



Contribution à l'étude, la mise en œuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température

François Le Henaff

► To cite this version:

François Le Henaff. Contribution à l'étude, la mise en œuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température. Electronique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2014. Français. NNT: . tel-00988784

HAL Id: tel-00988784

<https://theses.hal.science/tel-00988784>

Submitted on 14 May 2014

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 A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUE ET DE L'INGÉNIEUR

Par **François LE HENAFF**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **ELECTRONIQUE**

Contribution à l'étude, la mise en œuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température

Soutenue le : 29 Janvier 2014

Après l'avis de :

M. B. Allard Professeur, INSA Lyon
M. M. Ciappa Professeur, ETH Zurich

Devant la commission d'examen formée de :

M. Z. Khatir	Directeur de recherche, IFSTTAR	Président
M. B. Allard	Professeur, INSA Lyon	Rapporteur
M. S. Azzopardi	Maître de conférences, IMS	Co-directeur de thèse
M. S. Bontemps	Ingénieur, Microsemi	Examineur
M. M. Ciappa	Professeur, ETH Zurich	Rapporteur
M. X. Milhet	Maître de conférences, Institut Pprime	Examineur
M. E. Woïrgard	Professeur, IMS	Directeur de thèse

« L'imagination est plus importante que la connaissance. La connaissance est limitée, tandis que l'imagination englobe le monde entier, stimule le progrès, suscite l'évolution »

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe « Puissance » du groupe « Fiabilité » du laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) et financés par la Région Aquitaine dans le cadre d'une allocation de recherche doctorale.

Je remercie tout d'abord les directeurs successifs du laboratoire IMS, Messieurs Pascal FOUILLAT et Claude PELLET, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire durant le déroulement de mes travaux.

J'exprime mes remerciements à Monsieur Zoubir KHATIR pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier Messieurs Mauro CIAPPA et Bruno ALLARD pour avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse et pour leurs commentaires constructifs sur mes travaux.

Je tiens à remercier également Messieurs Serge BONTEMPS et Xavier MILHET pour avoir participé au jury de thèse en tant que membre invité et pour leurs conseils avisés sur mes travaux.

Je remercie également Messieurs Eric WOIRGARD et Stéphane AZZOPARDI pour m'avoir co-encadré au cours de ces trois années de thèse, pour leurs analyses scientifiques et le recul qu'ils m'ont apporté.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Isabelle FAVRE pour son aide et sa disponibilité durant ma première année de thèse qui m'ont permis de développer l'autonomie nécessaire pour mener à bien mes travaux.

Je remercie toute l'équipe « Puissance », Alexandrine, Jean-Michel, Olivier. Merci à Jean-Yves pour son aide et ses conseils sur les manip et sa disponibilité pour déboguer les serveurs de simu. Merci à Loic pour l'aide qu'il m'a apporté et en particulier ses conseils sur la rédaction des derniers paragraphes de ce manuscrit.

Je remercie également tous les membres permanents ou de passages du laboratoire que j'ai côtoyés avec plaisir au cours de ces trois dernières années : Amandine (quoi tu t'es encore brulé avec la presse ?), Florence, Nico, JB, Yassine, Hyacinthe, Riadh, Akram, Mickael (habille !), Medhi, Ronan, Toni, Simone, et tous ceux que j'aurais pu oublier.

Je tiens à remercier particulièrement Raph (membre de l'amical des fêrus de « sous-marins »), Nico (compagnon de karaoké) et Ed (l'éternel débutant à la belote) pour les quiz du lundi soir à The Rose et les bons restos.

Merci également à Denis, Rb (le ricain), Paul, Jean-Loup (belette) Alwena et Judi les Bordelais pour les bons moments passés ensemble. Merci à Sophie (Leri), Vincent (Theon Greyjoy pour les intimes), Elsa (Binôme !), Seb, Carole (ex-coloc), Pauline, Sam et tous les anciens Ensiliens pour les bons week-ends passés ensemble sur Paris ou ailleurs.

Pour finir, je souhaiterais remercier ma famille, mes parents Françoise et Roger et ma sœur Marianne pour leurs encouragements, leurs soutiens et leurs patiences au cours de ces trois années de thèse.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	5
TABLE DES SYMBOLES	11
INTRODUCTION GENERALE	13
CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART DES MODULES DE PUISSANCE, DES TECHNOLOGIES DE REPORT DE PUCE ET DES MECANISMES DE DEFAILLANCES.....	17
SOMMAIRE.....	18
1.1. INTRODUCTION.....	19
1.2. LE MODULE DE PUISSANCE	20
1.2.1. GENERALITES	20
1.2.2. LES PUCES SEMI-CONDUCTRICES	20
1.2.3. LES SUBSTRATS	21
1.2.4. LES SEMELLES	23
1.2.5. LES BRASURES.....	24
1.2.6. LE SYSTEME DE REFROIDISSEMENT	25
1.2.7. LES CONNEXIONS ELECTRIQUES	25
1.2.8. BOITIERS	27
1.2.9. ENCAPSULATION	27
1.3. LES TECHNOLOGIES D'ASSEMBLAGE.....	27
1.3.1. INTRODUCTION.....	27
1.3.2. LES BRASURES.....	29
1.3.3. TECHNOLOGIES ALTERNATIVES D'ASSEMBLAGE	31
1.3.4. CONCLUSION SUR LES TECHNOLOGIES D'ASSEMBLAGE	37
1.4. FRITTAGE DE PATE D'ARGENT.....	39
1.4.1. LE FRITTAGE	39
1.4.2. LE FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	46
1.4.3 CONCLUSION SUR LE FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	53
1.5. FIABILITE DES MODULES DE PUISSANCE	53
1.5.1. INTRODUCTION.....	53
1.5.3. DEFAILLANCES DANS LES MODULES DE PUISSANCE.....	55
1.5.4. DEFAILLANCES RESULTANTES DES CONDITIONS OPERATOIRES	58
1.5.5. DEFAILLANCES RESULTANT D'UN ENVIRONNEMENT HOSTILE	59
1.5.6. CONCLUSION SUR LA FIABILITE DES MODULES DE PUISSANCE	60
1.6. CONCLUSION.....	61
CHAPITRE 2. EXPERIMENTATIONS SUR LE FRITTAGE DE PATE D'ARGENT, PROCEDES D'ASSEMBLAGE ET CAMPAGNES D'ESSAI EN VIEILLISSEMENTS ACCELERES.....	63
2.1. INTRODUCTION.....	65
2.2. PROCEDES D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	66
2.2.1. INTRODUCTION.....	66
2.2.2. PROCEDE D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT MICROMETRIQUE.....	68
2.2.3. PROCEDE D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT NANOMETRIQUE	72
2.2.4. CONCLUSION SUR LES PROCEDES D'ASSEMBLAGES PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	74

2.3. ETUDE DE L'INFLUENCE DU FRITTAGE DE PATE D'ARGENT SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE EN VIEILLISSEMENT PASSIF ACCELERE	75
2.3.1. INTRODUCTION	75
2.3.2. INFLUENCE DE LA METALLISATION DU SUBSTRAT SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE	76
2.3.2.1. Introduction	76
2.3.2.2. Véhicules de tests	77
2.3.2.3. Influence de la métallisation sur la tenue en cisaillement avant vieillissement passif	78
2.3.2.4. Evolution de la résistance thermique des assemblages frittés au cours de vieillissement	80
2.3.2.6. Conclusion sur l'influence de la métallisation du substrat sur la tenue thermomécanique	91
2.3.3. INFLUENCE DE LA SURFACE DE LA PUCE ET DE LA TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE	91
2.3.3.1. Introduction	91
2.3.3.2. Véhicules de tests	92
2.3.3.3. Evolution de la résistance thermique des assemblages brasés et frittés au cours du vieillissement	94
2.3.3.4. Analyses optiques de la structure des assemblages	96
2.3.3.5. Conclusion sur l'influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la tenue thermomécanique	103
2.4. CONCLUSION.....	103
CHAPITRE 3. ETUDE DU COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES ASSEMBLAGES DE PUISSANCE - MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS	105
SOMMAIRE.....	106
3.1. INTRODUCTION.....	107
3.2. EVALUATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES APRES FRITTAGE ET DE LA DISSIPATION THERMIQUE DANS UN ASSEMBLAGE FRITTE.....	109
3.2.1. INTRODUCTION	109
3.2.2. MODELE UTILISE	110
3.2.3. PARAMETRES DE CALCUL	112
3.2.4. RESULTATS	113
3.2.5. CONCLUSION SUR LA MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DU PROCEDE DE FRITTAGE ET DE LA DISSIPATION THERMIQUE.....	116
3.3. EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UN ASSEMBLAGE FRITTE	116
3.3.1. INTRODUCTION	116
3.3.2. MODELE UTILISE	119
3.3.3. MODELISATION DU VIEILLISSEMENT ACCELERE	119
3.3.4. MODELISATION DU PROFIL DE MISSION	122
3.3.5. CONCLUSION SUR L'EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UN ASSEMBLAGE FRITTE	124
3.4. EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA POROSITE DE LA COUCHE D'ARGENT.....	125
3.4.1. INTRODUCTION	125
3.4.2. MODELE UTILISE	126
3.4.3. PARAMETRES DE CALCUL	127
3.4.4. RESULTATS	127
3.4.5. CONCLUSION SUR L'INFLUENCE DE LA POROSITE DE LA COUCHE D'ARGENT	131
3.5. EVALUATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN ASSEMBLAGE DOUBLE FACE PAR RAPPORT A UN ASSEMBLAGE SIMPLE.....	132
3.5.1. INTRODUCTION	132
3.5.2. MODELE UTILISE	133

3.5.3. PARAMETRES DE CALCUL	134
3.5.4. RESULTATS	134
3.5.5. CONCLUSION SUR L'INFLUENCE D'UN ASSEMBLAGE DOUBLE FACE PAR RAPPORT A UN ASSEMBLAGE SIMPLE SUR LE PROCEDE DE FRITTAGE ET SUR LA RESISTANCE THERMIQUE DE L'ASSEMBLAGE	137
3.6. CONCLUSION.....	137
CHAPITRE 4. : REALISATION D'ASSEMBLAGES SPECIFIQUES	139
4.1. INTRODUCTION.....	141
4.2. ASSEMBLAGE SUR SEMELLE ET SUBSTRAT SMI.....	142
4.2.1. INTRODUCTION.....	142
4.2.2. MISE AU POINT DE PROCEDES D'ASSEMBLAGE	142
4.2.3. CARACTERISATIONS THERMIQUES DE L'ASSEMBLAGE.....	144
4.2.4. ANALYSES OPTIQUES DE LA COUCHE D'ARGENT - INTERFACE SEMELLE/SUBSTRAT.....	145
4.2.5. CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'ASSEMBLAGE SUR SEMELLE ET SUBSTRAT SMI	146
4.3. ASSEMBLAGE DE PUISSANCE DOUBLE FACE	147
4.3.1. INTRODUCTION.....	147
4.3.2. MISE AU POINT DU PROCEDE D'ASSEMBLAGE DOUBLE FACE	147
4.3.3. CARACTERISATION DES ASSEMBLAGES DOUBLE FACE.....	148
4.3.4. CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE DOUBLE FACE	152
4.4. PROTOTYPE : PONT DE DIODES DOUBLE FACE	153
4.4.1. INTRODUCTION.....	153
4.4.2. PROCEDE D'ASSEMBLAGE	154
4.4.3. CARACTERISATIONS THERMIQUE ET ELECTRIQUE	155
4.4.3. CONCLUSION SUR LA REALISATION D'UN PONT DE DIODES DOUBLE FACE	157
4.5. CONCLUSION.....	158
CONCLUSION GENERALE	161
BIBLIOGRAPHIE.....	165
RESUME	175
ABSTRACT.....	176

Table des symboles

ACA : Anisotropic conductive adhesives

Al₂O₃ : Alumine

AlN : Nitrure d'aluminium

AMB : Active Metal Brazing

CPES : Center for Power Electronics System

CTE : Coefficient de dilatation thermique (Coefficient of Thermal Expansion ppm/°C)

DAB : Direct Aluminium Bonded

DBC : Direct Bonding Copper

ECA : Electrically conductive adhesives

FIDEA : Fiabilité et Diagnostic des Composants Electroniques de Puissance pour application Automobiles

GaN : Nitrure de gallium

ICA : Isotropic conductive adhesives

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

JFET : Junction Field Effect Transistor

LTJT : Low temperature joining technique (technique d'assemblage à basse température)

LTPST : Low temperature and pressureless sintering technology

LTS : Low temperature sintering

mAgic : Microbond silver interconnect

MOSFET : Transistor à effet de champ à grille métal-oxyde (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

PEEK : Polyétheréthercétone

RoHS : Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

Rth : Résistance thermique

SiC : Carbure de silicium

Si₃N₄ : Nitrure d'aluminium

SMI : Substrat Métallique Isolé

TLPB : Brasure en phase liquide transitoire (Transient Liquide Phase Bonding)

VT : Véhicules de tests

Introduction générale

Les assemblages de puissance sont de plus en plus présents dans les systèmes électroniques embarqués de nombreux domaines : le ferroviaire, l'aéronautique et l'automobile. En effet, la demande en véhicules hybrides ou tout électrique est en forte croissance depuis la mise en place du protocole de Kyoto (1). La réduction des émissions de gaz à effets de serre est au cœur de la problématique actuelle et de nombreux axes de recherches vont dans ce sens. De nouvelles problématiques sont dévoilées et nécessitent de nouvelles solutions techniques : la miniaturisation des assemblages de puissance et la suppression du plomb, substance trop dangereuse.

La présence croissante de l'électronique dans les systèmes embarqués soulève inévitablement la problématique de l'espace occupé par les systèmes électroniques. La miniaturisation des assemblages de puissance est donc un passage obligé afin de répondre à cette contrainte d'espace. Les modules de puissance sont donc de plus en plus complexes et les contraintes électro-thermo-mécaniques de plus en plus fortes en fonctionnement. L'occurrence de défaillance est ainsi augmentée et conduit généralement à la destruction du module de puissance du fait des procédés d'assemblages et des méthodes de maintenance. L'analyse de la fiabilité des systèmes embarqués est donc complexe et nécessite des études spécifiques pour chaque type d'assemblages de puissance. Dans l'optique de réduire le temps et le coût d'étude de la fiabilité, l'utilisation d'outils de simulations numériques (comportementale, physique ou par éléments finis) est très répandue (Ansys, Sientaurus, Abaqus, Comsol, etc.). La discrétisation du modèle en éléments finis, bien que plus longue que les autres types de simulations, permet d'obtenir des modèles réalistes décrivant les phénomènes physiques mis en jeu pour l'analyse de la fiabilité des modules de puissance.

