaluée au 5^{ème} cycle autour d'une valeur de déformation moyenne de $\epsilon_m = 0,48\%$.

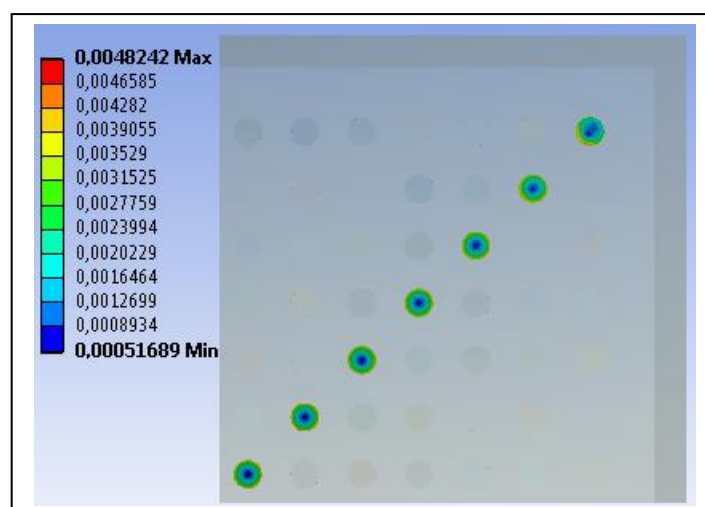


Figure IV-18 Déformation totale équivalente dans les vias diagonaux après 5 cycles de température $+80^\circ\text{C}/-40^\circ\text{C}$ en tenant compte de la fabrication

L'intégration des contraintes de fabrication apporte davantage d'incertitudes. Tout d'abord, la déformation ne varie pas autour de la valeur initiale de déformation mais autour d'une valeur moyenne qui diminue légèrement au cours des cycles. Ainsi, simplement évaluer la variation amènerait à une estimation de durée de vie de l'ordre de 10^4 cycles tandis que la valeur moyenne induite par la fabrication pointerait une durée de vie de 4000 cycles. Mais il est difficile d'évaluer plus l'impact de la fabrication avec les simulations seules.

Pour expliquer les différences de résultats avec le chapitre précédent et outre la prise en compte de la fabrication induisant des contraintes supplémentaires, il est nécessaire de revenir à la définition de base des matériaux et notamment des couches de pré-imprégné. Le tableau IV.7 rappelle les CTE des deux matériaux considérés.

Tableau IV-7 Coefficient de dilatation thermique considéré pour les pré-imprégné lors des simulations

| | MCL-E-700G (chap. 3) | R1570 |
|----------------|------------------------|------------------------|
| CTE axe z | 8 ppm.K ⁻¹ | 15 ppm.K ⁻¹ |
| CTE axe x-y | 20 ppm.K ⁻¹ | 34 ppm.K ⁻¹ |
| T _g | 270°C | 170°C |

Il est trivial de comprendre qu'un CTE plus important cause une déformation plus importante lors des cycles de température fixes et entraîne donc un $\Delta\varepsilon$ plus élevé et donc un nombre de cycles tenus inférieurs. Alors pourquoi ce changement de matériaux ? L'explication repose sur la température de transition vitreuse T_g. En effet, les composants ne peuvent supporter de rester à 290°C le temps de réaliser les étapes de laminage alors qu'ils supportent d'être portés à 190°C. En outre, l'analyse de la déformation thermique (cf. équation IV.1) pour ces étapes de laminages montre que les deux déformations sont très proches l'une de l'autre malgré le facteur de 1,8 entre les CTEs pour les cycles de températures subis lors de la fabrication.

$$\Delta\varepsilon_{th,z} = CTE(z). \Delta T \quad (IV.1)$$

Ainsi une étape de laminage induit une déformation thermique selon **l'axe z de 0,216% pour le MCL-E-700G et de 0,255% dans le R1570**. Ce simple constat permet de comprendre que la fabrication entraîne malgré tout plus de contraintes sur le circuit dans le cas des nouveaux matériaux. **L'étude finale correspond donc au cas le plus critique.**

IV.4 Mesures expérimentales sur le prototype

IV.4.1 Evaluation de la fiabilité et de la robustesse

Dans le cadre du projet EDDEMA, SERMA technologies s'est engagé à faire de nombreux tests sur le prototype de caméra fabriqué. Plusieurs échantillons se sont vus subir des chocs thermiques, des temps de fonctionnement à hautes et basses températures, des chocs mécaniques et des tests de vibrations, des cycles en à chaleur humide et enfin le test qui nous intéresse dans le cadre de l'étude menée dans cette thèse, un test d'endurance aux cycles thermiques.

L'objectif des cycles de température contrôlés est d'accélérer artificiellement la vie d'un système qui, au cours de son fonctionnement normal, est naturellement soumis à des variations de températures dues à l'environnement et à la dissipation thermique de ses composants. Pour remplir cet objectif, il est nécessaire de définir la notion de loi d'accélération de Norris-Landzberg [Nor-69] : le facteur d'accélération (AF) est défini comme le rapport entre le nombre de cycle thermique que peut supporter le système dans des conditions normales de fonctionnement sur le nombre de cycle thermique dans les conditions expérimentales (éq. IV.2) :

$$AF = \frac{N_o}{N_t} \quad (IV.2)$$

Où AF est le facteur d'accélération

N_o est le nombre de cycles dans des conditions normales de fonctionnement

N_t est le nombre de cycles dans les conditions expérimentales

La durée de vie d'un système soumis à des cycles de température est dépendante de nombreux facteurs tels que les températures maximales et minimales des cycles, la fréquence des cycles, la géométrie de la structure et les propriétés des matériaux. Le modèle de Norris-Landzberg cherche à s'absoudre des composantes communes (géométrie et matériaux) entre le vieillissement accéléré et le fonctionnement normal. Par la modification du modèle de Manson-Coffin, Norris et Landzberg établissent la relation suivante :

$$AF = \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_o}\right)^n \left(\frac{f_o}{f_t}\right)^m e^{\left(\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{max,o}} - \frac{1}{T_{max,t}}\right)\right)} \quad (IV.3)$$

Où AF est le facteur d'accélération

ΔT est l'écart entre la température maximale et la température minimale

T_{max} est la température maximale du cycle (°K)

f est la fréquence des cycles de température (en cycles par jour) avec un minimum de 6 (minimum autorisé par la loi)

n est le coefficient de fatigue thermique

m est le coefficient de fatigue fréquentiel

E_a est l'énergie d'activation du matériau

k est la constante de Boltzmann

o et t décrivent respectivement les conditions de fonctionnement et de tests

Cette loi sera utilisée dans sa version simplifiée :

$$AF = \left(\frac{\Delta T_t}{\Delta T_o}\right)^n \quad (IV.4)$$

Le coefficient n est établi expérimentalement avec des systèmes simplifiés et est dépendant du matériau utilisé pour les interconnexions. Une valeur typique d'approximation de n est 3. Et par la connaissance du facteur d'accélération ainsi que de l'objectif de vie du système, il devient possible de définir le nombre de cycles que doit endurer le système au cours des tests d'endurance.

Dans le cadre du projet, la rupture peut se produire au niveau de deux types d'interconnexions : les vias du PCB et les joints de brasure des composants montés en surface. L'élément limitant étant le joint de brasure lors du test, le coefficient de fatigue considéré par SERMA est de $n = 2,66$. Le coefficient du cuivre étant de $n = 5$. Ceci traduit qu'un cycle important de température accroît d'avantage le vieillissement du cuivre que du joint de brasure.

Ainsi, en considérant, que le système est soumis à un cycle de température de $+80^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_t = 120^{\circ}\text{C}$, que l'on souhaite qu'il fonctionne réellement pendant 15 ans avec 6 cycles (minimum autorisé par la loi) de température par jour de $\Delta T_o = 20^{\circ}\text{C}$ estimé, la relation nous donne :

$$N_t = \frac{N_o}{AF} = \frac{6(\text{cycles par jour}) \times 365(\text{nombre de jour dans une année}) \times 15(\text{années})}{\left(\frac{120}{20}\right)^{2,66}} \quad (\text{IV.5})$$

$$N_t = 281 \text{ cycles}$$

Pour respecter les spécifications imposées, le système doit donc supporter 281 cycles de température. Ce nombre de cycle correspondrait à 12 jours de vieillissement selon les cycles définis au cours du chapitre précédent (1 cycle/heure). La théorie voudrait que ce nombre de cycles soit largement dépassé pour les vias puisque le pire cas évalué était de 2600 cycles mais qu'en est-il réellement ?

IV.4.2 Résultats expérimentaux

Les échantillons testés dans un premier temps sont des PCB avec uniquement les composants passifs enfouis (sans les composants actifs même si les cavités d'accueil sont bien présentes et sans aucun composant monté en surface). Il faut noter que ces échantillons ne respectent pas toutes les règles de design définies par AT&S (distance entre composants, nombre de composants passifs par cavité) telles que la séparation des composants dans des cavités différentes, l'espacement entre composants ou le positionnement (cf. Figure IV.19).