La seconde problématique est la présence du plomb dans les brasures qui assurent le lien entre les différents éléments des modules de puissance. La directive européenne RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances) de 2002 a pour objectif de limiter l'utilisation de six substances chimiques jugées dangereuses pour l'homme et l'environnement dans les systèmes électriques et électroniques (plomb, mercure, cadmium, chrome hexavalent, les polybromobiphényles et les polybromodiphényléthers). De nombreux axes de recherches se sont donc orientés vers le développement de nouvelles technologies

d'assemblage de modules de puissance. Du remplacement des alliages à base de plomb par de nouveaux alliages de brasure aux développements de technologies alternatives, les solutions sont nombreuses.

Les travaux sur la technologie de frittage de pâte d'argent, réalisés au cours de cette thèse s'inscrivent dans cette démarche du remplacement du plomb et dans l'étude de la fiabilité des assemblages de puissance. Les objectifs sont d'étudier, de mettre au point et d'optimiser le procédé de frittage de pâte d'argent pour les assemblages de puissance. En s'appuyant sur des essais expérimentaux et des modélisations par éléments finis, nous allons étudier le procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent et sa fiabilité avec comme objectif final la réalisation d'un démonstrateur fonctionnel à architecture innovante.

Ces travaux de thèse ont été rattachés au projet ANR-VTT FIDEA (Fiabilité et diagnostic des composants électroniques de puissance pour les applications automobiles) en collaboration avec des partenaires académiques (IFSTTAR, LAAS-CNRS, IES, PPRIME, SATIE et CEMES) et des partenaires industriels (FREESCALE, ACTIA et PSA), ainsi qu'au projet ASPEEC (Alternative solutions to solder alloys used in high temperature power assemblies for embedded energy conversion with high pressure and low temperature silver paste interconnections) financé par la région Aquitaine et en collaboration avec l'entreprise MICROSEMI.

Un état de l'art scindé en quatre parties, développera dans un premier temps les différentes composantes d'un module de puissance et dans un second temps les alternatives aux alliages de brasure à base de plomb. Les avantages et inconvénients de chaque technique seront développés et le choix du frittage de pâte d'argent comme technique d'assemblage sera expliqué. La partie suivante développera une approche théorique du frittage ainsi que l'état de l'art des différents travaux déjà publiés sur le frittage de pâte d'argent. Nous concluons par une étude des éléments et phénomènes influençant la fiabilité des modules de puissances.

Les essais expérimentaux sur la mise au point de procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent micrométrique et nanométrique seront présentés dans le second chapitre. Nous évaluerons la fiabilité des véhicules de tests ainsi réalisés par le biais de vieillissements accélérés. Des analyses mécaniques (tenue en cisaillement), thermiques (résistance thermique) et optiques (observations de la microstructure) nous permettront de caractériser

les performances des assemblages réalisés par frittage de pâte d'argent et de les comparer à des assemblages brasés.

Le chapitre trois est centré sur les modélisations par éléments finis qui vont nous permettre d'étudier le comportement thermomécanique des assemblages de puissance frittés. Une première étude sur l'évaluation des contraintes résiduelles dans l'assemblage, nous permettra de comparer le procédé de frittage et celui de brasage. Nous développerons, par la suite, une méthodologie d'évaluation de la durée de vie des assemblages qui se base sur l'étude de la densité d'énergie de déformation accumulée dans la couche d'argent au cours de vieillissements accélérés. Ensuite nous étudierons l'influence de la porosité de la couche d'argent sur le comportement thermique et mécanique de l'assemblage et pour finir nous effectuerons une comparaison mécanique et thermique entre un assemblage à architecture 2D et 3D.

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude de la réalisation d'assemblages spécifiques par frittage de pâte d'argent. D'assemblages à architecture 2D (semelle/substrat/puce et substrat SMI/puce) jusqu'à la réalisation d'assemblage à architecture 3D, ces travaux nous permettront de réaliser un prototype fonctionnel de pont de diodes à architecture 3D par frittage de pâte d'argent.

Chapitre 1. Etat de l'art des modules de puissance, des technologies de report de puce et des mécanismes de défaillances

SOMMAIRE

1.1. INTRODUCTION.....	19
1.2. LE MODULE DE PUISSANCE	20
1.2.1. GENERALITES.....	20
1.2.2. LES PUCES SEMI-CONDUCTRICES	20
1.2.3. LES SUBSTRATS	21
1.2.4. LES SEMELLES	23
1.2.5. LES BRASURES.....	24
1.2.6. LE SYSTEME DE REFROIDISSEMENT	25
1.2.7. LES CONNEXIONS ELECTRIQUES	25
1.2.8. BOITIERS	27
1.2.9. ENCAPSULATION	27
1.3. LES TECHNOLOGIES D'ASSEMBLAGE.....	27
1.3.1. INTRODUCTION.....	27
1.3.2. LES BRASURES.....	29
1.3.3. TECHNOLOGIES ALTERNATIVES D'ASSEMBLAGE	31
1.3.4. CONCLUSION SUR LES TECHNOLOGIES D'ASSEMBLAGE	37
1.4. FRITTAGE DE PATE D'ARGENT.....	39
1.4.1. LE FRITTAGE	39
1.4.2. LE FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	46
1.4.3 CONCLUSION SUR LE FRITTAGE DE PATE D'ARGENT	53
1.5. FIABILITE DES MODULES DE PUISSANCE	53
1.5.1. INTRODUCTION.....	53
1.5.3. DEFAILLANCES DANS LES MODULES DE PUISSANCE.....	55
1.5.4. DEFAILLANCES RESULTANTES DES CONDITIONS OPERATOIRES	58
1.5.5. DEFAILLANCES RESULTANT D'UN ENVIRONNEMENT HOSTILE	59
1.5.6. CONCLUSION SUR LA FIABILITE DES MODULES DE PUISSANCE	60
1.6. CONCLUSION.....	61

1.1. Introduction

L'électronique de puissance est l'une des branches de l'électrotechnique, elle permet la conversion de l'énergie électrique par le biais d'un grand nombre de dispositifs. Actuellement, environ 15% de l'énergie électrique est convertie sous une autre forme grâce aux assemblages de puissance. Elle a connu d'importants développements avec l'augmentation de l'utilisation de l'électricité dans l'automobile, l'avionique et le militaire. En effet, les aspects économiques et écologiques en font un atout majeur pour équiper les secteurs utilisant le pétrole comme principale matière première énergétique compte-tenu de l'augmentation continue du prix des matières premières issues du pétrole et de sa raréfaction programmée. De plus, la volonté des différents Etats de réduire les émissions de gaz à effet de serre depuis la signature du protocole de Kyoto (2005) (1) va dans le sens d'une augmentation de la présence de l'électronique dans les systèmes embarqués jusqu'au véhicule tout électrique (1) (2).

Les assemblages de puissance actuels sont réalisés pour une grande majorité avec des joints brasés en SnPb. La première problématique est liée à la réglementation RoHS qui vise à interdire le plomb dans tous les secteurs. La seconde est liée à la haute température. En effet, les environnements d'utilisation des modules de puissance sont de plus en plus sévères en termes de température ambiante et l'auto-échauffement des composants actifs augmente avec l'application de puissance plus élevée. Les différents matériaux et technologies actuels ne permettant pas de répondre à ces problématiques, des innovations sont nécessaires surtout en ce qui concerne les matériaux qui assurent la tenue ensemble des différents composants d'un module de puissance. C'est pourquoi de nouvelles techniques d'assemblages de puissance sont nécessaires dans le but de respecter la réglementation et de répondre à ces problématiques de fiabilité liées à la haute température.

Nous verrons au cours de ce chapitre, une description des constituants d'un module de puissance puis les différentes technologies de report actuelles. Nous étudierons également les technologies alternatives expérimentées dans le but d'obtenir des modules de puissance en accord avec la réglementation et permettant d'accroître la robustesse en environnement sévère. Une solution alternative utilisant la technologie de frittage de pâte d'argent est présentée en détail par la suite, suivie d'une dernière partie explicitant les différents types de défaillances rencontrées par les modules de puissance.

1.2. Le module de puissance

1.2.1. Généralités

Un circuit électronique est un ensemble de composants électroniques interconnectés à l'aide d'un circuit imprimé et dont le but est de remplir une fonction (3). Un circuit de puissance ou module de puissance est un circuit électronique constitué de connexions électriques, de matériaux isolants et de puces semi-conductrices brasées, par exemple, sur un substrat en céramique isolé (4). Les modules de puissance sont fixés sur un système de refroidissement appelé semelle (heat sink) qui permet l'évacuation de la chaleur générée par les composants lors du cycle de fonctionnement. L'ensemble est ensuite recouvert par une protection (boîtier + gel) qui correspond à un module de puissance. Les applications les plus courantes actuellement sont l'avionique, l'automobile ou encore la distribution d'énergie. Les modules de puissance sont généralement sous la forme présentée en figure 1.1.

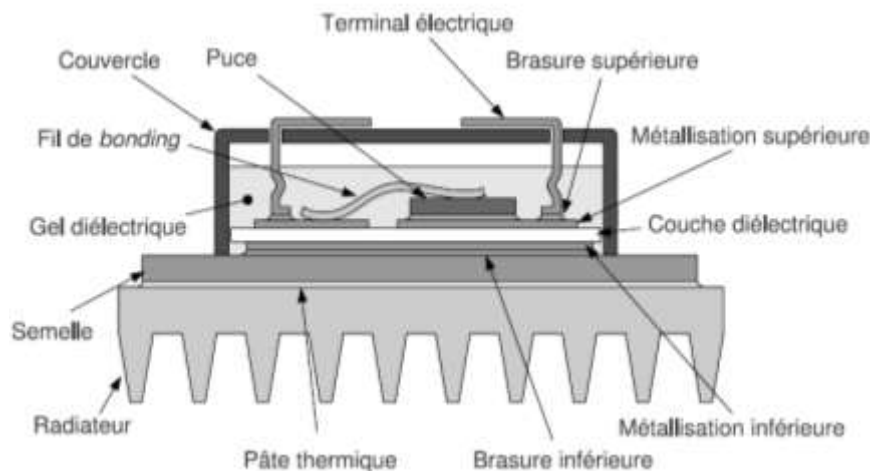


Figure 1.1 : Représentation schématique d'un module de puissance (2)

1.2.2. Les puces semi-conductrices

Les puces semi-conductrices sont des composants électroniques actifs d'un assemblage de puissance, elle réalise le rôle d'interrupteur statique (5). Il en existe différents types : la diode, le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT), le transistor à effet de champ à grille métal-oxyde (MOSFET) et le transistor à effet de champ (JFET) (6) (7). Les puces semi-conductrices sont réalisées en grande majorité en Silicium (Si (8) (figure 1.2)) mais d'autres matériaux sont utilisés comme le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de Gallium (GaN) (9)

(10) (11). Elles sont d'une épaisseur d'environ 100 à 500 μm et sont métallisées sur leurs deux faces afin d'assurer le passage du courant et de favoriser le brasage avec le substrat et l'interconnexion électrique (fil de câblage) (12). Les propriétés recherchées pour une puce sont les suivantes : rigidité diélectrique, stabilité électrique thermique et mécanique, faible perte en commutation et bonne conductivité thermique.



Figure 1.2 : Puces de type IGBT (gauche) et de type diode (droite)

1.2.3. Les substrats

Les substrats correspondent au support du circuit de puissance réalisé en céramique ou en diélectrique organique (13) (14) (15). Sa surface comporte les pistes conductrices et la partie passive (les éléments diélectriques et résistifs). Les puces semi-conductrices y sont reportées à l'aide de différentes techniques détaillées par la suite (cf. 1.3). Une conductivité thermique élevée est nécessaire afin de faciliter les échanges thermiques avec les différents éléments de l'assemblage, mais tout en limitant le gradient de température avec le système de refroidissement dans le but d'éviter de trop grandes disparités de contraintes thermomécaniques. Les puces semi-conductrices et les semelles ont des coefficients de dilatation thermique (CTE) différents, le substrat joue le rôle de couche de transition dans le but de limiter le gradient de température dans l'assemblage. Pour finir, le substrat doit assurer l'isolation électrique entre les composants semi-conducteurs et la semelle. Les substrats existent sous différentes formes, les trois principales sont présentées ici (16).

1.2.3.1. Substrat métallique isolé (SMI) (17)

Un support métallique (figure 1.3) assurant le rôle de semelle (0,5 - 3 mm) est recouvert d'une couche diélectrique (50 - 100 μm) puis d'une couche de cuivre (35 - 240 μm) (18) (19). Ce type de substrat est difficilement utilisable en environnement avec de grandes contraintes thermiques. En effet, la couche diélectrique, réalisée en époxy, perd ses propriétés à partir de

160°C (20). De plus, cette couche possède une conductivité thermique très faible qui pénalise l'évacuation des calories générées par le fonctionnement du module (18). Le principal intérêt de ce type de substrat est la présence d'une couche d'aluminium épaisse qui joue le rôle de semelle.

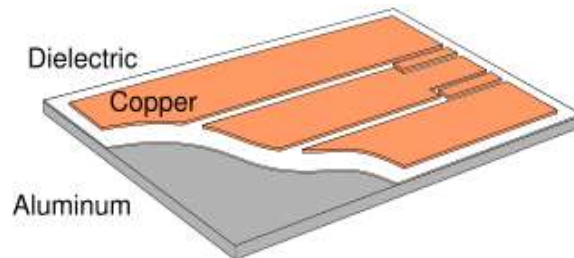


Figure 1.3 : Substrat métallique isolé (16)

1.2.3.2. Substrat céramique métallisé (DBC)

Une céramique (Nitrure d'aluminium AlN ou oxyde d'aluminium Al_2O_3 de 300 à 700 μm d'épaisseur) est métallisée sur une ou deux faces par un métal (cuivre de 150 à 300 μm d'épaisseur) (21). Ce type de substrat (Figure 1.4) est appelé Direct Bonding Copper (DBC) et possède de très bonnes propriétés mécaniques d'où une importante utilisation industrielle (18). La principale contrainte observée est l'apparition de délaminage due à une grande différence de CTE entre la métallisation du DBC (cuivre) et l'alumine. La croissance de fissure dans la céramique due aux contraintes engendrées par le durcissement de la métallisation est l'un des problèmes majeurs dans les DBC (22) (23). Pour ces différentes raisons, des alternatives ont été élaborées comme l'utilisation de l'Aluminium en remplacement du cuivre appelé DAB (Direct Aluminium Bonding) (24) (23) (25) ou encore les substrats céramiques brasées Si_3N_4 présentés ci-après (tableau 1.1)

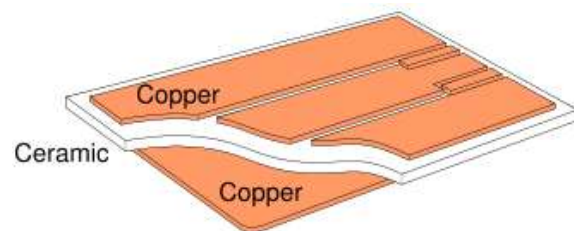


Figure 1.4 : Substrat céramique métallisé DBC (16)

Tableau 1.1 : Comparatif des propriétés physiques des céramiques utilisées dans un DBC (26)

Matériaux	CTE (ppm/°C)	Conductivité Thermique (W/m.°C)	Résistivité Electrique (Ohm.m)	Module d'Young (GPa)
Al ₂ O ₃	7,2	25	10 ¹⁴	397
AlN	4,1	200	10 ¹⁴	320
Si ₃ N ₄	2,8-3,6	16-33	10 ¹³ -10 ¹⁴	300

1.2.3.3. Substrat céramique brasé Si₃N₄

Une couche de cuivre de forte épaisseur (200 - 500 µm) est brasée sur une céramique en Si₃N₄ à l'aide d'une brasure en TiAgCu (figure 1.5) (27) (28). Ce type de substrat est une solution de remplacement des substrats céramiques métallisés DBC. En effet la résistance aux contraintes thermomécaniques, plus élevée pour ce type de substrat, permet de limiter le phénomène d'apparition de fissures (29).

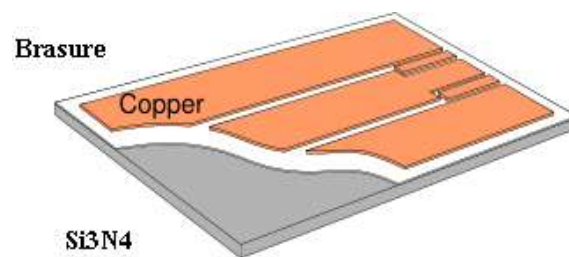


Figure 1.5: Substrat céramique brasé Si₃N₄ (16)

1.2.4. Les semelles

La semelle est l'élément du module de puissance qui joue le rôle de liaison entre le module (substrat et puces) et le refroidisseur. Elle permet d'assurer un bon échange thermique dans le but d'évacuer les calories venant de l'auto-échauffement de la puce (18) (30). De bonnes propriétés thermiques et mécaniques sont donc nécessaires afin d'obtenir une bonne liaison. Une conductivité thermique élevée est nécessaire, c'est pourquoi les semelles sont composées de métaux (Cu, AlSiC, CuW et CuMo). Les semelles en cuivre sont privilégiées pour leur faible coût. Elles sont souvent recouvertes d'une couche de nickel dans le but d'obtenir une transition plus adaptée entre les CTE (tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Propriétés physiques des matériaux utilisés en tant que semelle [6]

Matériau	CTE (ppm/°C)	Conductivité thermique (W/m.°C)	Module d'Young (GPa)
Cu	17	398	330
AlSiC	7,5 - 12	180	450
CuW	6,5 - 8,3	180 - 200	-
CuMo	7-8	160 - 170	-

1.2.5. Les brasures

Les brasures servent à assembler entre eux les différents éléments (puces semi-conductrices, substrats et semelles) présentés ci-dessus (31). Des conductivités électriques et thermiques élevées ainsi qu'une tenue mécanique élevée sont nécessaires afin d'assurer le bon fonctionnement du module de puissance. L'alliage de brasure se présente sous forme de pâte, de crème ou de préforme contenant l'alliage et différents additifs. Ces derniers permettent de faciliter le mouillage avec les interfaces des éléments du module de puissance et de prévenir la formation d'oxyde. Le procédé permettant l'assemblage des différents composants du module à l'aide de brasure se déroule en trois étapes. Dans un premier temps, la pâte à braser est sérigraphiée sur les composants. L'étape suivante est la refusion de l'ensemble suivant un profil température/temps adapté (brasage). Pour finir, l'assemblage est refroidi jusqu'à la température ambiante.

Les alliages à base d'étain et de plomb font référence parmi les nombreux alliages de brasures existants : pour les applications basse température, l'alliage Sn63Pb37 et pour les applications haute température, l'alliage Pb95Sn5. Le classement se fait par rapport à la température de fusion de l'alliage qui est de 183°C pour le premier et de 312°C pour le second (32). La teneur en plomb de l'alliage permet de faire varier la température de fusion et ainsi d'obtenir une variété d'alliages de brasure (tableau 1.3). La directive européenne RoHS visant l'interdiction de différents composés chimiques dangereux a changé la donne et des solutions alternatives aux alliages à base de plomb (33) sont nécessaires et sont discutées dans la seconde partie de ce chapitre.

Tableau 1.3 : Température de fusion pour différents alliages selon leur teneur en plomb (32)

Matériau	Température de fusion (°C)
Sn63-Pb37	183
Pb88-Sn10-Ag2	290
Sb90-Sn10	301
Sb90-In5-Ag5	310
Sb95-Sn5	312

1.2.6. Le système de refroidissement

Le système de refroidissement, vissé sur la semelle, permet de conserver le module de puissance en dessous de sa température de jonction critique en assurant une température basse au niveau de la semelle (22) (34). Les radiateurs et les systèmes à eau sont deux exemples qui permettent d'assurer cette fonction. Les composants et l'environnement vont influencer la quantité de chaleur à évacuer par le module de puissance.

1.2.7. Les connexions électriques

1.2.7.1. Les connexions internes

La technologie la plus utilisée pour réaliser les connexions électriques internes sont les fils de câblage. Ils servent à relier électriquement les puces au substrat ou les puces entre elles et également les puces aux connecteurs externes. L'or, l'argent, l'aluminium ou le cuivre sont parmi les matériaux employés pour leur conductivité électrique élevée (35). L'aluminium est le métal le plus couramment usité pour réaliser des fils de câblage de diamètre variant de 125 à 500 μm selon la densité de courant qui traverse la puce semi-conductrice en fonctionnement. Il existe deux techniques de câblage permettant de réaliser les connexions pour les fils de câblage : le wedge bonding et le ball bonding (36). La première technique se fait à température ambiante et les attaches sont réalisées par l'action d'une pression et d'ultrasons. La seconde technique est réalisée à chaud afin de former une boule qui ensuite par thermocompression ou par soudure thermosonique permet de former l'attache avec la puce et le substrat. Une technologie alternative est basée sur l'utilisation de ruban pour remplacer les fils de câblage (figure 1.6) (24) (37). Elle permet de diminuer les inductances parasites, d'améliorer la productivité du procédé, de réduire les coûts et d'accroître la robustesse du module de puissance.

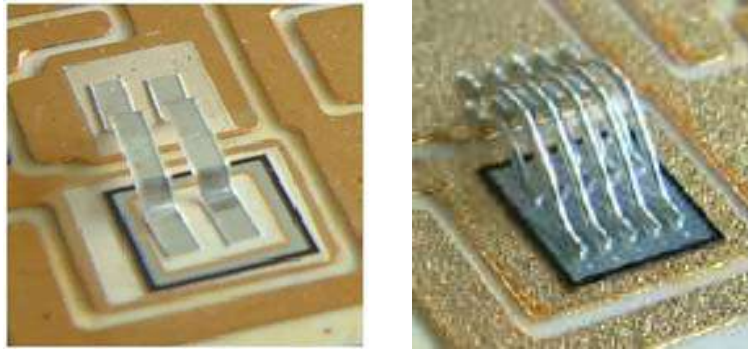


Figure 1.6 : Photos de fils bonding (à droite) et de ruban (à gauche)

1.2.7.2. Les connexions externes

Les connexions externes permettent la transmission des signaux de puissance et de commande par le biais de connecteurs externes brasés sur la métallisation du substrat (figure 1.7). Les brasures étant l'une des parties les plus défaillantes dans les modules de puissance, les connecteurs peuvent être intégrés directement à la métallisation du substrat. Une dernière solution existe, les connecteurs sont intégrés au boîtier et la liaison entre les connecteurs et le module de puissance se fait par les fils de câblage.

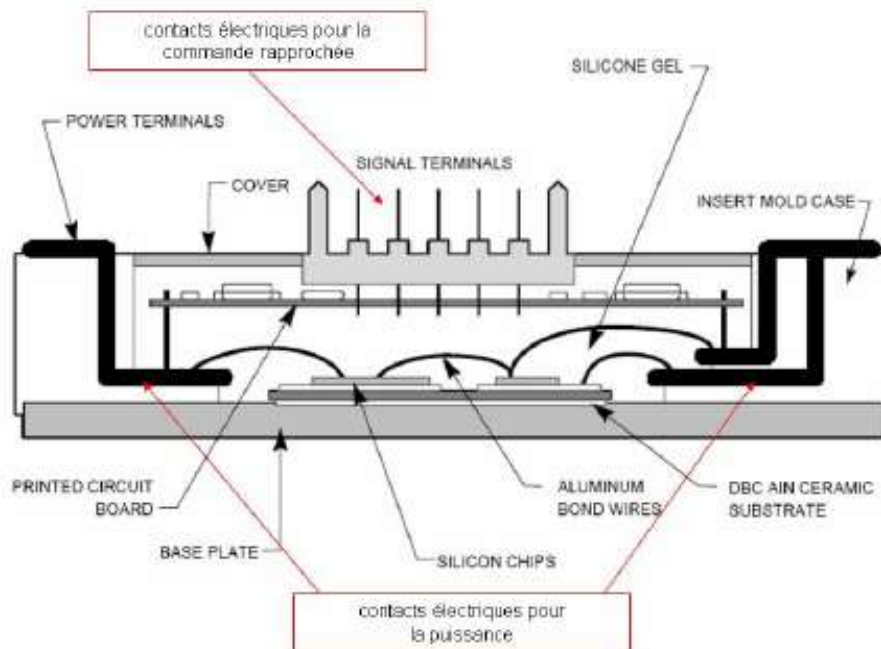


Figure 1.7 : Module de puissance présentant les différentes connexions internes (38)

1.2.8. Boîtiers

Après avoir effectué les étapes précédentes, le module de puissance est inséré dans un boîtier (39). Celui-ci permet la protection contre les agents environnementaux et un soutien mécanique pour le module de puissance. Il est généralement réalisé dans un matériau polymère tel que le téflon ou le PEEK, et en métal pour les applications haute température.

1.2.9. Encapsulation

L'encapsulation permet d'assurer la fermeture du boîtier et de protéger les composants du module de puissance. Un gel polymère est déposé sur les composants et l'assemblage afin de les protéger d'attaque d'agents extérieurs nocifs (air, produits chimiques, gaz) impactant la durée de vie du module. De plus, le gel joue le rôle d'isolant électrique et permet d'améliorer la tenue aux décharges partielles dues aux défauts présents dans la métallisation du substrat. Différents polymères sont utilisés dans le but d'obtenir un gel présentant les propriétés suivantes : grande pureté, faible perméabilité aux gaz, aux agents chimiques et à l'humidité, bonne tenue thermique entre -50°C et +200°C, bonne isolation électrique et grande facilité de mise en œuvre. Parmi ces polymères on peut citer le silicone (très utilisé), le parylène, le polyuréthane ou encore l'époxy (18) (40).

1.3. Les technologies d'assemblage

1.3.1. Introduction

La directive européenne RoHS entrée en vigueur en 2006 a pour but l'interdiction de l'utilisation du plomb dans les équipements électriques et électroniques ainsi que 5 autres composés chimiques (le mercure, le cadmium, le chrome hexavalent, les polybromobiphényles et les polybromodiphényléthers). Le développement dans ces secteurs d'activité s'est donc concentré sur l'élimination du plomb afin de répondre aux exigences de la directive. La présence du plomb dans les équipements électriques et électroniques se situe au niveau de l'alliage de brasure (cf. 1.2.5). Depuis l'entrée en vigueur de la directive RoHS, de nouveaux alliages de brasures ainsi que de nouvelles techniques d'assemblage ont vu le jour. Ces nouvelles technologies d'assemblage et brasures doivent respecter un cahier des charges correspondant à celui de l'alliage SnPb37 (application basse température) ou à celui de l'alliage PbSn5 (application haute température) :

- Température de fusion proche de celle de l'alliage de référence (183°C pour Sn-37Pb et 312°C pour Pb-5Sn)
- Propriétés physiques proches de ces deux alliages : résistance à la fatigue thermomécanique, tenue en fluage, bonne mouillabilité, aptitude à la stabilité de la croissance des composés intermétalliques limitée, conductivités thermique et électrique égales ou supérieures et bonne résistance à la corrosion
- Coût
- Disponibilité des matériaux
- Procédé simple et rapide

Différentes solutions sont envisageables (figure 1.8). Les principales sont recensées dans cette étude. La première partie s'intéresse aux nouveaux alliages de brasures. Par la suite, quatre nouvelles technologies sont étudiées : les adhésifs conducteurs, les assemblages auto-agrippants, la soudure par phase liquide transitoire et le frittage de pâte d'argent nanométrique et micrométrique.

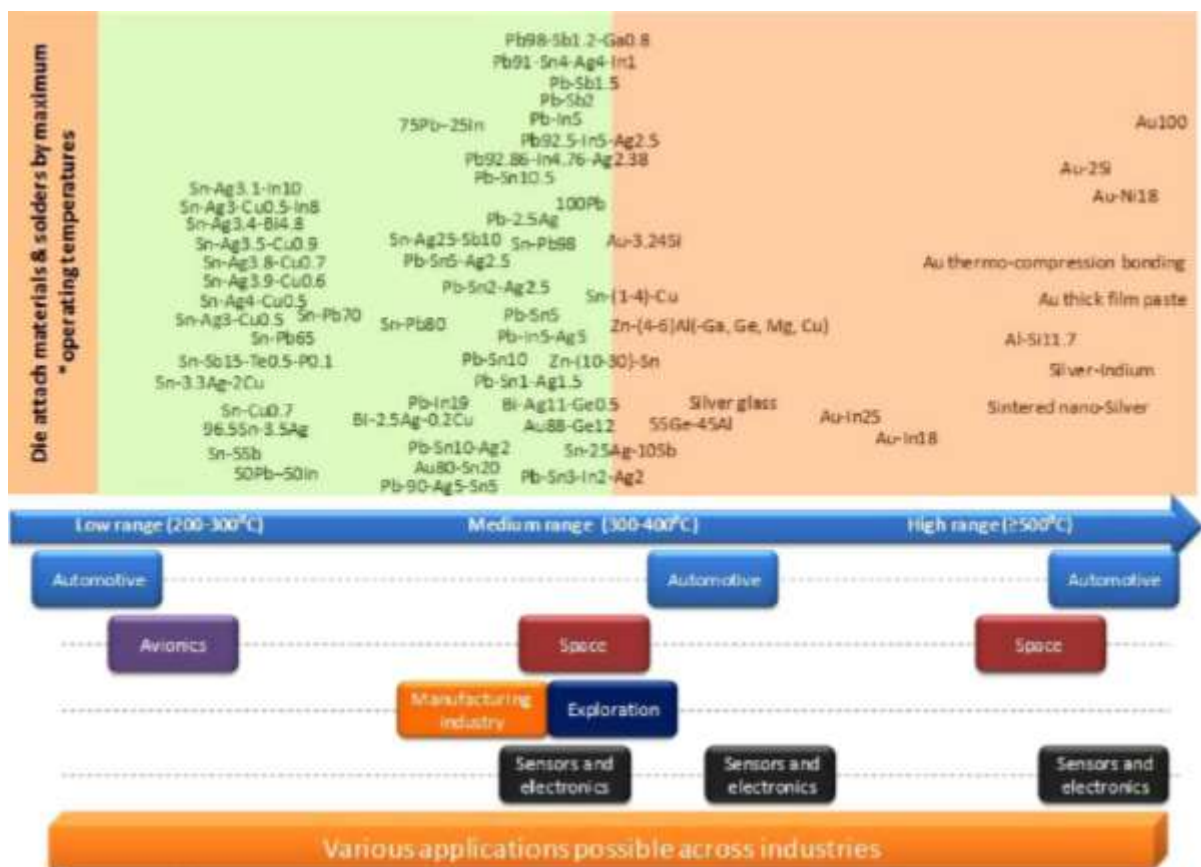


Figure 1.8 : Vue d'ensemble des différentes solutions d'attaches de puces de puissance pour des applications haute et basse température dans l'objectif du remplacement des alliages à base de plomb (32)

1.3.2. Les brasures

1.3.2.1. Les brasures basse température

Afin de remplacer les alliages de brasure à base de plomb, permettant une utilisation à basse température (Sn-37Pb), de nouvelles compositions d'alliages sont apparues. Elles se basent sur des alliages composés d'étain, d'argent ou encore de cuivre, l'alliage le plus connu étant le SAC (SnAgCu). Des compositions plus exotiques ont également vu le jour. Le tableau 1.4 recense les principales brasures basses températures et leurs propriétés.