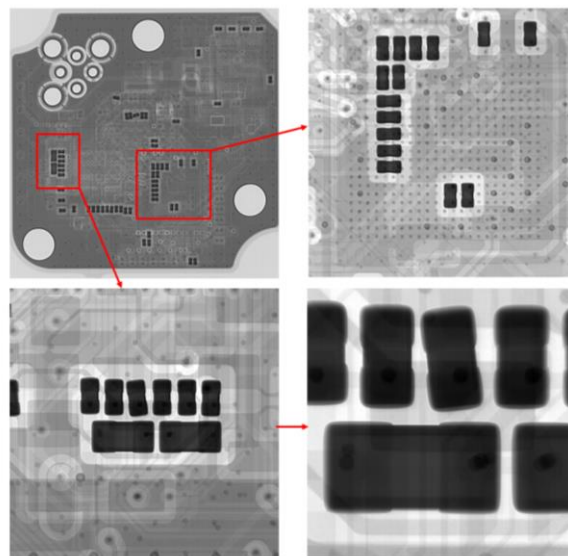


Figure IV-19 Inspection au rayon X d'un échantillon test du prototype 1 réalisée par SERMA technologies

IV.4.2.1 Mesures réalisées par SERMA Technologies

Avant de mener le moindre test de fiabilité (résistance sur la durée) ou de robustesse (résistance à un choc), il est nécessaire de confirmer par rayon X (cf. Figure IV.19) et analyse optique (micro sections) l'architecture du prototype. L'objectif est de vérifier si la fabrication cause des faiblesses ou des défaillances dans le circuit (cf. Figure IV.20). Ces observations permettent de valider le procédé de fabrication selon les spécifications requises.

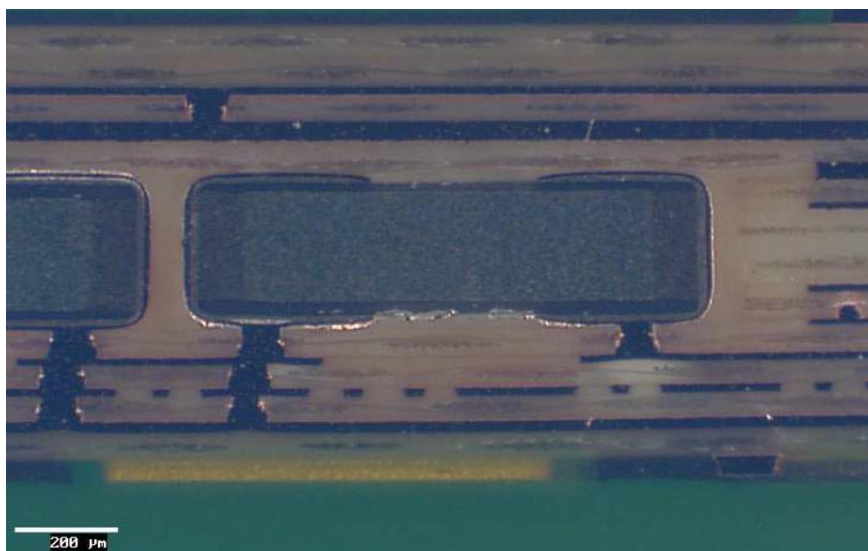


Figure IV-20 Vue d'une micro section d'un composant passif dans le prototype 1

De nombreuses opérations sont menées sur le prototype 1 mais ne sont pas toutes détaillées. Les résultats qui entrent dans le cadre de l'étude menée sont les chocs thermiques selon des cycles de température définis et le test de robustesse au choc thermique. Une étude électrique est menée sur diverses résistances présentes dans le prototype pour évaluer la fiabilité des passifs enfouis. La figure IV.21 montre l'évolution de la valeur d'une de ces résistances dans plusieurs prototypes. Les mesures sont effectuées avant le test, puis à une centaine de cycles, à 250 cycles et enfin à 500 cycles.

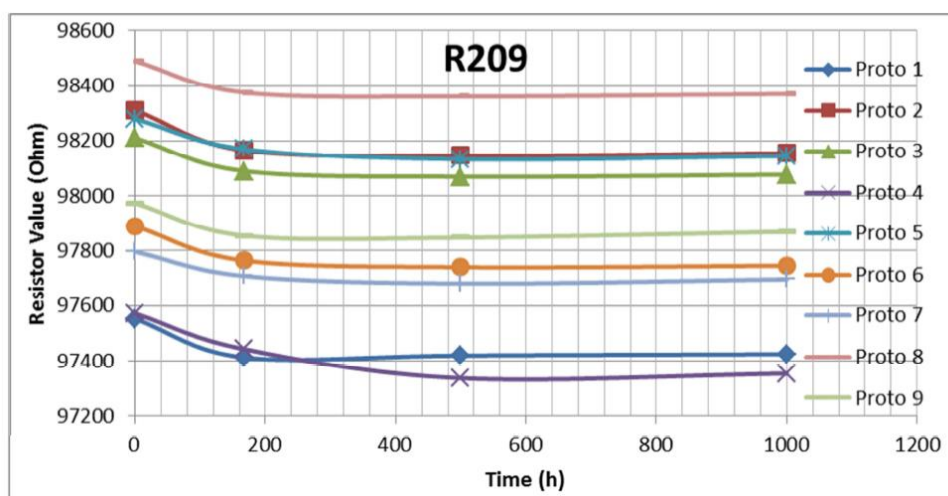


Figure IV-21 Evolution temporelle de la valeur de résistance du composant passif R209 enfoui

Une légère diminution de la résistance est observée au cours du vieillissement accéléré en début de test. La figure IV.22 est une observation de la micro section afin de déterminer si le phénomène est dû à une défaillance physique du PCB ou à une autre cause.

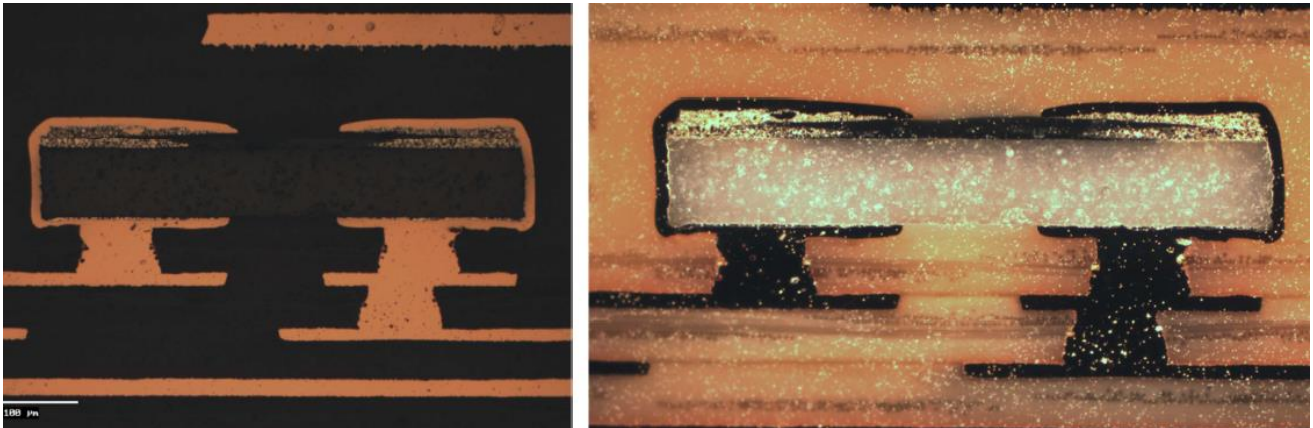


Figure IV-22 Vue de la micro section autour d'un composant concerné par le phénomène de réduction de résistance après les chocs thermiques

Aucune délamination ou fissure n'est observée après les chocs thermiques. La cause de la diminution de la résistance n'est donc pas une défaillance physique dans le PCB mais aurait plutôt pour cause une réorganisation du grain du cuivre pendant les premiers cycles thermiques alors désorganisé par l'ajustement par laser de la valeur de la résistance lors de la fabrication. Les tests sont menés jusqu'à 2500 cycles et se sont conclus par aucune défaillance physique visible sur le PCB et les composants passifs.

Ces résultats concordent avec les attentes mais n'apporte aucune conclusion quant aux composants actifs absents de ce premier prototype.

En complément de ces tests, un prototype a été plongé dans un bain thermique à 288°C afin de causer une rupture dans le PCB (test de robustesse) et observer la position de points faibles dans la structure et le résultat sur les interconnexions de type microvias (cf. Figure IV.23).

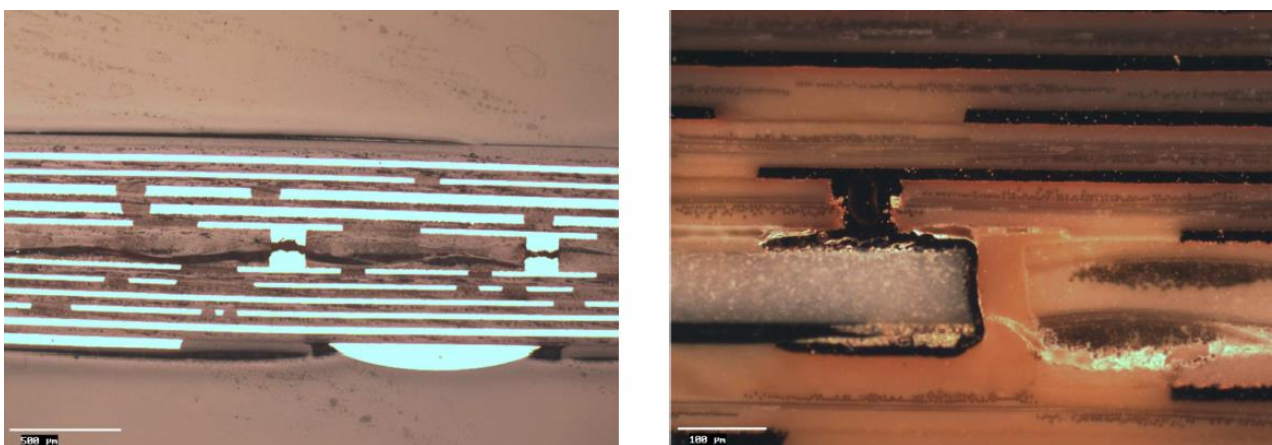


Figure IV-23 Vue d'une micro section après le bain thermique

Une énorme fissure apparaît tout le long de la couche cœur du PCB mais les connexions des composants ne sont pas endommagées. La résine joue donc correctement son rôle d'absorption des dommages pour les composants passifs enfouis.

Ces premiers tests menés sur le premier prototype ont permis de valider le procédé de fabrication pour un second prototype dans la mesure où les échantillons disponibles ont « réussi » tous les tests standards de fiabilité et de robustesse. Par ailleurs, le choc thermique a confirmé la robustesse des interconnexions de types microvias en ce qui concerne les importantes déformations. Evidemment, il sera nécessaire de reconduire ces expérimentations sur un prototype incorporant les composants actifs qui sont plus susceptibles de causer des défaillances.

IV.4.2.2 Mesures de topographie et de déformation

En supplément des tests de SERMA technologies, des mesures de topographie et de déformation (TDM) ont été réalisées chez INSIDIX pour observer le comportement du PCB en température et le comparer aux simulations dans le but d'identifier d'éventuelles causes de défaillances ou de faiblesses. Cette méthode d'acquisition en temps réelle d'une topographie en 3 dimensions repose sur le principe de projection de Moiré assurant une mesure sans contact et sans intermédiaire avec pour objectif de quantifier les déformations qui ont lieu dans un système (cf. Figure IV.24). Un PCB sans aucun composant est utilisé comme échantillon de référence.

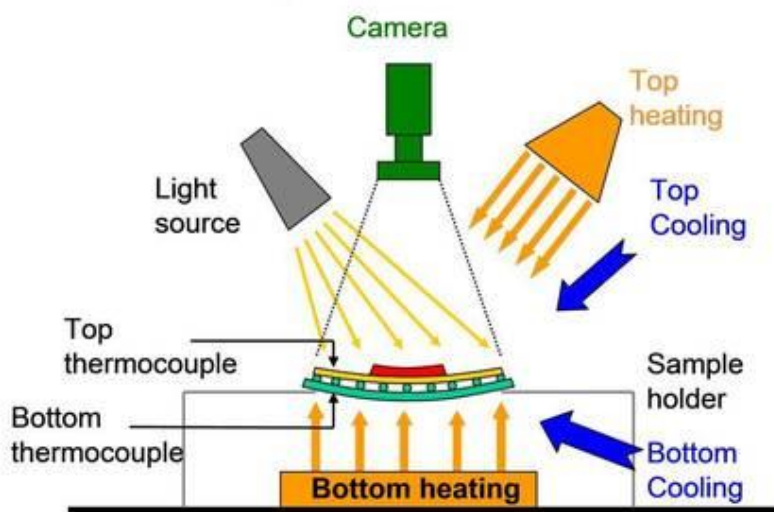


Figure IV-24 Schéma du principe de TDM utilisé par Insidix [Ins]

Les deux échantillons testés ont subi le même cycle de température : depuis la température ambiante (25°C), refroidissement jusqu'à -50°C puis après un retour à l'ambient, échauffement jusqu'à 200°C. La figure IV.25 présente les résultats de mesures obtenus avec l'échantillon de référence et l'échantillon avec les cavités et les composants passifs. La discussion portera sur les différences avec l'échantillon de référence à des températures spécifiques et la possible réversibilité des mesures sur les échantillons. Les mesures donnent une variation Δz selon l'axe z par rapport au point le plus bas évalué sur le PCB.

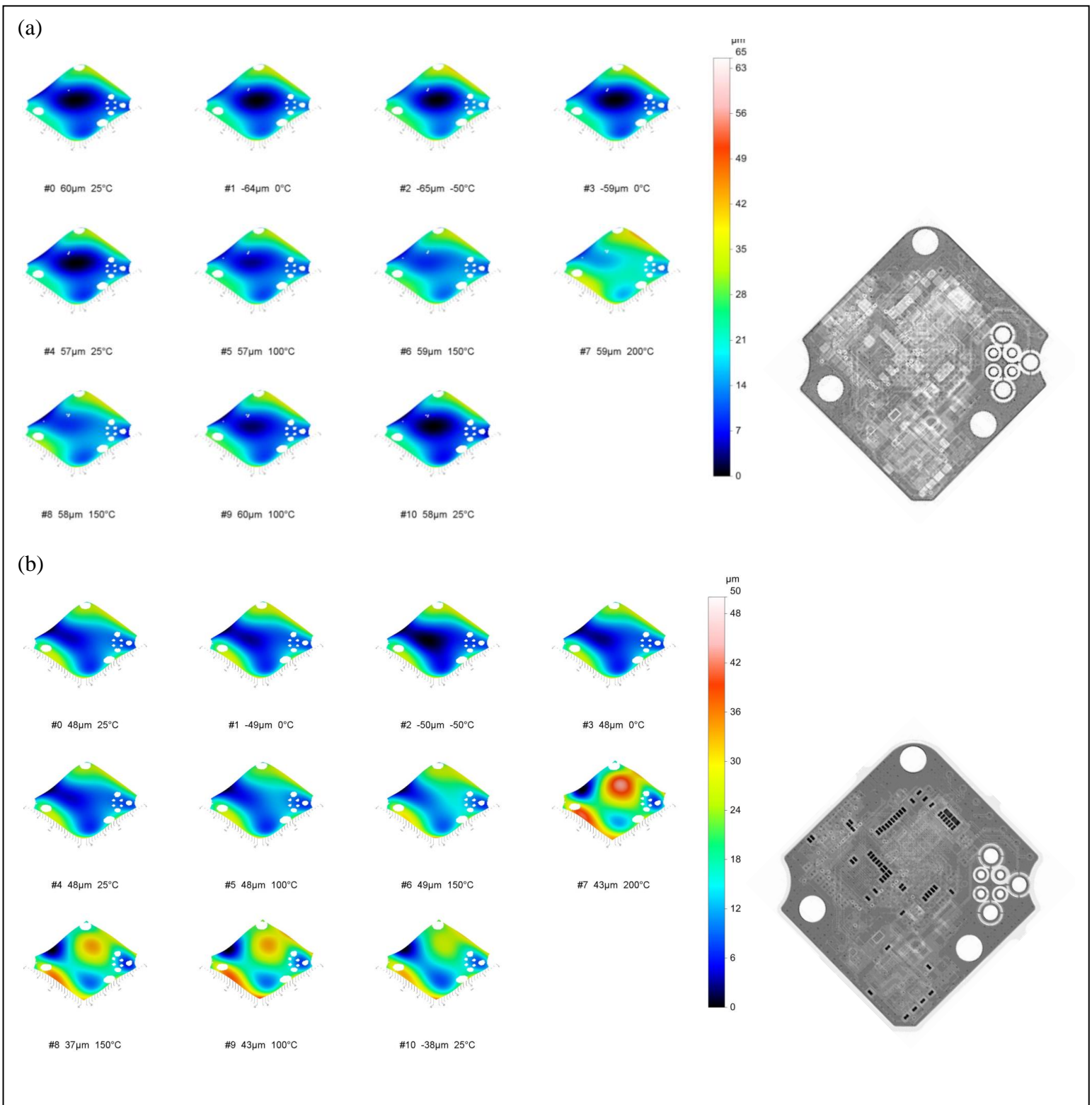


Figure IV-25 Mesures de déformation et de topographie en 11 étapes d'un cycle de température entre - 50°C et +200°C sur (a) un échantillon sans composant et (b) un autre avec composants et cavité et leur image par rayon X respective

Tout d'abord, il est important de faire le lien avec les simulations menées même si le prototype n'est pas finalisé et donc pas complètement semblable aux modèles étudiés. Ainsi, les comparaisons entre le prototype avec composants et la simulation présente des résultats proches (cf. Figure IV.26) dans l'aspect. La déformation selon l'axe z est évaluée à 38,5 µm

dans la couche cœur en considérant les anciens matériaux utilisés pour le prototype contre 48 μ m mesuré pour l'échantillon avec composants. Ajouter les couches extérieures avec une simple homogénéisation de l'empilement des couches amène à un résultat plus proche en termes de déformations (cf. Figure IV.26.c) mais l'aspect du PCB est éloigné du résultat réel. L'axe de déformation en bleu qui s'étend d'un bord à l'autre (verticalement sur la figure) ne se retrouve guère et ne s'étend pas jusqu'au bord. Tandis que les coins inférieurs qui se relèvent sont également bien présent.