Table 1.4 : Propriétés des alliages de brasures basse température (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54)

Alliage - % matériaux minoritaires	Température de fusion (°C)	Module d'Young (GPa)	CTE (°C)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Conductivité Electrique (S/m)	Avantages	Inconvénients
SnPb - 37	183	40	25	51	6,80E+07	Coût Température de fusion basse	Polluant (Pb)
SnAgCu - (3,8-4,7) - (0,5- 1,7)	216 - 219	30	23	55	6,67E+06	Disponibilité Mouillabilité Résistance Mécanique Fiabilité brasabilité	Formation de composés CuSn Coût Température de fusion élevée Microfissures Brevet
SnAg - 3,5	221	50	20	30-40	6,67E+06	Fiabilité	Température de fusion élevée
SnCu - 0,7	227	-	~23	2	6,67E+06	Coût Intermétallique plus stable	Température de fusion élevée
BiSn - 42	195	42	15	19	2,86E+06	Température de fusion	Disponibilité du Bi Coût
InSn - 48	215	23	20	34	6,67E+06	Bonne résistance à l'oxydation (sauf en environnement humide)	Coût Disponibilité de In Température de fusion Fiabilité
SnInAg - 20 - 2,8	220	35-50	23	55	-	Propriétés	Coût Disponibilité d'In Température de fusion
SnAgCuSb - 2,5 - 0,8 - 0,5	217 - 220	30	23	55	6,67E+06	Pas d'oxydation et de corrosion, Propriétés	Toxicité de Sb, Coût Température de fusion

1.3.2.2. Les brasures haute température

Afin de remplacer les alliages de brasure à base de plomb, permettant une utilisation à haute température (Pb-5Sn), de nouvelles compositions d'alliages sont apparues. Elles se basent sur l'utilisation des composants suivants : l'or, l'argent ou encore l'étain. Des compositions plus exotiques à base de bismuth ou de zinc ont également vu le jour, le tableau 1.5 recense les principales brasures hautes températures actuelles qui ont été étudiées.

Tableau 1.5 : Propriétés des alliages de brasure haute température (55) (52) (56) (41) (57) (54) (42)

Alliage - % matériaux minoritaires	Température de fusion (°C)	Module d'Young (GPa)	CTE (°C)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Conductivité Electrique (S/m)	Avantages	Inconvénients
PbSn - (5-10)	315	20	28,7	35	-	Tenue corrosion Résistance thermique, Microstructure stable Mouillabilité	Tenue thermomécanique Plomb
PbSnAg - 2 - 2,5	300	13,8	25	23	4,35E+06	Fiabilité	Plomb
BiAg - 2,6	262	-	-	8	-	Température de fusion Dureté proche de PbSn	Conductivité thermique et électrique Coût
AuGe - (12-28)	360	70	13	44	-	Critère de solidification	Coût
AuSi - 20	363	-	12,3	27	-	Critère de solidification	Mouillabilité Coût
ZnAl - 6	381	-	-	-	-	Coût, Possibilité d'abaisser la Température de fusion en ajoutant Mg ou Ge Critère de solidification proche de PbSn	Miniaturisation limitée (Al), Corrosion de Zn, Mouillabilité
AuSb - 35	357	-	-	-	-	Critère de solidification	Mouillabilité Sb toxique Coût
AuSn - (30 -94)	350	68	16	58	6,20E+07	Critère de solidification Riche en Sn plus stable	Au5Sn phase fragile Coût

Le choix de l'alliage de brasure que ce soit à basse ou haute température est essentiel afin d'obtenir les propriétés finales désirées. L'entrée en vigueur de la réglementation RoHS a conduit au développement de nouveaux alliages afin de remplacer les usuels SnPb37 et PbSn5. L'alliage SnAgCu et les alliages à base d'or semblent être les choix privilégiés dans le cadre de ce remplacement. La nécessité d'augmenter la fiabilité des assemblages de puissance a également conduit au développement de nouvelles technologies de report de puce

de puissance. Dans ce cadre, plusieurs voies se sont ouvertes comme nous allons le voir ci-après.

1.3.3. Technologies alternatives d'assemblage

1.3.3.1. Les assemblages « auto-agrippants »

Ces nouvelles technologies devraient pouvoir amener de nombreux avantages parmi lesquels un bon report à la fois mécanique, thermique et électrique ainsi que la compatibilité avec une intégration 3D des assemblages. Ces derniers sont réalisés par mise en pression à température ambiante suite au dépôt des matériaux auto-agrippants sur les éléments de l'assemblage. De nombreux travaux sont en cours au niveau international, nous présentons, dans ce qui suit, un aperçu de telles technologies.

Le « gecko » est à l'origine de la première technique d'auto-agrippement. En effet, cet animal possède sur ses pattes des poils permettant de s'accrocher partout et dans toutes positions avec une force d'attache élevée (58). L'attache « Gecko » se base sur les forces intermoléculaires de Van der Waals qui créent des liaisons au niveau moléculaire pour réaliser l'attache (59) (60). Ces liaisons sont créées par le biais de cheveux submicroniques de kératine qui produisent chacun une force élémentaire de l'ordre de 10^{-7} N. Les différents travaux sur cette technologie n'apportent pas les performances espérées et en sont encore aux balbutiements.

Dans le cas des interconnexions par enchevêtrement de nano fils conducteurs, les surfaces des deux matériaux à assembler sont recouvertes d'une structure en nano fils et ensuite assemblées par compression à froid. L'interpénétration des structures entre elles crée ainsi une liaison électrique, thermique et mécanique. Dans ce cas, le mécanisme d'adhésion résulte de l'enchevêtrement des nano fils, c'est une technologie analogue à l'accroche velcro. Les différents travaux en cours sur cette technologie se différencient par les types de nano fils utilisés : en carbone (figure 1.9.a) (55) (61) (62) (63), en polymère (figure 1.9.b) (64) et métalliques (figure 1.9.c) (49) (65). Les propriétés thermiques et mécaniques obtenues sont de très loin supérieures à celles obtenues avec des brasures (limite d'élasticité de l'ordre de 45 GPa, conductivité thermique 6000 W/m.K pour les nanotubes de carbone par exemple (61)). Néanmoins, ces technologies utilisent des procédés de fabrication complexes et coûteux (CVD, très haute température) et sont toxiques pour l'homme (nanotubes en carbone).

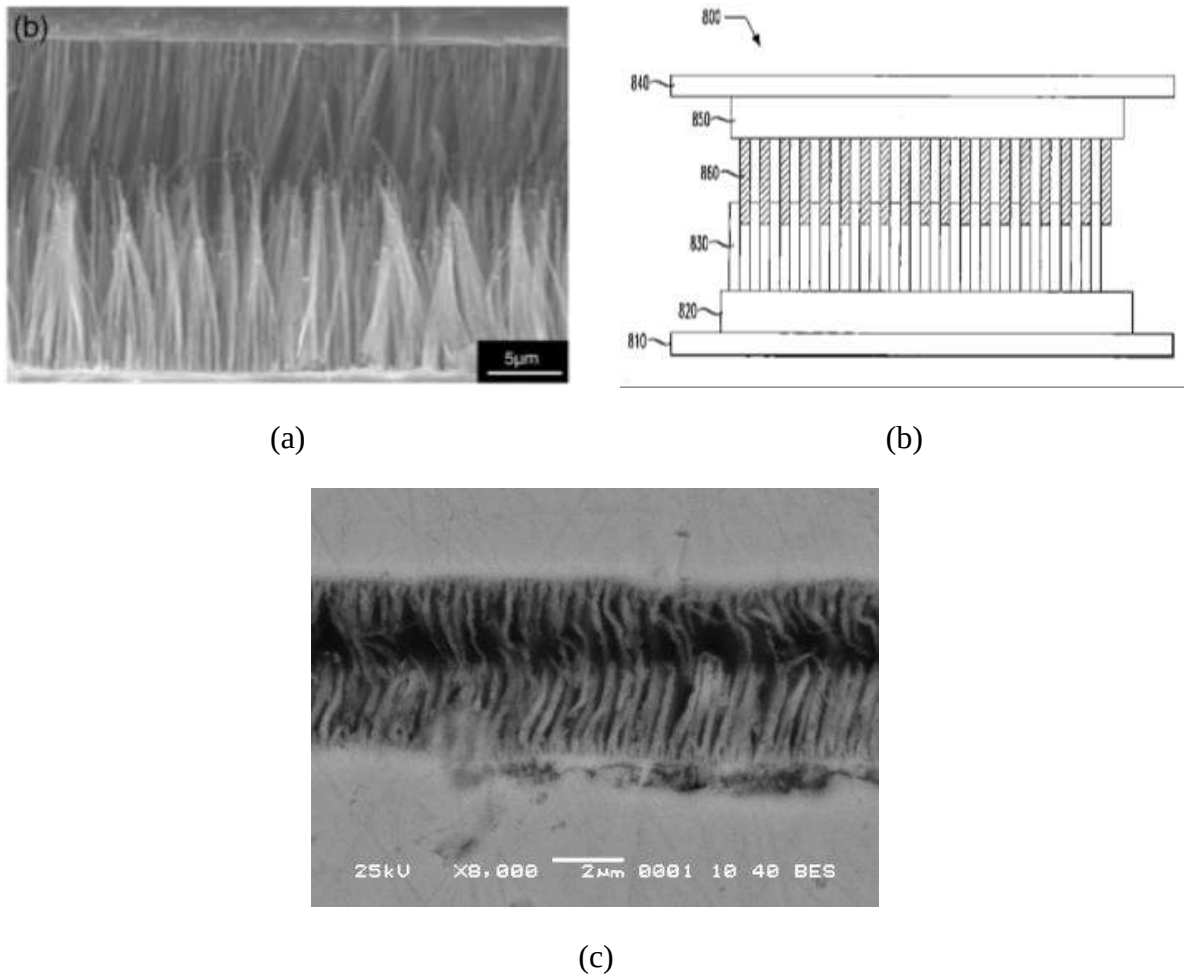


Figure 1.9 : (a) assemblage par nano tubes de carbone, (b) assemblage par nano fils polymère et (c) assemblage par nano fils de cuivre (49) (62) (64)

1.3.3.1.2. Les adhésifs conducteurs

Les adhésifs conducteurs (Electrically Conductive Adhesives - ECA) sont composés d'un liant polymérique assurant les propriétés mécaniques et d'une charge métallique (20 - 80% en argent) (66). L'argent apporte les propriétés thermiques et électriques et permet un bon fonctionnement du module de puissance (67). Les propriétés d'un adhésif conducteur générique sont clairement inférieures à celles d'un alliage classique SnPb (tableau 1.6).

Tableau 1.6 : Propriétés des alliages de brasures et des adhésifs conducteurs [33]

Matériau	Température minimale de procédé (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Conductivité électrique (S/m)	Résistance au cisaillement (MPa)
Alliage SnPb	215	30	6,80E+07	15
Adhésif conducteur	150 - 170	3.5	2,8E+05	13

Deux types d'adhésifs existent : les adhésifs conducteurs isotropiques (ICA) (figure 1.10.a) et les adhésifs conducteurs anisotropiques (ACA) (figure 1.10.b). Ils se différencient par l'orientation des particules d'argent qui influence la conductivité électrique des joints d'assemblage. Le premier a la même conductivité électrique quel que soit le sens alors que le second privilégie un sens de conduction (généralement l'axe z) (68). Un troisième type d'adhésif non conducteur existe mais leur développement reste très restreint (figure 1.10.c). L'ajout de particules d'argent complexifie le procédé d'assemblage mais est nécessaire afin de respecter le cahier des charges des alliages usuels. Dans le but de garder la caractéristique de procédé basse température, deux choix sont possibles afin de réaliser un assemblage avec un adhésif chargé argent. Le premier repose sur le principe d'utilisation d'une phase liquide transitoire (cf. 1.3.3.3.) et le second se base sur le frittage de nanoparticules d'argent (cf. 1.3.3.4.) Cet ajout de particules d'argent a pour effet une amélioration significative des conductivités thermiques et électriques ainsi que de la robustesse thermomécanique.

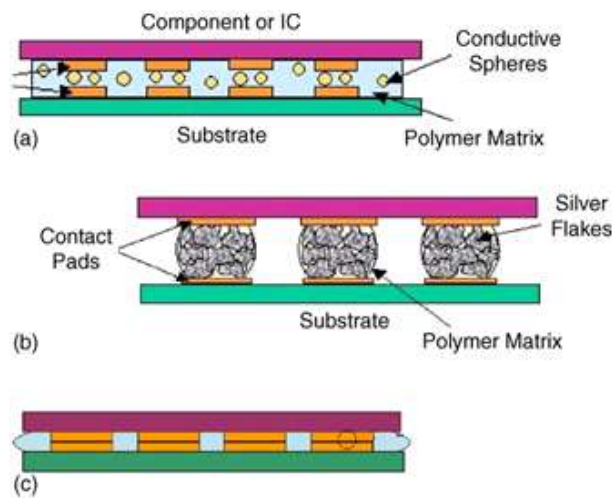


Figure 1.10 : Technologies de report de puce ACA (a), ICA (b) et NCA(c) (69)

Les principaux avantages de cette technologie sont : des conditions de procédé moins sévères en termes de contraintes résiduelles, des matériaux plus respectueux de

l'environnement (pas de plomb ni de flux), un procédé avec moins d'étapes et une meilleure adaptabilité à tous types de surface contrairement aux alliages de brasure (69) (70). En contrepartie, d'importants inconvénients ne favorisent pas cette technologie : faible conductivité thermique et électrique, faible résistance thermomécanique, faible capacité de transfert de courant, faible force d'adhésion et l'apparition de migration métallique des particules d'argent pouvant causer des court-circuits ou une réduction de la conductivité électrique localement (69).