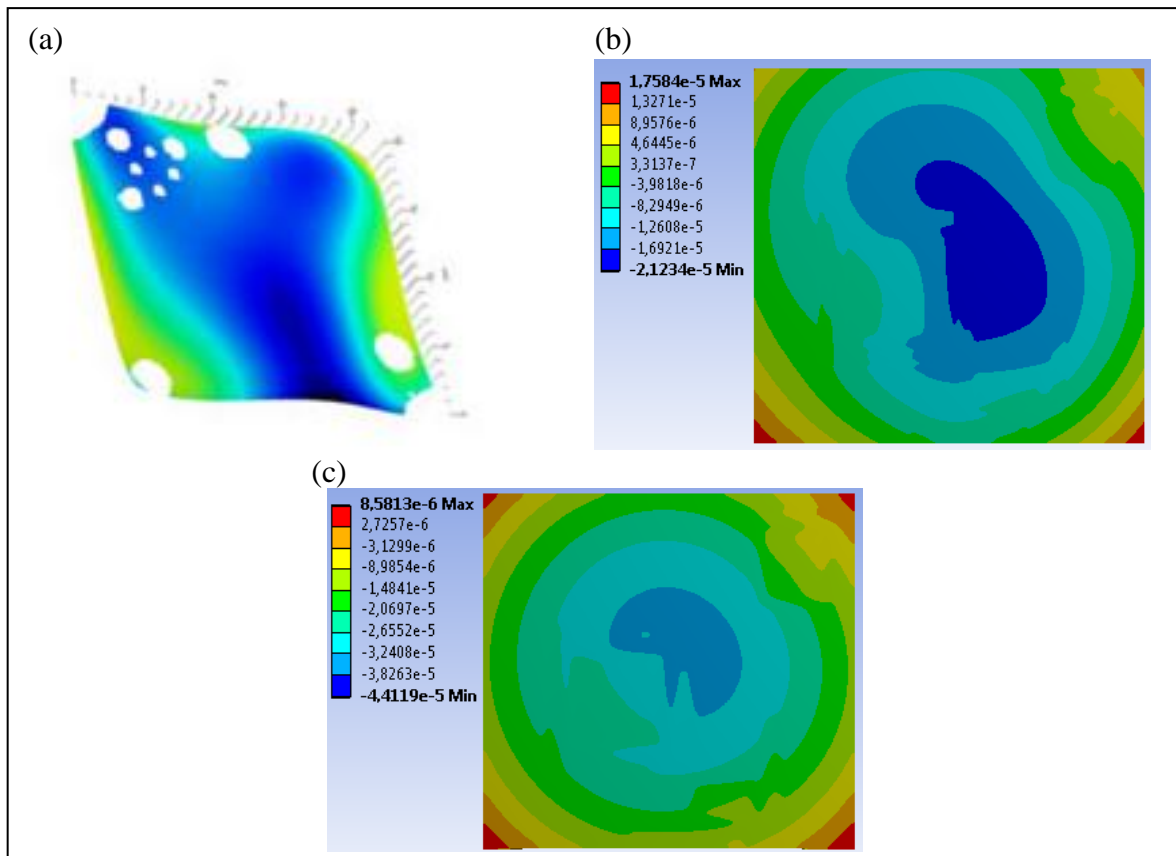
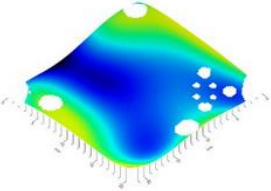
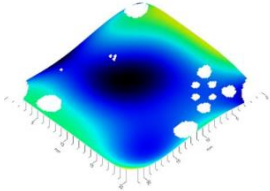
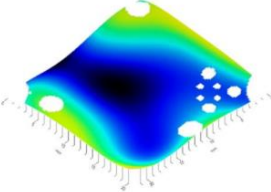
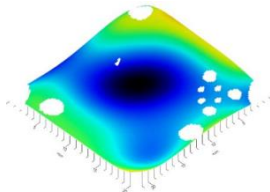
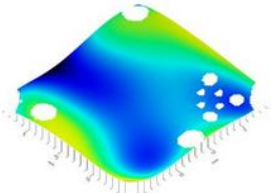
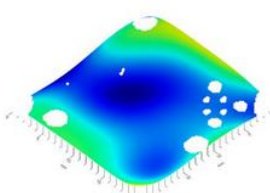
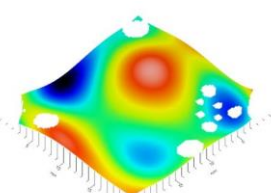
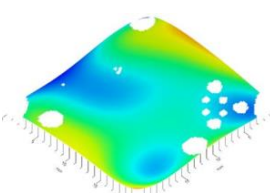
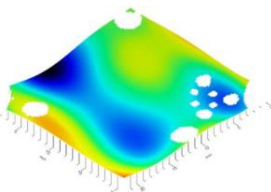
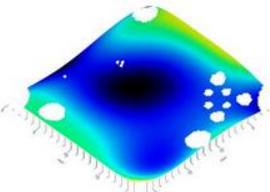


Figure IV-26 Comparaison de l'aspect de la déformation entre (a) les mesures sur un prototype non fonctionnel, (b) la déformation estimée dans la couche cœur et (c) la déformation en présence de l'ensemble des couches

Contrairement aux mesures les simulations ne tiennent pas compte de l'ensemble des vias qui parsèment la structure ce qui nécessiterait de travailler sur un modèle équivalent de couches. Il serait possible de découper la structure en plusieurs sous-parties pour minimiser la complexité du modèle et prévenir de la représentation de chaque élément présent tel que les vias. Mais l'ensemble des cavités et éléments architecturaux du premier prototype n'ont pas été respectés (absence des passifs, certains vias mal positionnés, ...). Le développement d'un modèle plus précis et juste devait venir avec le développement du prototype fonctionnel qui n'a pu être réalisé (retard sur la production du prototype) fonctionnel dans le cadre des travaux de thèse.

Le tableau IV.8 se concentre sur 4 points de mesures pour discussion entre le comportement de référence et le comportement avec des composants enfouis.

Tableau IV-8 Comparaison des mesures de TDM à plusieurs températures clés

| Température | PCB avec composants enfouis | PCB sans composant |
|-------------|---|---|
| 25°C | $\Delta Z_{Max}=48\mu m$  | $\Delta Z_{Max}=60\mu m$  |
| -50°C | $\Delta Z_{Max}=50\mu m$ Réversible  | $\Delta Z_{Max}=65\mu m$ Réversible  |
| 100°C | $\Delta Z_{Max}=48\mu m$ Réversible  | $\Delta Z_{Max}=57\mu m$ Réversible  |
| 200°C | $\Delta Z_{Max}=43\mu m$ Irréversible  | $\Delta Z_{Max}=59\mu m$ Réversible  |
| 25°C | $\Delta Z_{Max}=38\mu m$  | $\Delta Z_{Max}=58\mu m$  |

Le premier constat à faire à température ambiante est que le PCB avec composant présente un warpage, aspect de la surface, moins important tout en présentant une forme similaire. Les bords se recourbent tandis que le centre est plus stable. La ressemblance est d'autant plus frappante à très basse température (-50°C) bien que le PCB avec composant semble plus stable que celui sans.

De plus, les déformations occasionnées par la baisse de température sont réversibles dans les deux cas. De la même manière, en montant en température, la progression de la déformation moyenne entre les deux PCB est semblable et homogène bien que le différentiel maximal est plus stable pour le PCB avec composant. Jusqu'à 100°C les déformations sont réversibles dans les deux cas. C'est au-delà de 100°C qu'apparaissent des différences majeures puisque le côté du PCB avec la plus grande cavité et le plus grand nombre de composants semble se déformer davantage. En effet, le PCB avec composants enfouis présente une déformation locale importante qui s'avère irréversible puisque la topographie de celui-ci est altérée une fois revenu à 25°C contrairement au PCB sans composant. La déformation de l'échantillon de référence est bien plus homogène et réversible.

La cause mise en avant pour cette défaillance est l'effet « popcorn » abordé dans le chapitre I. La figure IV.27 identifie la zone de défaillance principale par rapport à la position des composants et des cavités et celle-ci se produit précisément au niveau de la plus grande des cavités et comptant le plus de composants. Heureusement, ce phénomène ne se produit qu'au-delà de 100°C, et donc en dehors de la température attendue de fonctionnement du système. Il faut également rappeler que ces cavités sont vides dans le cas du prototype 1 et donc sujettes à des déformations thermiques plus importantes. En revanche cela tend à limiter l'utilisation de la technologie d'enfouissement de manière générale puisque les matériaux utilisés ne sont pas adaptés à des températures supérieures à 100°C. En effet la résine commence à se détériorer dès 135°C et le pré-imprégné à 170°C. La technologie d'enfouissement doit donc être utilisée dans des plages de températures relativement basses.

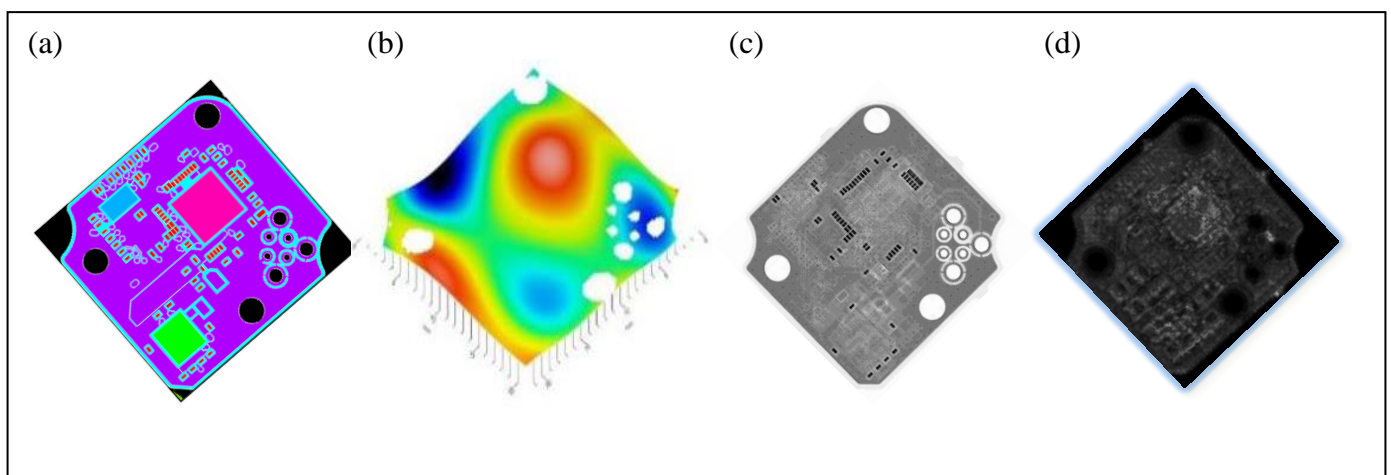


Figure IV-27 Identification de la zone principale de défaillance :
(a) Position attendue des composants et cavités dans le PCB, (b) défaillance observée à 200°C par TDM,
(c) Image par rayon X de l'échantillon et (d) Image acoustique à 15MHz

IV.6 Conclusion

Pour se rapporter aux cas plus spécifiques du circuit EDDEMA, il était nécessaire de détailler le cahier des charges du prototype final ainsi que de revenir sur les choix faits durant ces trois années d'études. Ainsi, le choix des matériaux a été fait en liant les contraintes que ceux-ci imposent lors de la fabrication et les spécifications des composants et confirmé par les simulations.

Le second point reposait sur l'architecture du circuit dont le positionnement des composants. Une première étude faite sur un circuit simplifié apporte des critères de minimisation en termes de contraintes et de déformations. A terme ce sont les critères CEM qui ont guidé le positionnement. Les circuits ont été complexifiés pour intégrer les composants passifs sous forme de blocs équivalents homogènes selon deux cas étudiés pour la disposition : les regrouper ou les répartir en couronne autour des actifs. Cette seconde solution privilégiée par la CEM apporte une diminution de la déformation et de la contrainte dans la couche cœur du PCB mais augmente les contraintes sur les composants actifs enfouis du circuit, tout en restant dans des limites raisonnables. De plus l'ajout des couches extérieures démontre une diminution de l'effet d'empreintes des composants enfouis.

Utilisant les bases du modèle 3D sélectionné, l'usage de sous-modèles pour le vieillissement a démontré une faible différence de résultats pour des temps de simulation bien plus longs. De plus, les paramètres de la fabrication ont été intégrés pour tenter d'évaluer son impact sur la durée de vie mais les résultats présentent des incertitudes plus importantes.

L'étude d'un premier prototype a apporté une compréhension des problèmes liés à la fabrication (positionnement, ...) et a permis de valider la méthode employée en termes de robustesse et de fiabilité. En revanche, l'étude de comportement thermique sur ce dernier a démontré que le modèle 3D du circuit nécessitait des corrections et notamment au niveau des couches extérieures et la prise en compte de l'ensemble des vias présents dans la structure. De plus, un défaut (déformation non réversible d'une cavité de composant actif) a été identifié lors de la montée en température même si celui-ci apparaît au-delà des températures prévues de fonctionnement. Il montre cependant une limitation à l'usage de la technologie d'enfouissement avec les matériaux considérés.

Il apparaît donc nécessaire de pousser l'étude sur la déformation du circuit pour obtenir un modèle plus juste mais en l'absence de prototype final cela n'a pas été possible dans le cadre de cette thèse.

De plus, les composants enfouis ont prouvé qu'ils n'étaient pas l'élément limitant dans la fiabilité. L'étude des composants en surface en tenant compte de la présence de ces composants enfouis qui affectent la déformation globale du PCB est un axe d'étude envisageable pour poursuivre ces travaux.

IV.7 Références bibliographiques

[Azo-01] “A Background to Silicon and its Applications”, Azo Materials, 2001, <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=599>

[Fas-85] O. Fassi-Fehri, “Le problème de paire d’inclusions plastiques et hétérogènes dans une matrice anisotrope - Application à l’étude du comportement des matériaux composites et de la plasticité,” Université de Metz, 1985.

[Jan-13] K. Janc, “Micromechanical modeling of bone elastic properties based on computed tomography,” AGH – University of Science and Technology, 2013.

[Kne-65] G. Kneer, “Über die Berechnung der Elastizitätsmoduln vielkristalliner Aggregate mit Textur,” Solid State Phys., vol. 9, no. 3, pp. 825–838, 1965.

[Kpo-16] W. Kpobie and al., “Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components”, Microelectronics Reliability, Volume 65, October 2016, Pages 108-130

[Ins] Mesures de warpage, coplanarité, dilatation thermique, Insidix, <http://www.insidix.com/Mesures-de-Topographie-et-Deformation-TDM.26+M52087573ab0.0.html>

[Mic] Micron Technology, Flash memory N25Q032A datasheet, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/558899/MICRON/N25Q032A.html>

[Mur-87] T. Mura, Micro-mechanics of Defects in Solids. M. Nijhoff, 1987.

[Nor-69] K.C. NORRIS, A.H. LANDZBERG, “Reliability of Controlled Collapse Interconnections”. IBM J. Res. Develop., vol. 13, p. 266 (1969)

[Osm-13] S. Osmolovskyi and al, « Parameters of the manufacturing process and reliability of embedded components », 36th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 978-1-4799-0036-7/13/\$31.00 ©2013 IEEE, 2013

[Sch-13] R. Schwerz, B. Boehme, M. Roellig, K. -. Wolter and N. Meyendorf, "Reliability of embedding concepts for discrete passive components in organic circuit boards," 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, 2013, pp. 1243-1251. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575734

[STM-18] ST Microelectronics, Versatile imaging processor, STV 0991 datasheet, https://www.st.com/resource/en/data_brief/stv0991.pdf, Octobre 2018

[STM-19] ST Microelectronics, Multiple power management for automotive vision and radar systems L5965 datasheet, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l5965.pdf>, Mai 2019

[Wei-18] G. Weidinger and al., “New Embedded Inductors For Power Converter Applications”, Minapad, Grenoble, France, May 16-17, 2018

[Xu-19] Yhifei Xu, « Analyse tensorielle de circuits imprimés multicouches : Applications numériques et ébauche d'analyse multiphysique », thèse, Rouen, Mars 2019

[Yan-15] Z. Yang, F. Gunawan, X. Gu, K. Ding and H. He, "Classification and 3D stack of Embedded Components technology in Substrate," *2015 16th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Changsha, 2015, pp. 666-671. doi: 10.1109/ICEPT.2015.7236674

[Zat-00] P. Zattarin, "Etude de l'intégration d'un modèle polycristallin dans un code d'éléments finis en élastoplasticité," Université de Metz, 2000.

Conclusion Générale et perspectives

Nous avons travaillé dans le cadre d'un projet européen visant à développer l'utilisation de la technologie d'enfouissement pour un circuit spécifique : une caméra positionnée sur une automobile. Pour répondre à la demande de Valeo, leader du projet, plusieurs partenaires se sont alliés dans la conception de ce circuit pour attester de sa faisabilité et de sa fiabilité. Les travaux de thèses se focalisaient sur les apports de la technologie d'enfouissement sur les autres technologies mieux établies, notamment selon une approche d'étude thermomécanique du problème. L'objectif était d'utiliser un outil de simulation par éléments finis pour valider les atouts de la technologie d'enfouissement, et participer à la conception dans un objectif d'optimisation et de gain de temps. Les principaux choix technologiques ce sont fait avec AT&S qui était en charge de la fabrication.

Dans notre état de l'art, la technologie d'enfouissement a démontré ses bénéfiques premiers (gain de place pour une intégration 3D) dans la conception de circuits tout en étant compatible avec les autres technologies. D'autres études ont confirmé les bénéfiques attendus en termes de fiabilités mécaniques par des simulations ou des tests sur des prototypes, mais l'utilisation de composants actifs dans cette technologie est encore récente. De plus, les exigences du domaine automobile nous poussent à proposer une nouvelle approche qui nécessitera de faire des choix précis dans la modélisation du problème. Cette modélisation comporte deux difficultés majeures : intellectuelles (la connaissance des matériaux utilisés, leur représentation, les lois de comportement, la compréhension de l'ensemble des phénomènes) et matérielles (temps et capacités de calcul, espace de stockage). Une fois les principaux choix de modélisations faits, nous nous sommes orientés vers une première étude des éléments considérés comme fragiles dans l'électronique, les interconnexions. Les composants et leurs interconnexions ont ainsi été étudiés selon diverses approches pour définir les points clés pour une étude générale (influence de plusieurs paramètres) et estimer le gain des choix technologiques. Enfin pour se raccrocher au cas concret du prototype, une étude plus générale du circuit a été menée afin d'apporter une expertise sur la conception.

Pour commencer, la littérature a apporté de nombreux éléments dans la définition des matériaux et les choix de modélisation. En effet, certains des matériaux utilisés dans la technologie sont très communs tels que le cuivre ou le silicium tandis que d'autres sont plus spécifiques tels que les pré-imprégnés ou la résine. Les propriétés clés ont pu être identifiées pour chacun des matériaux. Ainsi, le CTE, le module de Young, le coefficient de Poisson ou les matrices de rigidité des matériaux ont été établies. Des modèles plus complexes ont été sélectionnés pour représenter les points sensibles que sont les interconnexions, sur lesquelles nous nous sommes focalisés dans un premier temps. Ces modèles plus complexes vont dépendre des matériaux à représenter ainsi que la nécessité d'avoir un complément de données telles que les dépendances des propriétés en fonction de la température ou l'hétérogénéité du matériau. Ainsi, la résine accueillant les composants sera représentée par une matrice des rigidités complètes dans les modèles, les joints de brasures useront du modèle viscoplastique d'Anand tandis que le cuivre répondra au modèle de Manson-Coffin-Basquin.

Les propriétés des matériaux choisis vont permettre la résolution des équations de la thermomécanique au sein du modèle par éléments finis construit. Ce modèle nécessite un important travail d'ajustement notamment dans la réalisation du maillage et la définition des conditions aux limites et des interfaces. Ce travail étant affecté par les choix structuraux faits, plusieurs pistes ont été envisagées pour représenter notre structure. L'usage de modèles 2D et 3D présente différents avantages et inconvénients. Les solutions de simplification par sous-modèle ou homogénéisation se sont avérées indispensables pour la représentation de la structure générale en 3D et de ses effets locaux sur les composants et leurs interconnexions.