1.3.3.3. La soudure par phase liquide transitoire

Le développement de la haute température ($> 200^{\circ}\text{C}$) dans les applications aéronautiques, spatiale et militaire a conduit à s'intéresser aux phases composées d'intermétalliques (71). En effet, pour former une phase intermétallique haute température ($> 400^{\circ}\text{C}$), il suffit d'un procédé à basse température ($200^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$). Ce procédé, proche de celui avec une brasure traditionnelle, est appelé soudure par phase liquide transitoire (72) (73) (74). Comme pour le procédé de brasage, cette technique nécessite une préforme appelée Transient Liquid Phase Bond. Elle est placée entre le substrat et la puce pour ainsi réaliser l'attache des éléments (figure 1.11) (75).

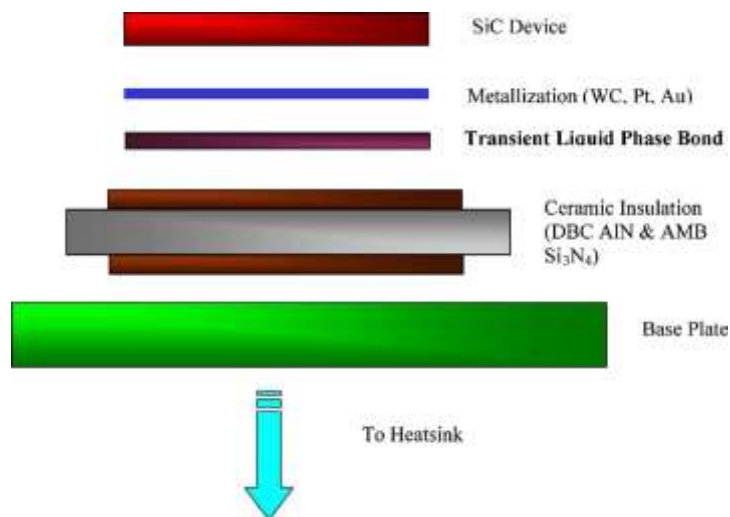


Figure 1.11 : Soudure par phase liquide transitoire (75)

Le procédé se base sur deux principes : le brasage et la diffusion (76). L'assemblage est monté à la température de fusion de la préforme et mis sous pression. Elle devient liquide et diffuse dans les couches restées solides (métallisations de la puce et du substrat). Cette diffusion va donc créer de nouvelles phases composées d'intermétalliques qui ont une température de fusion plus élevée. L'utilisation de la pression est là pour assurer un bon

contact physique entre les différentes composantes de l'assemblage dans le but de faciliter le procédé (75). Le tableau 1.7 regroupe les principaux matériaux utilisés dans le cadre de la soudure par phase liquide transitoire.

Tableau 1.7 : Propriétés des soudures par phase liquide transitoire (55) (75)

Matériau	Température du procédé (°C)	Température de fusion après le procédé (°C)
Au/In	200	495
Au/Sn	450	900
Ag/In	175	880
Ag/Sn	250	600
Cu/In	180	307
Cu/Sn	280	415

Ce type de procédé a également été développé chez Infineon Technologies. Il se base sur l'utilisation d'intermétalliques à base de cuivre et d'étain (Cu₃Sn et Cu₆Sn₅). Le procédé a lieu à 280°C et permet la formation d'un assemblage ayant une température de fusion de 415°C (77). Un joint d'assemblage de 10 µm d'épaisseur est possible par un procédé de Pick & Place. L'assemblage obtenu possède une bonne résistance au cisaillement (environ 30N pour une puce de 3,8x3,8mm²). Un recuit à 400°C pendant 100h permet d'augmenter cette valeur jusqu'à 80N en accroissant la diffusion (75). L'assemblage obtenu possède des caractéristiques proches de celles obtenues avec un alliage traditionnel (55). La température de refusion est élevée (>400°C, cf. tableau 4) et adaptée aux assemblages de puissance haute température. La présence d'intermétalliques dont la croissance fragilise mécaniquement l'assemblage réduit le champ de développement de cette technologie. La présence de lacunes de Kirkendall et un procédé de longue durée comparée à celle avec les alliages traditionnels sont également des freins à cette technologie (54) (78) (79).

1.3.3.1.5. Le frittage de pâte d'argent

Le procédé de frittage de pâte d'argent est une technique d'assemblage à basse température basée sur le même principe que le frittage en phase solide. Elle a été développée par Schwarzbauer et Khunert au début des années 1990 dans le cadre de recherches sur de nouvelles techniques d'assemblages pour les modules de puissance (80). Un procédé utilisant des pâtes d'argent micrométriques frittées à une température comprise entre 200°C et 300°C avec une pression entre 30 et 40 MPa fut développé. Cependant, compte tenu de la courte

période de développement, elle ne fut pas jugée prête et assez développée pour une application industrielle (80).

Cette technique permet donc la réalisation d'un assemblage à basse température ($<300^{\circ}\text{C}$) par rapport à la température de 500°C nécessaire pour réaliser le frittage classique de la poudre d'argent. Une vue en coupe du procédé utilisé est présenté ci-dessous en figure 1.12. Le substrat et la puce sont recouverts d'une métallisation d'argent afin d'optimiser l'adhésion avec la pâte d'argent. La pression est appliquée par appui sur la puce. Des guides d'assemblage permettent le maintien de la puce sur la couche de pâte d'argent.

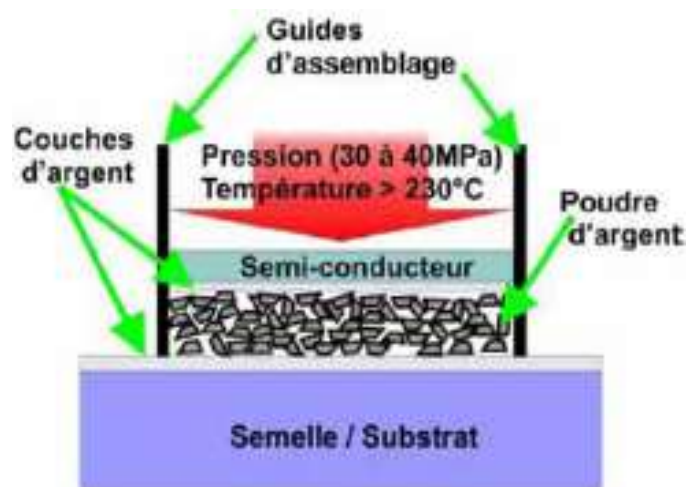


Figure 1.12 : Vue en coupe du procédé de frittage de pâte d'argent (22)

Le développement du frittage de pâte d'argent à basse température vient du fait que les composants électroniques supportent mécaniquement mal les températures élevées comme celles nécessaires pour le frittage classique de la pâte d'argent. Le frittage de pâte d'argent à basse température suit un cycle thermique de montée, de maintien (palier) et de descente en température (figure 1.13).

L'absence de phase liquide lors du frittage permet un meilleur maintien de la position de la puce. Des études de vieillissement accéléré en enceinte climatique ont montré une fiabilité accrue par rapport aux alliages de brasures et à toutes autres technologies nouvelles. En effet, à épaisseur 4,5 fois inférieure, les couches de pâte d'argent frittées permettent d'obtenir des caractéristiques supérieures aux joints brasés (conductivité thermique 4 fois supérieure à celle de la technologie par brasure) (tableau 1.8) (81).

Tableau 1.8 : Propriétés de différents alliages de brasures et de l'argent fritté (82)

Matériau	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Conductivité électrique (mS/m)	Epaisseur du joint (μm)	Coefficient de dilatation (ppm/°C)	Limite Elastique (MPa)
Sn-37Pb	183	51	6.8	200	25	40
Sn-3Ag	221	70	6,67	200	28	30
Pb-5Sn	315	35	17	200	28,7	20
Ag fritté	961	240	41	20	19	55

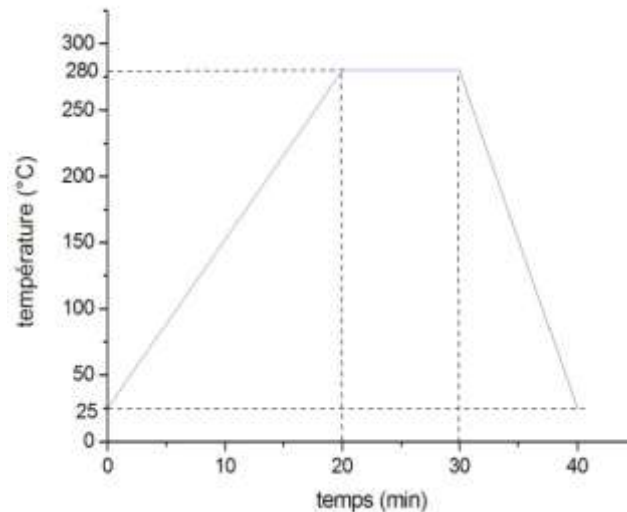


Figure 1.13 : Cycle thermique d'un procédé de frittage pour une pâte d'argent donnée

1.3.4. Conclusion sur les technologies d'assemblage

Le remplacement des alliages de brasure à base de plomb est devenu essentiel depuis la réglementation RoHS pour la majorité des applications militaires, automobiles et aéronautiques. C'est pourquoi de nombreux axes de recherches se sont concentrés sur le développement de nouveaux alliages et de technologies alternatives d'assemblage. Cette étude a montré que le nombre de nouveaux alliages de brasure est important pour les applications basse et haute température. Les plus utilisés étant les dérivés de l'alliage SnAgCu (SAC) pour les applications basse température et les alliages à base d'or pour les applications haute température. La volonté de trouver des matériaux plus performants, tant en propriétés physiques qu'en résistance à la fatigue thermomécanique a conduit les recherches à s'orienter vers de nouvelles technologies telle que l'utilisation d'adhésifs conducteurs permettant des procédés à basse température (température inférieure à celles des alliages traditionnels). Leur limitation se situe au niveau de leur faible conductivité thermique et électrique ainsi qu'au niveau de leur résistance à la fatigue thermomécanique. Ces effets

indésirables rendent l'application de cette technologie difficile au domaine de l'électronique de puissance.

Les assemblages auto-agrippants (attache « Gecko » et interconnexion par nano fils conducteurs) possèdent, sur le papier, des propriétés très supérieures en termes de tenue mécanique et électrique par rapport à toutes autres technologies. Mais l'efficacité de tels assemblages est loin d'être démontrée et les inconvénients de ce type d'assemblages sont nombreux. En effet, en plus d'être réalisé par le biais de procédés complexes et potentiellement inadaptables aux contraintes des semi-conducteurs, le procédé est couteux et toxique. La quatrième solution envisagée est la soudure par phase liquide transitoire (TLPB). Elle permet grâce à un procédé basse température (200°C - 300°C) d'obtenir un assemblage pouvant avoir une température d'utilisation supérieure à 400°C. Par la présence d'intermétalliques, dont la croissance peut limiter la résistance à la fatigue thermomécanique, le TLPB est un bon candidat du fait des propriétés thermiques et électriques et des températures de refusion élevées obtenues.

La dernière solution étudiée est le report de puce de puissance par frittage de pâte d'argent nanométrique et micrométrique. Cette technologie semble la plus prometteuse compte-tenu des propriétés physiques de l'argent brut qui surpassent toutes celles des matériaux utilisés dans les technologies vu précédemment. De plus, des tests de vieillissement ont montré une tenue en fatigue thermomécanique supérieure à celle des alliages de brasures traditionnels. La mise sous pression de l'assemblage lors du frittage permet d'obtenir un joint moins poreux et donc possédant de meilleures caractéristiques qu'avec un assemblage sans pression. Le frittage de pâte d'argent nanométrique utilise la nanotechnologie dont les impacts environnementaux ne sont pas encore très bien connus. De plus, cette technologie présente des propriétés inférieures au frittage de pâte d'argent micrométrique avec pression. C'est pourquoi le frittage de pâte d'argent micrométrique semble être la solution la plus viable pour le remplacement de la technologie utilisant des alliages à base de plomb que ce soit à basse ou haute température. Néanmoins, un nouveau fabricant, Alpha, a développé une gamme de pâtes d'argent nanométriques qui permettent d'obtenir des assemblages aux performances proches de celles des pâtes micrométriques. Aucune étude académique ou industrielle n'ayant été publiée, nous n'avons pu effectuer une étude en amont de ces pâtes d'argent nanométriques, elles seront donc présentées dans le chapitre suivant (cf. 2.2).

1.4. Frittage de pâte d'argent

1.4.1. Le frittage

1.4.1.1. Généralités

Quand est appliquée une énergie thermique à une poudre compacte, celle-ci est densifiée et la taille moyenne des grains augmente. Les phénomènes se déroulant durant ce procédé appelé frittage sont la densification et la croissance des grains (83).

Le frittage est donc un procédé de transformation en métallurgie des poudres sans changement d'état. Il permet la réalisation de pièces à partir de poudres plus ou moins fines en réalisant une élévation de température. La poudre est agglomérée en une préforme puis chauffée à une température inférieure à sa température de fusion afin d'obtenir la cohésion et la densification de celle-ci par la création de liaisons entre les grains. Les pièces obtenues ont comme caractéristique d'être dures, fragiles, inertes chimiquement et à porosité contrôlée. Les différents types de frittage sont classés en quatre familles (84) (figure 1.14) :

- **Le frittage naturel** (sintering) : c'est un procédé économique de chauffe simple de la pièce à la température de frittage. On obtient une pièce avec une porosité résiduelle assez importante.
- **Le frittage sous charge** (hot pressure sintering) : le frittage s'accompagne d'une mise sous pression de la pièce pendant toute sa durée. La densification obtenue sera totale mais avec un coût de production plus élevé.
- **Le frittage réactif** (réaction bonding sintering): le frittage sera le siège de réactions chimiques qui vont permettre la densification de la pièce avec une porosité résiduelle très élevée mais c'est le procédé le plus économique.
- **Le frittage non réactif** : la composition de la poudre est conservée après frittage.