A partir de ces éléments préliminaires, une étude de la durée de vie par simulation selon des cycles thermiques a été réalisée. L'équipe ayant déjà réalisé des simulations pour des joints de brasure selon le modèle viscoplastique d'Anand, nous avons réalisé une étude sur ce type d'interconnexion pour le composant flash enfoui. Initialement, nous avons évalué l'impact de la construction du modèle. En effet, les choix de maillage (type et taille) et de la géométrie du modèle vont impacter les résultats et le temps de simulation. La brasure cubique avec un maillage de $10\mu\text{m}$ évalue une rupture au niveau de la brasure à 750 cycles en 4 heures de simulations tandis que le maillage de $5\mu\text{m}$ prédisait à 663 cycles pour plus de 7 heures de simulation. Le modèle plus réaliste de la brasure et sensément le plus juste postulait de 845 cycles en 16 heures de simulations. Ainsi, les résultats selon ces deux critères ont présentés des variances de l'ordre de 10-25% pour des temps de simulations doublés. Au-delà du réalisme, nous étions intéressés pour obtenir une estimation basse de la durée de vie tout en restant dans des temps de simulation raisonnable. Par conséquent, la représentation simpliste avec un maillage fin était la plus intéressante.

A partir de ce modèle, nous avons comparé les résultats entre un composant monté en surface et le même enfoui avec des pré-imprégnés différents pour des cycles de $+80^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}$. Le gain apporté par la résine s'est largement détaché puisque, de 663 cycles estimés en surface, l'usage d'un pré-imprégné classique permettait de plus que tripler ce résultat (2000 cycles), tandis que des pré-imprégnés plus élaborés pouvaient apporter un gain bien supérieur (3400 cycles).

La technologie développée par AT&S se repose sur la réalisation de microvias par électrodéposition de cuivre pour assurer la connexion du composant avec le circuit. Le modèle de Manson-Coffin-Basquin a été sélectionné pour évaluer la réponse des vias aux sollicitations en température. Pour étudier ces vias sans connaître les propriétés exactes du cuivre déposé, nous avons continué d'opter pour une évaluation pessimiste en sélectionnant les paramètres prédisant les durées de vie les plus faibles. Partant d'un modèle en 2 dimensions du composant Flash, le modèle utilisant les propriétés linéaires ou non-linéaires de matériaux ont été exploités pour identifier le point sensible des interconnexions. Dans l'ensemble des cas le point faible identifié fut l'interface entre le composant et le via. Le modèle linéaire a ainsi été démontré comme plus contraignant dans l'estimation de la durée de vie si la convergence du modèle non-linéaire est assurée. En effet, l'accommodation des matériaux selon leurs paramètres a imposé de simuler un nombre minimum de cycles de température pour confirmer la convergence des résultats. Ces premiers résultats, 3500 cycles en linéaire et 5000 cycles en non-linéaire apparaissent comme supérieurs à la tenue des

brasures enfouies (2000 cycles). Si la prédiction du modèle linéaire est satisfaisante il devient possible de s'abstenir de réaliser l'étude en non-linéaire.

Comme il est possible de réaliser divers cycles de température pour accélérer les vieillissements, les simulations ont été menées selon 3 cycles différents. Ainsi, augmenter la plage de température induit d'avantage de déformation réduisant la durée de vie. Par ailleurs, les propriétés de la résine étant affectées par l'élévation en température, les hautes températures sont plus critiques que les basses sur la structure. D'autant plus qu'il est nécessaire de respecter les plages de températures de fonctionnement des composants du circuit. La limite haute est ainsi déterminée par le composant STV à 105°C, c'est le cycle de +80°C/-40°C qui a été préconisé pour le reste des simulations.

Les deux autres composants prévus à l'enfouissement ont été modélisés selon le même principe pour évaluer quelle interconnexion de quel composant pourrait être le premier point de défaillance. Ces résultats en 2D démontrent que le composant flash serait l'élément le plus sensible dans le circuit puisque l'évaluation prédirait une défaillance à 5000 cycles contre 5300 cycles pour le STV et 6700 cycles pour le L5965.

Bien qu'apportant des informations majeures, les modèles 2D sont insuffisants par leur construction et l'ensemble de l'étude a ainsi été reprise en 3 dimensions. Cette étude a mis en avant sur le composant Flash, une déformation plus importante dans l'axe normal au plan d'étude précédent et par conséquent « invisible » réduisant la prédiction initiale à 2600 cycles en non-linéaire. Par ailleurs, si la prédiction en 3D se limitait à l'axe d'étude 2D, la durée de vie serait estimée entre 5000 et 6000 cycles, un résultat supérieur à l'étude 2D. Cette tendance se vérifie avec l'étude 3D du composant STV qui parvient à égaler le résultat de 5300 cycles du modèle 2D dès le 10^{ème} cycle de température quand l'accommodation n'est pas encore atteinte. Ce résultat plus encourageant du modèle 3D s'explique par la densité des interconnexions. En effet, le composant STV présente une symétrie diagonale dans la répartition des vias qui se répartissent de manière homogène sur la surface du composant. Par ailleurs la tendance globale dégagée par l'étude 2D se confirme dans l'étude 3D. Ainsi, dans la mesure où nous restons vigilants sur le positionnement des vias, la modélisation 2D s'est démarquée comme le résultat le plus contraignant dans son estimation, pouvant donc suffire comme évaluation si satisfaisant aux exigences préalables.

L'ensemble des résultats ont amené à la réflexion des paramètres impactant la prédiction réalisée puisque qu'aucune tendance géométrique ne se dégageait par l'étude de nos trois composants très différents. Ainsi, un protocole de simulation a été mené pour évaluer l'influence de la longueur du composant pour une même densité d'interconnexion et de la distance entre ces vias dans une étude en 2 dimensions. Au-delà d'une certaine longueur de composant, l'influence de ce paramètre perd de son influence si la densité de vias est conservée. L'estimation faite passe de 6500 cycles à 5600 cycles entre 4,2mm et 4,7mm mais se maintient à ce résultat pour une longueur de 5,2mm. En revanche la distance entre les vias est déterminante dans la prédiction faite. En effet, des résultats sont visibles dès une variation de 50µm dans les faibles écarts (300µm). De 250µm à 350µm, 200 cycles sont perdus à chaque changement de 50µm mais cette variation ne se poursuit pas linéairement puisqu'à

900µm, l'estimation aboutit à un résultat de 5000 cycles. Le résultat supplémentaire apporté par ce protocole est l'impact qu'à la distance du dernier via au bord du composant. Cette distance tend à déformer d'avantage les vias extérieurs pouvant impacter la tenue du via si cette distance devient trop importante. Les premières règles à préconiser dans l'enfouissement des composants qui se sont dégagées sont de répartir de manière homogène les interconnexions sur l'ensemble de la surface en essayant de minimiser la distance entre les vias, et la distance entre les vias et les bords du composant, et de favoriser les composants avec un grand nombre d'entrées/sorties pour une plus grande fiabilité.

Après l'élaboration des modèles autour des composants, le projet nécessitait de se rapprocher du circuit en développement. Différents axes d'études ont été privilégiés. Dans un premier temps, un protocole de simulation a été développé pour évaluer l'impact du positionnement de composants dans la couche cœur. Cet impact a été mesuré en ne tenant compte que des composants actifs. Les points sensibles étudiés ont été la déformation de la couche cœur et les contraintes dans cette couche et sur les composants. Même si la minimisation de ces éléments est intéressante, il a été mis en avant que la contrainte ne dépassât pas les limites de rupture des matériaux en compression qui pouvait être un frein à l'usage de la technologie d'enfouissement. La liberté de positionnement pour les actifs a donc été avérée même si des règles se sont dégagées. Ainsi, il est préférable d'écarter les composants les uns des autres et de les positionner sur les bords du circuit plutôt qu'au centre. L'impact d'un composant sur un autre est lié à la taille de ceux-ci. Un grand composant écrasera d'autant plus un autre composant que celui-ci est petit.

Evidemment le circuit n'est pas aussi simple que l'enfouissement de trois composants. Celui-ci intègre un grand nombre de composants passifs enfouis. Le nombre de passifs et leur taille restreinte relativement au circuit ont imposé de trouver une solution dans leur représentation. Nous avons opté pour la méthode d'homogénéisation des passifs regroupés. Ainsi, dans un premier temps, des packs de passifs ont ajouté des éléments de taille équivalentes aux composants actifs mais plus souple. Considérer ces blocs de passifs a réduit la déformation de la couche mais a augmenté la contrainte sur les actifs. Ensuite, le projet a opté pour disposer les passifs en couronne autour des actifs pour satisfaire aux considérations de la compatibilité électromagnétique. Cette solution est d'autant plus favorable pour réduire la déformation mais la proximité des composants entre eux a entraîné une augmentation conséquente de la contrainte. Ensuite pour mieux visualiser les phénomènes de déformation dans l'empilement des couches, des simulations 2D ont été réalisées pour constater de l'empreinte laissée par les composants dans la couche cœur. Cette empreinte pourrait être un élément perturbant le montage des composants en surface en créant des déformations à la surface du circuit, mais l'ajout des couches extérieures réduit cette empreinte jusqu'à la faire disparaître avec suffisamment de couches. Il est donc préconisé d'utiliser la technologie d'enfouissement avec un nombre de couches conséquent.

D'autres éléments qu'il faudrait prendre en compte pour le vieillissement apparaissent dans le circuit tels que les vias assurant la connexion entre les couches et les trous pour fixer le circuit à son bâti. Ces autres éléments ont été ignorés pour réduire la complexité de la structure et du maillage. Le principe de sous-modèle a été appliqué pour comparer les

résultats trouvés jusqu'alors avec ceux tenant compte des conditions aux limites de notre modèle. Une déformation globale plus importante a été évaluée mais la déformation relative d'un cycle reste très proche. En effet nous avons trouvé pour le modèle isolé $\Delta\epsilon_{\text{isolé}} = 0,431\%$ contre $\Delta\epsilon_{\text{sm}} = 0,465\%$ pour des temps de simulations bien supérieurs. Il est nécessaire de simuler le circuit complet avec ses composants en respectant les cycles puis réimplanter les conditions dans un modèle du composant qui ne peut plus être réduit par la symétrie. Disposant d'un temps limité, d'un espace de stockage limité et de performances de calcul limitées la solution du sous-modèle a été abandonnée pour estimer le vieillissement.

Malgré les difficultés de production d'un prototype expérimental, quelques tests ont pu être réalisés pour confirmer ou infirmer certaines de nos simulations. Le premier prototype ne comportait pas les composants actifs et leurs interconnexions et le second prototype a été produit trop tardivement pour affiner le modèle de simulation. Le protocole de fabrication a pu être confirmé dès le premier prototype. L'imagerie par rayon X ou la réalisation de micro section n'ont abouti à l'observation d'aucune défaillance majeure suite à la fabrication et les premiers tests de robustesse ou fiabilité. Par ailleurs les tests de vieillissement accéléré menés jusqu'à 2500 cycles de $+80^{\circ}\text{C}/-40^{\circ}\text{C}$ n'ont dévoilé aucune défaillance dans les microvias, approchant ainsi de notre estimation la plus limitante sur la mémoire Flash de 2600 cycles. Par ailleurs, compte tenu du fort facteur de vieillissement du cuivre, cette tenue répond très largement au cahier des charges d'un fonctionnement sur 15 ans du circuit pour ce qui est des composants enfouis et des interconnexions. Pousser le circuit à ses limites a conduit le cœur à se délaminer sans affecter les vias, présageant d'une bonne robustesse des interconnexions. En plus des tests de qualifications, des mesures de topographie ont été réalisées à différentes températures et comparées aux résultats de simulation. Nous retrouvons quelques aspects de la déformation dans les résultats de simulation mais le modèle reste éloigné de la réalité. Ces différences s'expliquent par l'absence de tous les détails de la structure, l'homogénéisation faite ne tenant pas compte de la teneur en cuivre des couches et des vias, et par l'homogénéisation de certains éléments tels que les passifs. En revanche, ces mesures de topographie ont mis en évidence des déformations irréversibles pouvant se produire avec l'élévation en température dans le cas de composants enfouis. Ces phénomènes ne se produisant qu'à des températures supérieures aux plages de fonctionnement des composants, ils ne sont pas critiques pour notre utilisation mais peuvent être une limite à l'utilisation de la technologie d'enfouissement. Pour des applications à plus hautes températures, il serait nécessaire de repenser les matériaux utilisés.

Nos travaux de recherche s'axent sur des problématiques qui ont pu en partie être développées. Ainsi, des distributions de stress similaires pour des composants différents à Alti-Venin et à Kpobie se retrouvent sur les composants : des bords et des interconnexions plus fortement contraints avec un fléchissement apparent du composant. Ces études se concentraient davantage sur les paramètres de la cavité que sur le composant en lui-même. Par ailleurs ces études se concentraient principalement sur des composants passifs, le nombre d'entrées-sorties est bien inférieur. La modélisation de Kpobie d'un composant actif proposait d'homogénéiser la couche d'interconnexions et de résine pour étudier la contrainte du composant monté par flip-chip et enfoui. Cette méthode éliminait fortement les conclusions possibles sur les interconnexions sur lesquelles nous avons choisi de nous concentrer. Enfin

les résultats expérimentaux quant à eux sont similaires aux travaux qu'ont pu proposer d'autres équipes tels que Larson, Osmolovsky ou Stahr. Les circuits usant de la technologie d'enfouissement répondent aux qualifications de l'industrie et montrent également de meilleurs résultats que les techniques d'assemblage en surface. Nous avons également poussé les tests de vieillissement jusqu'à 2500 cycles, au-delà de ces autres équipes. Nous avons donc poussé l'usage de la simulation par éléments finis pour démontrer de son intérêt en tant qu'étude préliminaire en adaptant des méthodes pour étudier des composants actifs enfouis et leurs interconnexions de type via.

Evidemment, en tant que simulations, le modèle développé a présenté ses limites. Pour pallier à certaines de ces limites nous avons décidé de réaliser des estimations pessimistes. Ces estimations répondant aux exigences du projet et vérifiées par des mesures expérimentales, il n'a pas été nécessaire d'affiner le modèle plus précisément. Le circuit, de par sa complexité, ne pouvait être modélisé pleinement et précisément, cette contrainte matérielle était difficilement contournable. Il aurait également été souhaité d'affiner le modèle du circuit en travaillant sur le prototype et le rendre plus juste dans ses réponses aux changements de températures et d'intégrer le phénomène de conduction thermique dans les simulations. Malheureusement la production tardive du composant a bloqué cette résolution. La technologie d'enfouissement étant encore récente, de nombreux points sont à l'étude. Le focus de nos recherches a été fait sur les interconnexions de type vias en évaluant l'impact des dimensions du composant sur celles-ci.

En prenant en compte l'ensemble de la littérature et le travail réalisé, la technologie d'enfouissement nécessite encore un long travail de recherche. Tout d'abord des études parallèles ont été menées au sein du projet. Il serait envisageable de lier la modélisation thermique développée par l'université de Vienne au modèle thermomécanique pour une meilleure représentation du circuit. La complexification du modèle est une approche envisageable et notamment l'intégration de certaines dépendances mises de côté telles que l'influence de la température sur les propriétés des matériaux. Enfin, la poursuite majeure de la recherche sur cette technologie pour moi, et qui poursuit la représentation du circuit faite, serait d'évaluer l'impact du composant enfoui sur le composant en surface. En effet, nous avons vu que l'accumulation de couche permet de minimiser l'empreinte des composants enfouis mais que les composants impactaient toujours la déformation du circuit. Il pourrait donc être intéressant de mesurer, en plus du gain apporté par cette technologie, l'impact des composants enfouis sur la fiabilité des composants montés en surface. Cet impact pourrait être négatif pour ces derniers mais acceptable ou bénéfique ajoutant un avantage non évident à l'usage de cette technologie. L'intégration de ces divers éléments ajouterait aux bénéfices d'utiliser les outils de simulation comme éléments précurseurs à la conception.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Mesures de traction

Mesures de traction réalisées sur un banc de traction mécanique Instron 5565



9 Types d'échantillons :

- Eprouvette de 10 cm de long et de 2 cm de large et d'épaisseur en fonction du matériau
- 3 matériaux différents : Core R1577, Hitachi 770 1037 et Hitachi 770 1080
- 3 Empilages différents : Matériau nu, matériau + une couche laminée de cuivre de 30 μ m et matériau + 2 couches laminée de cuivre de 30 μ m chacune

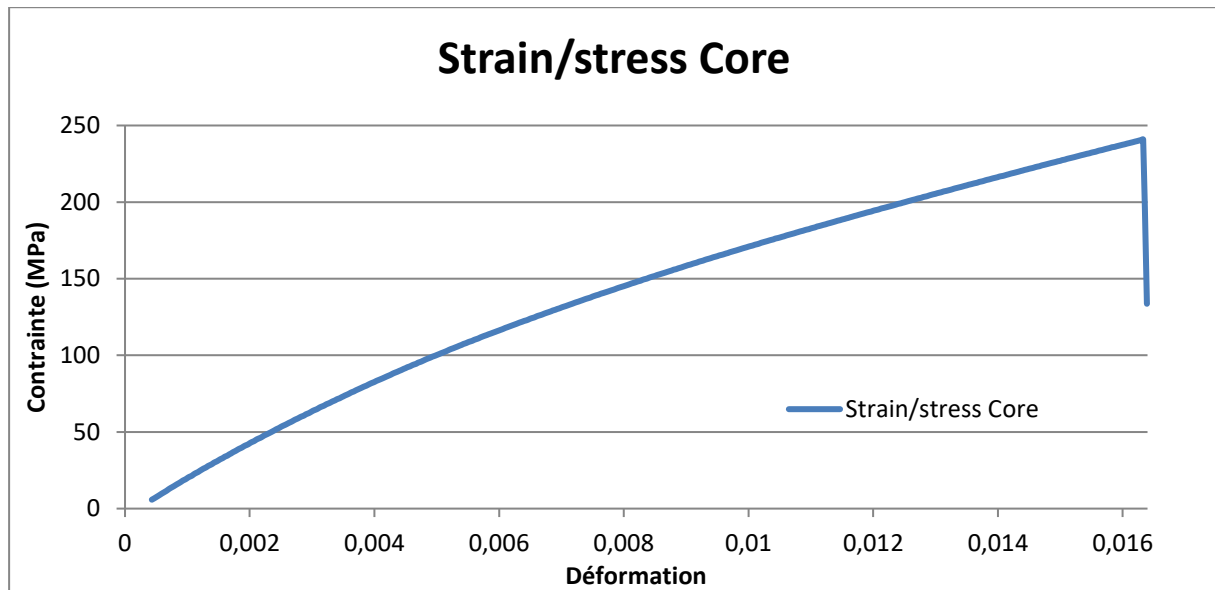
Pour chaque type d'échantillon, 3 à 5 mesures ont été réalisées pour obtenir un résultat moyen de courbe de contraintes-déformations.