D'un point de vue physico-chimique, on distingue trois types de frittage (figure 1.14):

- **Le frittage en phase solide**: les constituants sont et restent sous forme solide. Technique utilisée dans la fabrication de céramiques techniques (outils de coupe, diélectriques, optiques) du fait de leur grande pureté de joint de grains.
- **Le frittage en phase liquide** : les constituants sous forme liquide vont réagir chimiquement entre eux avec l'effet d'une pression extérieure. Cette technique

permet également de fabriquer des céramiques techniques (nitrures, carbure, borures) qui ne sont pas réalisables en phase solide.

- **Le frittage visqueux ou vitrification** : l'un des constituants du mélange passe sous forme liquide lors du frittage. Ce passage sous forme liquide va permettre un rapprochement des grains et donc facilite la création de liaisons entre les grains.

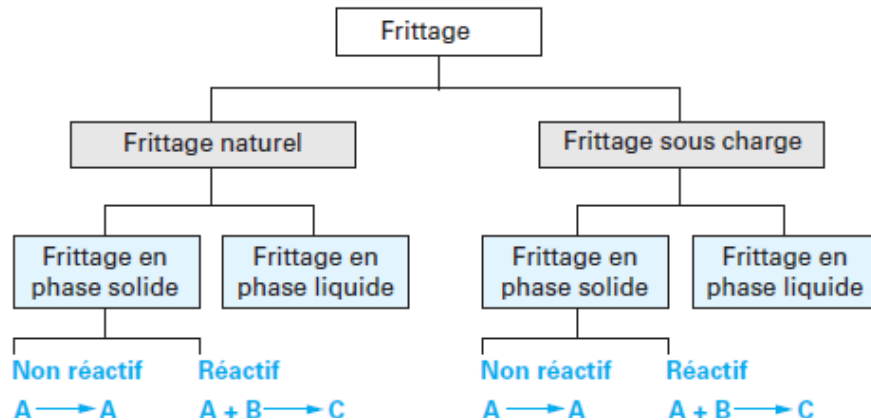


Figure 1.14 : Les différents types de frittage (84)

1.4.1.2. Frittage en phase liquide

Le frittage sous phase liquide est l'objet de plusieurs étapes qui sont décrites succinctement ci-dessous :

- **Etape 1** : La pièce est infiltrée et mouillée par la phase liquide. Un réarrangement des particules solides est observé et va permettre une forte densification.
- **Etape 2** : Les petits cristaux de la phase solide puis les points de contact des gros cristaux vont se dissoudre dans la phase liquide. Par la suite, une diffusion va les transférer dans la phase liquide et cette matière dissoute va précipiter sur les plus gros cristaux
- **Etape 3** : Cette étape est le siège d'une coalescence et d'une croissance des particules.

1.4.1.3. Frittage en phase solide

Le frittage en phase solide est un processus en trois étapes : le déliantage, le frittage et la dilatation de l'échantillon. Chacune d'entre elles s'accompagne d'une variation de volume de la pièce à fritter (figure 1.15) (2) (84)

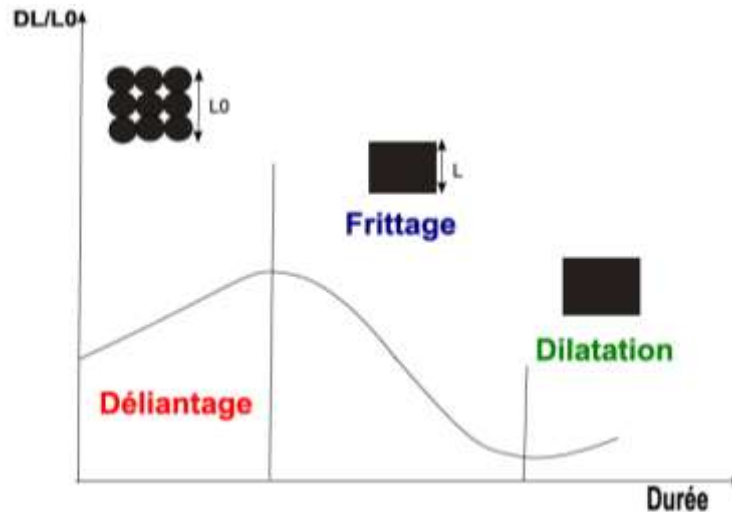


Figure 1.15 : Variation du volume d'une pièce en fonction des différentes étapes du frittage – avec L_0 longueur initiale de la pièce et L la longueur au cours du frittage susceptible d'évoluer - Le rapport L/L_0 représente l'allongement relatif au cours du frittage en fonction de L_0 , longueur initiale et de L , longueur au cours du frittage de la pièce (84)

1.4.1.3.1. Le déliantage

L'étape de déliantage, antérieure au frittage, assure l'évacuation des différents composés organiques (additifs, liants, dispersants) présents autour de la poudre à fritter. Cette étape est réalisée aux températures de vaporisation de ces différents composés chimiques selon un profil temps/température dépendant de ses composés (84) (85). Une vitesse de déliantage trop élevée peut engendrer des fissures dans l'échantillon fritté dues à des bulles de gaz emprisonnées et ainsi le fragiliser (86).

1.4.1.3.2. Le frittage

Le frittage se déroule en trois étapes immédiatement après le déliantage. Ces étapes sont différenciées par la densité (ou la porosité) de la pièce au cours du temps. La densification est la grandeur physique permettant de connaître la qualité du frittage. Plus elle est proche de 100% (porosité proche de 0%), plus la pureté de la pièce est élevée et moins la pièce frittée contient de pores pouvant limiter ses propriétés. Le frittage en phase solide est un procédé se déroulant à haute température mais en dessous des températures de fusion des différents composants de la poudre à fritter. Le frittage en phase solide se différencie du procédé de brasure par la non existence de phase liquide au cours de son procédé. En effet, le frittage en phase solide est une technique dont tous les composés restent solides au cours du procédé (figure 1.16). Cette propriété permet un déplacement moindre des puces lors de l'assemblage.

Il a été observé que la précision du placement des puces après frittage est de 50 μm contre 400 μm pour la technique de brasure (81).

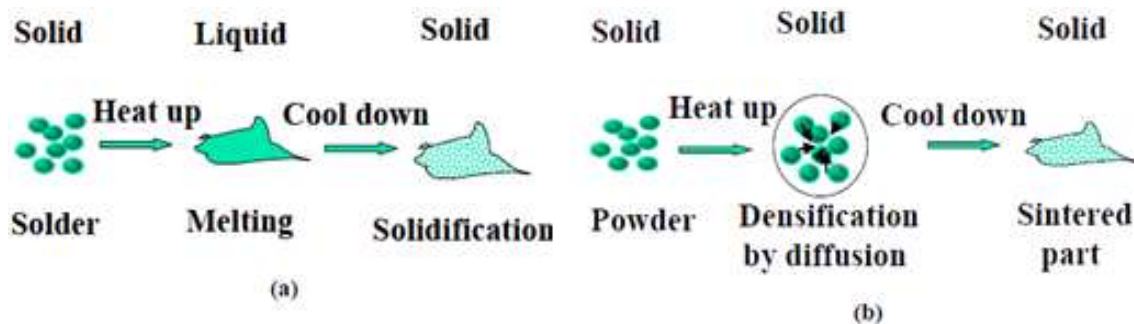


Figure 1.16 : (a) Procédé par brasure (b) frittage en phase solide (84)

Dans un premier temps, un réarrangement des grains a lieu puis des liens s'établissent entre les grains jusqu'à 65% de la densité théorique. Cette étape se termine lors de l'apparition de joints de grains qui sont principalement formés par la diffusion de matière à la surface des grains et entre les joints de grains eux-mêmes (figure 1.17). La porosité de la pièce reste ouverte et un faible retrait (2 à 3%) est observable.

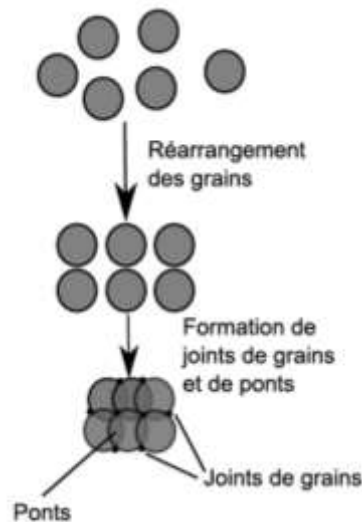


Figure 1.17 : Schématisation du procédé de frittage en phase solide : réarrangements des grains et formations de joints de grains (2)

Une importante densification jusqu'à 92% de la densité théorique caractérise la seconde étape du frittage. Suite à la formation de joints de grains, des ponts entre les grains se créent (figure 1.18). Cet échange de matière permet le grossissement des grains ce qui a pour effet de réduire la porosité ouverte de la pièce et de réduire son volume. Il existe différents types de transport de matière (tableau 1.9).

Tableau 1.9 Types de transport et leur source de matières ayant lieu lors du frittage (84)

Type de transport	Source de matière
Transport gazeux	Surface des grains
Diffusion en volume	Surface des grains
Diffusion en volume	Joints de grains
Diffusion aux joints de grains	Joints de grains
Dislocation	volume

Le frittage se termine par une densification de la pièce jusqu'à 99% de la densité théorique par le grossissement continu des grains et par l'élimination de la porosité fermée. La figure 1.18 représente l'évolution de la densité relative au cours des trois étapes de densification du frittage en phase solide.

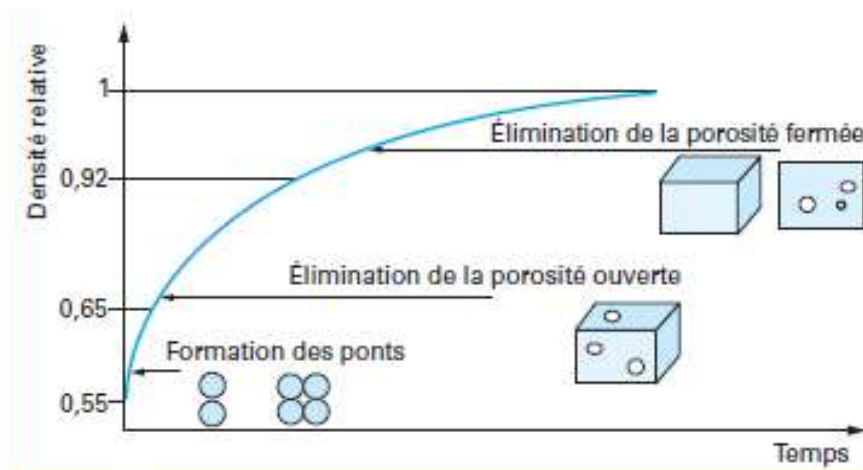


Figure 1.18 : Evolution de la densité au cours du frittage (84)

Au cours du frittage, deux mécanismes sont en compétition, le frittage qui permet la réorganisation des grains ainsi que l'élimination de la porosité et le murissement d'Ostwald. Ce dernier mécanisme amène les grains de petites tailles à migrer vers les grains de tailles plus importantes qui vont les assimiler. Ainsi la taille moyenne des grains augmente sans éliminer la porosité (figure 1.19). Le murissement d'Ostwald est à proscrire car il ne permet pas d'obtenir une pièce densifiée. Afin d'éviter ce mécanisme, l'application d'une pression et une poudre uniforme au départ permettent de limiter la croissance des grains. Ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse de densification et donc de privilégier le mécanisme de frittage (87).

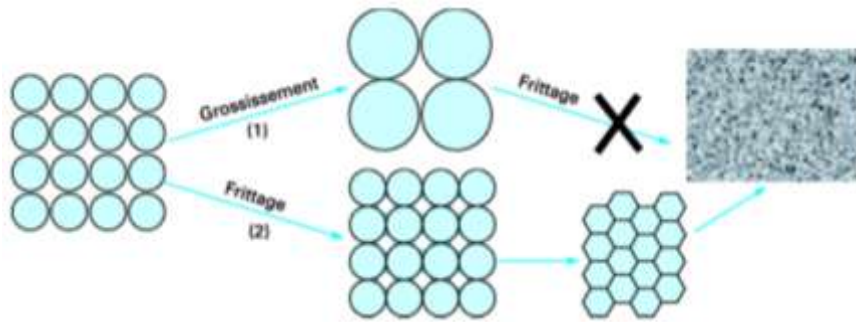


Figure 1.19 : Schéma des deux mécanismes en compétition au cours du frittage d'une poudre (84)

1.4.1.3.3. La dilatation

Pour certains alliages métalliques, une dilatation de la pièce frittée peut intervenir au cours du refroidissement par le biais d'une réorganisation des atomes suite à la création de nouvelles liaisons atomiques (84).

1.4.1.4. Paramètres d'influence du frittage

Les différentes lois d'avancement : la croissance des joints de grains, le retrait et la diminution de la porosité sont contrôlées par différents paramètres tels que la température, la pression et le temps de frittage et la taille des particules (88).

Température de frittage : les différents mécanismes de diffusion étant thermiquement activés, la température joue un rôle prépondérant lors du frittage. La loi d'Arrhenius qui relie la température et le coefficient de diffusion permet de démontrer le rôle de la température. Dans le cas idéal, la diffusion d'un mécanisme D_i est égale à la diffusion idéale de ce même mécanisme D_o , on se rapproche de ce cas avec une augmentation de la température de frittage. On obtient ainsi une diffusion plus rapide et donc une cinétique de frittage augmentée.

$$D_i = D_o * e^{-Q_i/RT} \quad (1.1)$$

Avec, D_i la diffusion, D_o la diffusion théorique et Q_i l'énergie d'activation du mécanisme i , R la constante des gaz parfait et T la température.

Pression de frittage : l'application d'une pression lors du frittage va permettre le rapprochement des particules entre elles et ainsi assurer la continuité de la cohésion lors du frittage. De plus, une forte pression permet une diminution de la température de frittage.

Taille des grains : La granulométrie des particules de poudre influence la cinétique du frittage par le biais de la loi de similitude de Herring (figure 1.20). Cette loi relie les temps de frittage t_1 et t_2 mis pour atteindre un même avancement de frittage avec deux tailles de particules différentes r_1 et r_2 :

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^m \quad (1.2)$$

Avec m dépendant du type de déplacement de la matière et variant de 1 à 4

Des particules de petits diamètres vont permettre de réduire le temps pour atteindre un état d'avancement donné de frittage par rapport à des particules de tailles plus importantes. Par exemple, si on considère que r_1 est dix fois inférieur à r_2 ($10 \cdot r_1 = r_2$) et que m vaut 4 (transport par diffusion aux joints de grains prédominant cf. tableau 9). On obtient donc le temps t_1 (correspondant à la taille de grains r_1) dix mille fois plus court que le temps t_2 (correspondant lui à r_2).