Epaisseur en μ m des échantillons

| | Nu | Une couche laminée | Deux couches laminées |
|------|-----|--------------------|-----------------------|
| Core | 145 | 175 | 205 |
| 1037 | 165 | 195 | 225 |
| 1080 | 225 | 255 | 285 |

Exemple d'exploitation des mesures de traction sur le core nu

| Temps (s) | Charge (N) | Contrainte = Charge / Section (MPa) | Déformation (%) |
|-----------|------------|--|-----------------|
| 1 | 9,570 | 3,30 | 0,033 |
| 2 | 34,045 | 11,74 | 0,067 |
| 3 | 57,86 | 19,95 | 0,1 |
| 4 | 80,47 | 27,75 | 0,133 |
| 5 | 102,49 | 35,34 | 0,167 |
| 6 | 123,67 | 42,64 | 0,2 |
| 7 | 144,49 | 49,82 | 0,234 |
| 8 | 164,47 | 56,71 | 0,267 |
| 9 | 184,19 | 63,51 | 0,3 |
| 10 | 202,97 | 69,99 | 0,333 |
| 11 | 221,69 | 76,44 | 0,367 |
| 12 | 239,63 | 82,63 | 0,4 |
| 13 | 257,20 | 88,69 | 0,433 |
| 14 | 274,03 | 94,49 | 0,467 |
| 15 | 290,61 | 100,21 | 0,5 |
| 16 | 306,56 | 105,71 | 0,533 |
| 17 | 322,21 | 111,11 | 0,567 |
| 18 | 337,15 | 116,26 | 0,6 |
| 19 | 352,06 | 121,40 | 0,633 |
| 20 | 366,39 | 126,34 | 0,667 |
| 21 | 380,59 | 131,24 | 0,7 |
| 22 | 394,16 | 135,92 | 0,733 |
| 23 | 407,93 | 140,66 | 0,767 |
| 24 | 420,89 | 145,14 | 0,8 |
| 25 | 434,03 | 149,67 | 0,833 |
| 26 | 446,84 | 154,08 | 0,867 |
| 27 | 459,52 | 158,45 | 0,9 |
| 28 | 471,75 | 162,67 | 0,933 |
| 29 | 483,67 | 166,79 | 0,967 |
| 30 | 495,76 | 180,95 | 1 |
| 31 | 507,32 | 174,94 | 1,033 |
| 32 | 518,89 | 178,93 | 1,067 |
| 33 | 530,18 | 182,82 | 1,1 |
| 34 | 541,53 | 186,73 | 1,134 |
| 35 | 552,59 | 190,55 | 1,167 |
| 36 | 563,56 | 194,33 | 1,2 |
| 37 | 574,40 | 198,07 | 1,234 |
| 38 | 585,17 | 201,78 | 1,267 |
| 39 | 595,77 | 205,44 | 1,3 |
| 40 | 606,43 | 209,11 | 1,333 |
| 41 | 616,76 | 212,67 | 1,367 |
| 42 | 627,29 | 216,31 | 1,4 |
| 43 | 637,58 | 219,85 | 1,433 |
| 44 | 648,01 | 223,45 | 1,467 |
| 45 | 658,10 | 226,93 | 1,5 |
| 46 | 668,51 | 230,52 | 1,533 |
| 47 | 678,57 | 233,99 | 1,567 |
| 48 | 688,54 | 237,43 | 1,6 |
| 49 | 698,31 | 240,80 | 1,633 |
| 49,08 | 387,62 | 133,66 | 1,639 |



ANNEXE 2 : Production scientifique

- Conférence : EMPC 10-13 Septembre 2017, Varsovie, Pologne

Titre : “Comparative FEM thermo-mechanical simulations for built-in reliability: surface mounted technology versus embedded technology for silicon dies”

Auteurs : BALMONT, Mickaël; BORD-MAJEK, Isabelle; OUSTEN, Yves

- Conférence : ESTC 21 Septembre 2018, Dresde, Allemagne

Titre : “Ultra-thin actives for embedded components: halfway between thin film technology and embedded Surface Mounted Device”

Auteurs : Mickaël BALMONT, Isabelle BORD MAJEK & Yves OUSTEN

- Conférence : ESREF 1-5 Octobre 2018, Aalborg, Danemark

Titre : “Highlighting two integration technologies based on vias: Through Silicon Vias and embedded components into PCB. Strengths and weaknesses for manufacturing and reliability.”

Auteurs : BALMONT, Mickaël; BORD-MAJEK, Isabelle; Poupard Benoît; Béchou Laurent; OUSTEN, Yves

- Journal : Microelectronics reliability, Volumes 88–90, Septembre 2018, Pages 1108-1112

Titre : “Highlighting two integration technologies based on vias: Through Silicon Vias and embedded components into PCB. Strengths and weaknesses for manufacturing and reliability.”

Auteurs : BALMONT, Mickaël; BORD-MAJEK, Isabelle; Poupard Benoît; Béchou Laurent; OUSTEN, Yves

Titre : Fiabilité des composants enfouis dans les circuits imprimés

Résumé :

Le désir de miniaturisation des circuits électroniques a mené l'électronique à développer de nouvelles méthodes d'assemblage. Les progrès réalisés passent par la complexification des fonctions, le développement de nouvelles interconnexions liant le circuit au composant ou par les choix d'architecture, une optimisation du volume. Après avoir repoussé les limites d'optimisation avec les assemblages en trois dimensions, la technologie s'est tournée vers un volume présent dans toutes les cartes électroniques mais qui ne joue aucun rôle actif dans celui-ci : le support des fonctions, le PCB. La solution apportée est l'enfouissement de composant dans ce volume. Les premiers bénéfices de cette solution apparaissent rapidement : gain de volume et protection des composants, c'est pourquoi elle se développe rapidement dans l'industrie.

Partant de ce postulat, Valeo souhaite adapter cette technologie pour réduire la taille d'une caméra de recul dédiée à l'automobile. Les exigences du domaine automobile étant plus strictes que dans d'autres industries, l'investigation plus poussée de la technologie d'enfouissement est nécessaire. L'objectif est de valider la fiabilité et la robustesse du circuit selon une méthode de fabrication. Ainsi, l'IMS de Bordeaux intègre le projet EDDEMA pour apporter une expertise, via des simulations thermomécaniques par éléments finis, sur la conception du circuit.

Dans le cadre de cette thèse et pour répondre aux attentes du projet, deux axes d'études sont suivis. Une méthodologie généraliste est proposée pour parvenir à définir les interconnexions jugées les plus fragiles dans le cadre de l'emploi de la technologie d'enfouissement et justifier l'utilisation des simulations par éléments finis selon les exigences attendues. L'objectif est de déterminer la durée de vie d'une interconnexion liant le composant au circuit en fonction de sa nature (brasure, via,...) et des caractéristiques du composant et du circuit (dimensions, hauteur,...) et valider les choix technologiques tels que les matériaux ou les techniques faits dès la fabrication. Cette étude s'inscrit dans une recherche locale autour du composant. La seconde étude se recentre sur le circuit développé dans le cadre du projet. Il sera étudié l'impact de la position des composants actifs enfouis dans le PCB sur le circuit (déformation, contraintes) et la représentation des composants passifs dans cette structure pour définir, selon les considérations thermomécaniques, les limites de positionnement dans la conception du circuit. Affiner le modèle passera par des mesures réalisées sur les premiers prototypes pour corroborer les simulations réalisées.

Tout ceci mène à déterminer les avantages sur la technologie d'enfouissement et le gain apporté en termes de fiabilité et de robustesse du circuit et des composants et valider son utilisation dans le secteur automobile.

Mots clés : PCB, composant enfoui, simulation par éléments finis

Title: Reliability of embedded components into Printed Circuit Boards

Abstract:

The desire for miniaturization of electronic circuits led the electronics to develop new methods of assembly. Progress is made through the complexification of functions, the development of new interconnections linking the circuit to the component or by the choice of architecture, an optimization of the volume. After pushing the limits of optimization with the three-dimensional assemblies, the technology turned to a volume present in all the electronic cards but which plays no active part in this one: the support of the functions, the PCB. The solution provided is to embed component in this volume. The first benefits of this solution appear quickly: volume gain and protection of components, which is why it is developing rapidly in the industry.

Based on this premise, Valeo wants to adapt this technology to reduce the size of a rearview camera dedicated to the automobile. As automotive requirements are stricter than in other industries, further investigation of embedded technology is required. The objective is to validate the reliability and robustness of the circuit according to a manufacturing method. Thus, the IMS Bordeaux integrates the EDDEMA project to provide expertise, via finite element thermomechanical simulations, on the design of the circuit.

As part of this thesis and to meet the expectations of the project, two studies are investigated. A general methodology is proposed to define the interconnections considered the most fragile in the context of the use of embedded technology and justify the use of finite element simulations according to the expected requirements. The objective is to determine the lifetime of an interconnection linking the component to the circuit according to its nature (solder, via, ...) and the characteristics of the component and the circuit (dimensions, height, ...) and validate the choices. such as materials or techniques made from the time of manufacture. This study is part of a local search around the component. The second study focuses on the circuit developed in the project. The impact of the position of the active components embedded in the PCB on the circuit (deformation, constraints) and the representation of the passive components in this structure will be studied to define, according to the thermomechanical considerations, the positioning limits in the circuit design. . To refine the model will pass by measurements realized on the first prototypes to corroborate the realized simulations.

All this leads to determining the advantages on the embedded technology and the gain in terms of reliability and robustness of the circuit and components and validating its use in the automotive sector.

Keywords : PCB, Embedded component, simulation

Unité de recherche

IMS (Intégration du Matériau au Système), CNRS UMR518, Bât. A31, 351 Cours de la Libération, 33400 Talence