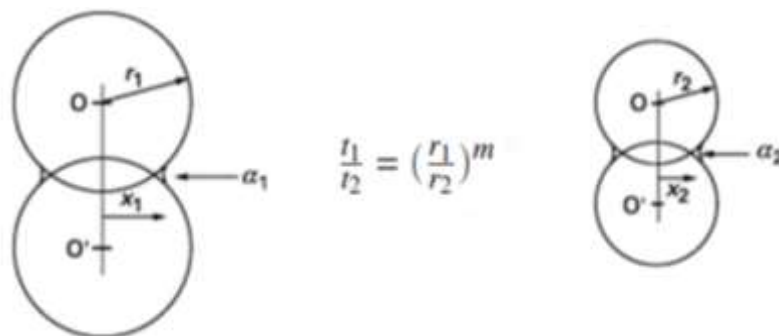


Figure 1.20 : Schématisation de la loi de Herring illustrant l'influence du diamètre des particules d'une poudre à fritter – Des particules de petit diamètre engendreront une cinétique de frittage plus rapide que des particules de diamètre supérieur (84)

1.4.1.5. Conclusion

Le frittage apparaît comme une solution alternative intéressante à la technique de brasage actuellement utilisée. En effet, le frittage permet l'utilisation de module de puissance à une température plus élevée que la température du procédé. Ce qui permet une meilleure résistance aux contraintes thermiques, tout en ayant un procédé réalisé à faible température. L'argent pour ses excellentes propriétés (tableau 1.8) est un excellent candidat pour l'assemblage de puissance. C'est dans ce cadre que les développements se sont tournés vers le frittage de la pâte d'argent dans le but d'apporter une réponse à la problématique des assemblages de puissance.

1.4.2. Le frittage de pâte d'argent

1.4.2.1. Technique d'assemblage à basse température

Comme vu précédemment (cf. 1.3.3.4), le frittage d'argent a été développé par Schwarzbauer et Khunert au début des années 1990 pour des applications en électronique de puissance. L'application d'une pression (30 - 40 MPa) au cours du frittage permet de réduire la température de frittage de l'argent (500°C dans les conditions normales) jusqu'à des températures comprises entre 200°C et 300°C (80).

Une fine couche de pâte d'argent est déposée sur le substrat par sérigraphie (environ 100 μm). Le substrat et les puces semi-conductrices doivent avoir une métallisation (or, argent ou cuivre par exemple) ayant une bonne affinité avec l'argent afin d'obtenir un assemblage de bonne qualité (tenue en cisaillement supérieure à 20 MPa) (89). Ensuite, l'assemblage est porté à température et mis sous pression afin de réaliser l'attache entre les différents composants du module (figure 1.21).

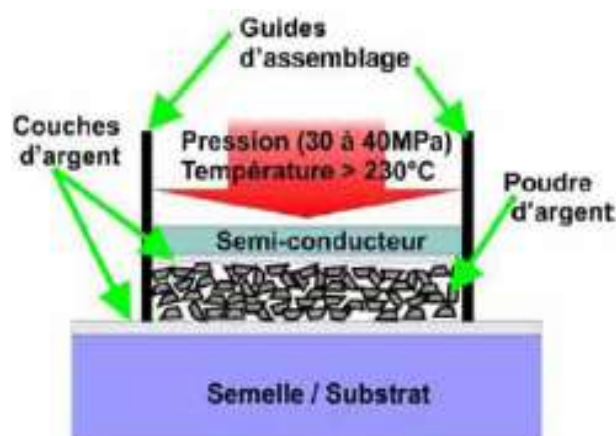


Figure 1.21 : Représentation schématique du dispositif utilisé pour réaliser un assemblage fritté sous pression

1.4.2.2. Deux voies de développement

L'application de pression (cf. 1.3.3.4) au cours du procédé de frittage a été un frein au développement de cette technologie mais elle connaît un essor important depuis les années 2000 par le biais de deux voies de développement :

- **LTPST** (Low temperature and pressureless sintering technology) : utilise des pâtes d'argent nanométriques et se fait sans apport de pression ou avec une faible pression

- **LTJT** (Low temperature joining technique) : est un procédé qui utilise des pâtes d'argent micrométriques avec mise sous pression durant le procédé de l'assemblage comparable au frittage sous charge.

1.4.2.2.1. Le frittage de pâte d'argent micrométrique

La nécessité de développer des joints fonctionnant à des températures supérieures à 300°C a débouché sur la création du frittage de pâte d'argent par Schwarzbauer et R. Kuhnert (80). Malgré des propriétés supérieures à celles de brasures utilisées dans l'industrie, ce procédé ne fût pas utilisé directement. En effet, son développement actuel provient de la réglementation RoHS qui interdit l'utilisation du plomb. Le frittage de pâte d'argent est ainsi apparu comme une alternative aux assemblages de puissance (90) (91) (92) (93) (94). Schwarzbauer et R. Kuhnert se sont basés sur l'utilisation d'une pâte d'argent micrométrique du fait des excellentes propriétés de l'argent (cf. tableau 1.8). La réactivité de la pâte d'argent micrométrique n'étant pas suffisante pour réaliser le frittage à basse température, l'utilisation de la pression est devenue nécessaire. Afin de pouvoir réaliser le frittage de la pâte d'argent, l'application d'une pression de 30 - 40 MPa à une température comprise entre 200°C et 250°C est nécessaire (81). La pression permet de faciliter les échanges de matières entre les particules d'argent (68).

Les développements de procédé se basant sur les pâtes d'argent micrométriques se déroulent surtout dans l'industrie (Semikron, Bosch, Heraeus) alors que les pâtes nanométriques font l'objet de recherches académiques. Les principales raisons invoquées sont le risque sanitaire potentiel de nanoparticules, leur stabilité et le coût plus élevé de production de nanoparticules. De ce fait, des procédés permettant de réduire la pression ont été développés afin de répondre à l'objectif d'une réduction des contraintes mécaniques appliquées au module durant le frittage. Dans son mémoire de thèse (68), Zhiye Zhang a réalisé différents assemblages par frittage avec de la pâte d'argent micrométrique en faisant varier la pression de frittage. La pâte d'argent est sérigraphiée (20 μm) sur le substrat DBC métallisé Ni/Ag afin d'obtenir une meilleure adhésion de la pâte frittée sur le substrat. Les assemblages ont été testés en mesurant la résistance au cisaillement et les conductivités thermiques et électriques des assemblages et comparées avec celles d'assemblage brasé SnPb (tableau 1.10).

Tableau 1.10 : Comparaison des propriétés entre deux couches d'argent frittés (10 et 40 MPa) illustrant la nécessité d'appliquer une pression lors du frittage de pâte d'argent (NBETech) afin d'obtenir des propriétés supérieures à celle d'une brasure SnPb (68)

Propriété	Couche frittée en Argent (40 MPa)	Couche frittée en Argent (10 MPa)	Joint Sn63Pb37
Résistance au cisaillement (MPa)	50	-	20
Résistivité électrique (Ohm.cm)	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$
Conductivité thermique (W/m.K)	80	30	43

Néanmoins, le tableau 1.10 montre la difficulté de réduire la pression tout en conservant les excellentes propriétés de l'argent fritté à 40 MPa. Les conductivités thermiques et électriques, la résistance au cisaillement et le module d'Young étant contrôlés par la porosité qui est dépendante de la pression appliquée lors du frittage. Ce problème a été résolu par l'ajout d'additif dans la pâte d'argent micrométrique (94). En effet, les additifs de frittage permettent de faciliter la cinétique du frittage en augmentant la réactivité de la pâte d'argent. Cet ajout permet de réduire la pression de frittage jusqu'à 5 MPa voire sans pression, tout en limitant la dégradation des propriétés de l'argent fritté (figure 1.22 et tableau 1.11)

Tableau 1.11 : Comparaison des propriétés entre une brasure SnAg3 et une couche d'argent micrométrique avec additif fritté (Heraeus) (94)

Propriétés	Unité	Joint SnAg3	Joint Ag fritté
Température de fusion	°C	221	961
Conductivité thermique	W/m.K	70	240
Conductivité électrique	MS/m	8	41
Epaisseur du joint	μm	90	20
Coefficient d'expansion thermique	ppm/°C	28	19
Limite élastique	MPa	30	55

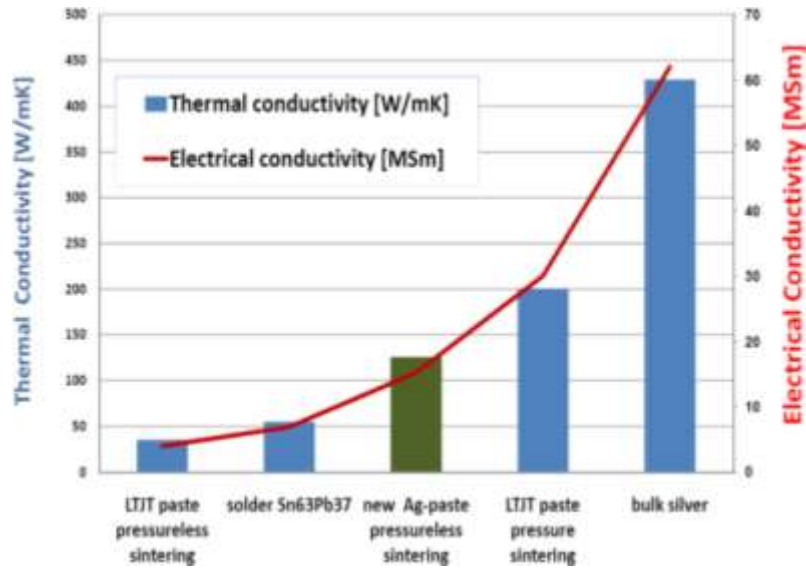


Figure 1.22 : Conductivité thermique et électrique de différents types de joint : 1. pâte d'argent développé par Schwarzbauer sans pression, 2. brasure Sn63Pb37, 3. Argent massif

Les tests de fiabilité par vieillissement passif cyclique ont été effectués afin de comparer les deux technologies d'assemblage. A épaisseur 4,5 fois inférieure, la technologie de frittage présente une conductivité thermique 4 fois supérieure à celle de la technologie par brasure. De plus comme le montre la figure 1.23, la fiabilité de la technologie de frittage est largement supérieure à celle de la technologie de brasure due en partie à la très haute température de fusion de l'argent (961°C) (81).

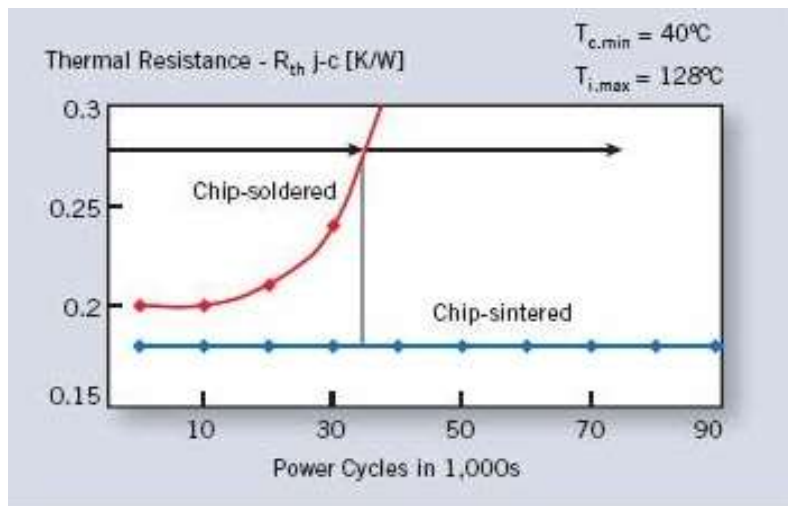


Figure 1.23 : Effet du vieillissement passif sur la résistance thermique d'un assemblage brasé (en rouge) et fritté avec une pâte d'argent micrométrique (en bleu)

Actuellement, Heraeus commercialise quatre types de pâte d'argent permettant de réaliser tous types d'attaches (LED, puces semi-conductrices, composants discrets) (95). Les procédés sont réalisables sur différentes métallisations de substrat (or, argent ou palladium)

avec une pression allant de 0 à 20 MPa. Aucune étude n'a été publiée sur ces nouvelles pâtes d'argent pour le moment. Les différents travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés avec une pâte d'argent de la génération précédente (sans additif).

1.4.2.2.2. Le frittage de pâte d'argent nanométrique

Le développement de la technique LTPST provient de l'émergence des nanotechnologies. En effet, ce type de frittage à basse température utilise de l'argent nanométrique (57) (90) (96) (97) (98) (99) (100). Le choix de réaliser ce frittage sans application de pression part de la volonté de simplifier le procédé élaboré par Schwarzbauer et R. Kuhnert (80). Cette technique utilise des nanoparticules d'argent (diamètre <100 nm), ce qui permet d'augmenter la cinétique de frittage (cf. 1.4.1.4) (101). Les nanoparticules d'argent sont mélangées dans un solvant (liant, dispersant comme pour la pâte d'argent micrométrique). Les solvants permettent d'empêcher l'agglomération (création de liaison de Van der Waals) qui est néfaste car ne permettant pas une répartition uniforme des particules dans la pâte.

Les premiers travaux publiés sur ce type de pâte ont été effectués sur les pâtes d'argent développées par le CPES (2) (68) (96) (102) (103). Ils ont montré qu'il n'est pas aisé de trouver un procédé uniforme. En effet, le procédé d'assemblage par frittage nanométrique dépend grandement des matériaux présents dans l'assemblage et de leurs propriétés (rugosité du substrat, métallisation des puces et substrats) (figure 1.24) (2) (104).

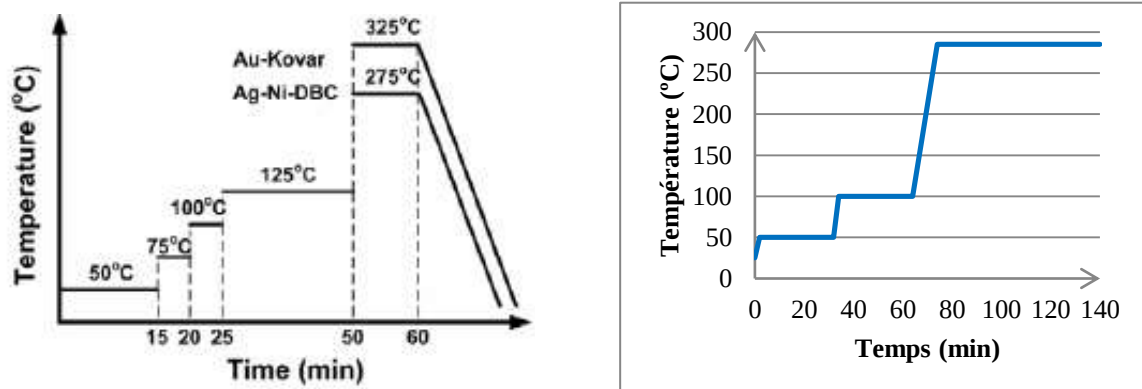


Figure 1.24 : Deux exemples de profils de frittage de pâte d'argent nanométrique optimisés selon les matériaux utilisés et leurs propriétés (2) (68)

Plusieurs paliers permettant l'évaporation des différents solvants sont nécessaires afin d'effectuer l'étape de déliantage. Ils vont assurer une évaporation uniforme et lente dans le but d'éviter la formation de canaux qui dégraderait la couche d'argent frittée et pourrait

engendrer des fissures par la suite en fonctionnement (figure 1.25). Les vitesses de montée (de 5 à 10°C/min) entre les différents paliers vont permettre de contrôler la vitesse d'évaporation des solvants. Ensuite le frittage se déroule à 300°C sans pression pour des composants de taille inférieure à 3 x 3 mm². Pour des composants de taille supérieure (>100 mm² typiquement), l'application d'une pression est nécessaire afin d'obtenir une bonne reproductibilité du procédé. De plus, l'épaisseur après frittage de la couche d'argent étant faible (de 10 à 25 µm), un substrat à trop forte rugosité nécessite un polissage préalable à la sérigraphie afin d'uniformiser sa surface et de réduire sa rugosité (figure 1.26) (2).

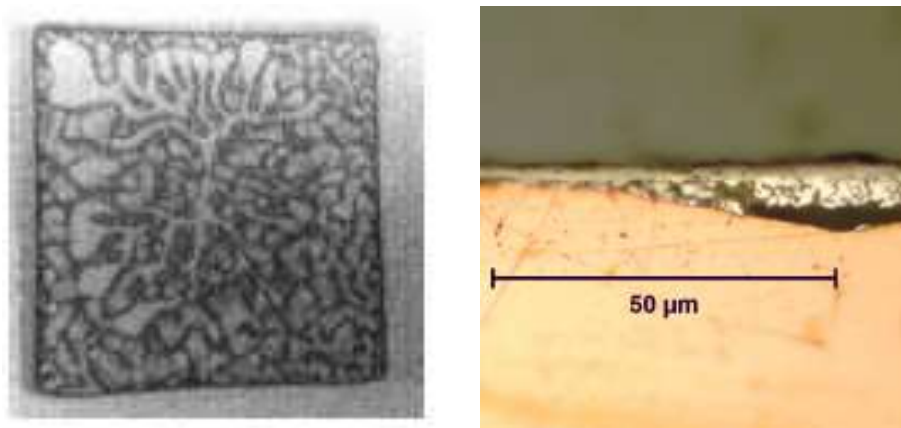


Figure 1.25 : Canaux d'évaporation des solvants résultant d'un mauvais déliantage (gauche) et défauts de contact dans un assemblage dû à la trop forte rugosité du substrat et de la faible épaisseur de la couche d'argent (2)

Tableau 1.12 Comparaison des propriétés entre différents assemblages brasés et frittés [106]

Matériau	63Sn37Pb	80Au20Sn	Pâte d'argent NBETech
Température de process (°C)	213	310	300
Température de fonctionnement (°C)	<183	<280	<650
Conductivité électrique (10 ⁵ (Ohm.cm) ⁻¹)	0,69	0,625	3,8
Conductivité thermique (W/K.cm)	0,51	0,58	2,4
Résistance au cisaillement (MPa)	20-40	80	>30

Dans le cadre de l'utilisation de la pâte nanométrique développée par le CPES (tableau 1.12), les procédés sont nombreux, complexes et dépendent des propriétés et du choix des matériaux. Malgré la volonté de réaliser des attaches sans pression afin de simplifier le procédé, le problème de reproductibilité avec une pression de 0,7 MPa se pose. Ce qui rend l'application de pression (6 MPa ou plus) essentielle afin d'obtenir une attache avec des

propriétés proches de celles obtenues avec le frittage de pâte d'argent micrométrique (tableau 1.13) (2) (105).

Tableau 1.13 : Comparatif de résultats expérimentaux pour un frittage à 285°C – deux séries d'assemblages frittés avec une pâte d'argent nanométrique – deux pressions différentes ont été utilisées afin d'illustrer l'influence de la pression sur la reproductibilité (2)

Pression (MPa)	Tenue au cisaillement (MPa)	Ecart valeur minimale – valeur maximale (MPa)
0,7	20	40
6	20	8

Une autre approche a été d'utiliser un frittage sous pression couplé avec une pâte d'argent nanométrique. Cette approche est celle adoptée par Alpha qui en associant ces deux caractéristiques réussit à obtenir un procédé rapide et reproductible. Afin de répondre aux différents obstacles expérimentés avec la pâte du CPES (faible reproductibilité, choix des matériaux important : métallisation, rugosité), Alpha a développé une large gamme de pâtes d'argent nanométrique. Elles permettent d'obtenir des assemblages aux propriétés supérieures aux alliages de brasures et ainsi qu'une fiabilité cinq fois supérieure (tableau 1.14). Le procédé est un déliantage en 30 minutes suivi d'un frittage à 250°C en 1 minute (le procédé est davantage développé dans le second chapitre). Très peu de travaux ont été publiés sur ce procédé développé par Alpha (deux publications : Toshiba et IMS suite aux travaux de cette thèse). Les propriétés (tableau 1.14) et les données de robustesse (fiabilité cinq fois supérieure aux alliages de brasure) d'un module de puissance utilisant cette pâte d'argent nous ont été transmises par le fabricant.

Tableau 1.14 : Comparaison des propriétés de différents alliages de brasures avec une couche d'argent nanométrique fritté (procédé Alpha)

Matériau	Argent massif	Pâte d'argent fritté Alpha	SAC 305	Brasure à haute tenue en plomb
Température de fusion (°C)	961	961	280	290
Epaisseur de la couche (µm)	-	25	5-15	50-300
Conductivité thermique (W/m.K)	429	200-300	57	26
Résistivité électrique (µΩ.cm)	1,6	2,5-3,5	16	17
Module d'Young (GPa)	83	20	68	21
Tenue au cisaillement (MPa)	-	50	15-20	20

1.4.3 Conclusion sur le frittage de pâte d'argent

Les récents développements du frittage de pâte d'argent développé par Schwarzbauer et R. Kuhnert ont permis de confirmer les premières attentes concernant cette technique dans le remplacement des joints de brasure actuels (alliage en SnPb ou SnAg). En effet, les propriétés (conductivités thermiques et électriques, module élastique, durée de vie, tenue en cisaillement) obtenues sont supérieures à celles des joints de brasure. L'inconvénient, comme il a été vu précédemment, est l'application nécessaire d'une pression afin de fritter la pâte d'argent. Mais des développements de pâte d'argent avec additif et l'utilisation de pâte d'argent nanométrique permettant une réduction significative de la pression appliquée, rendent le procédé plus facilement industrialisable. Le frittage de pâte d'argent apparaît comme une solution viable pour le remplacement des joints de brasure actuels inutilisables pour les applications en assemblage de puissance à haute température (106) (107). Dans le cadre des travaux de cette thèse, trois types de pâtes d'argent ont été utilisés : une pâte micrométrique fournie par Heraeus, une pâte nanométrique et un film d'argent nanométrique fournis par Alpha. Ces différentes technologies de frittage sont développées dans le chapitre 2 dans le but d'obtenir une vision complète des différentes technologies de frittage.

1.5. Fiabilité des modules de puissance

1.5.1. Introduction

La fiabilité des modules de puissance est une problématique majeure en électronique de puissance. Afin de répondre aux attentes et exigences des différents domaines d'utilisation (automobile, avionique et ferroviaire), la compréhension des défaillances conduisant à la perte de fiabilité des modules est nécessaire. Les types de défaillances peuvent être classés en quatre catégories permettant d'avoir une vision globale des phénomènes qui influent sur la robustesse des modules de puissance (figure 1.26). La première catégorie concerne les différents types de défaillances pouvant exister dans les puces de puissance : contamination, oxydation, préparation de surface déficiente, etc. Les défaillances liées au module de puissance lui-même telles que la fatigue thermomécanique des assemblages et des fils de câblage ou encore la présence de lacunes/bulles entre les différents matériaux ont été regroupées dans la seconde catégorie qui forme avec la première le groupe des défaillances de type interne. Les deux catégories suivantes constituent les défaillances de type externe et

comprennent les phénomènes liés aux conditions opératoires et aux conditions extérieures. La suite de cette étude détaille ses différents points dans le but d'obtenir une vue d'ensemble sur les causes ayant une influence sur la fiabilité des modules de puissance.

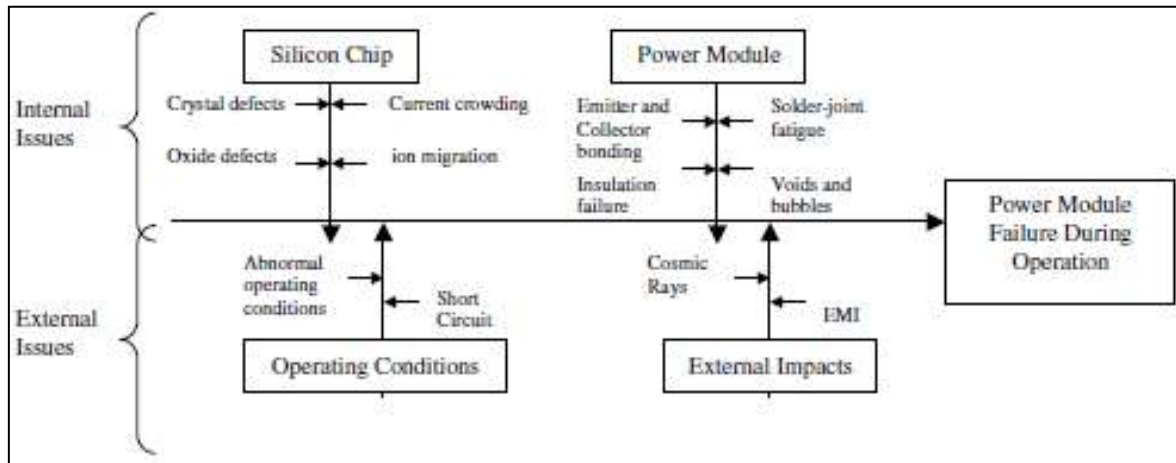


Figure 1.26 : Types de défaillances possibles pour les modules de puissances (108)

1.5.2. Défaillances dans les puces de puissance (108)

Les puces de puissance sont les éléments les plus importants des modules de puissance. En effet, elles assurent la fonction électronique nécessaire au fonctionnement prévu du module de puissance. Les causes de défaillances sont donc principalement liées à la modification du comportement physico-électrique des puces :

- Contamination de la puce : diffusion de métaux lourds entraînant une augmentation de recombinaison et génération de porteurs de charges augmentant ainsi les pertes de courant.
- Dégradation de la couche d'oxyde par l'application de hautes tensions conduisant à des sur-contraintes électroniques.
- Croissance du courant : des défauts dans le réseau cristallin et des procédés non uniformes peuvent rendre la dissipation moins efficace. Ce qui conduit à des irrégularités dans la densité de courant aux points critiques et ainsi à l'augmentation de température jusqu'à faire fondre le composant.
- Migration ionique : l'application d'un champ électrique peut causer le mouvement de ses particules dans la couche de passivation de l'oxyde, dans la région proche de la jonction PN et dans l'oxyde de grille. Ce phénomène de migration ionique peut conduire à des chutes de tension ou encore des sauts de la tension V_{th} .

- Préparation de surface défaillante : dans le cadre des puces de puissance de mauvais choix d'épaisseurs, de propriétés de surfaces et de conditions de procédé peuvent entraîner des délaminages. Ceux-ci sont causés par des résidus de contraintes provenant de la métallisation de la face arrière de la puce et des faces du substrat.

1.5.3. Défaillances dans les modules de puissance

L'assemblage de puces de puissance avec un substrat permet la formation d'un module de puissance. Les assemblages sont réalisés avec des brasures qui permettent de lier les différentes parties entre elles. Cette partie s'intéresse donc aux défaillances apparaissant dans les joints d'assemblage. Les défauts introduits lors de l'assemblage, le partage de courant entre puces semi-conductrices reportées en parallèle, les défauts dans les jonctions fils/puce et fils/substrat et les défauts d'isolation électrique ne seront pas traités dans cette partie car ils ne sont pas au centre des travaux effectués dans le cadre de cette thèse.

1.5.3.1. Fatigue des joints d'assemblage

L'un des phénomènes majeurs affectant la fiabilité des modules de puissance est la fatigue des joints d'assemblage. De grandes différences entre les CTE des matériaux et d'importantes variations de températures d'opération sont les principaux catalyseurs de la fatigue dans les joints d'assemblage. Des fissures ou/et fractures thermomécaniques (figure 1.27) vont se former entre les différentes interfaces (substrat/joint et joint/puce) aux endroits les plus fragiles thermomécaniquement (les singularités géométriques). Ce qui a pour effet de réduire la faculté du module à dissiper thermiquement l'auto-échauffement généré dans la puce (109).

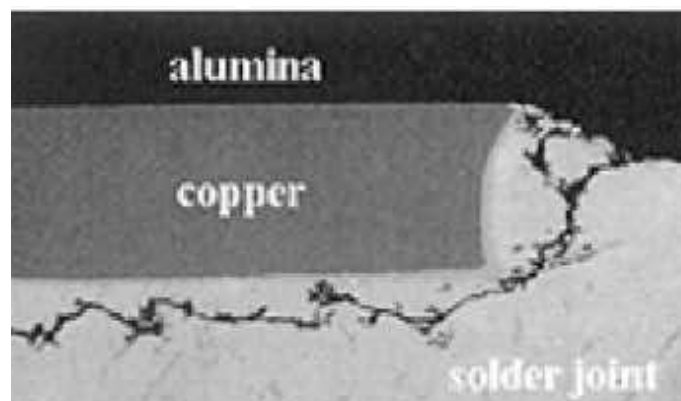


Figure 1.27 : Fissure dans un joint d'assemblage d'un module IGBT (109)

Les effets des CTE sur la robustesse des modules de puissance sont étudiables par les essais de vieillissement thermique accéléré (110). Ils sont réalisés à l'aide d'enceinte de cyclage permettant des variations de températures. Plusieurs facteurs impactent sur la robustesse des modules de puissance : la capacité à résister à d'importantes contraintes, la structure (packaging, géométrie), les précontraintes déjà existantes et le type de vieillissement thermique. Il existe deux types de mécanismes de défaillances issus de la différence de CTE entre les matériaux (figure 1.28) (111). Le premier mécanisme (figure 1.28.b) permet de décrire la croissance de fissures à partir de singularités géométriques (à l'interface métallisation/céramique) liée à la fatigue thermomécanique des joints d'assemblage. L'apparition de telle fissure va dépendre du vieillissement thermique (écart de températures), de la géométrie du substrat et de la localisation des amorfes de fissures par rapport aux singularités et aux interfaces (111). Le second mécanisme (cf. figure 1.28.a) se base lui sur les défauts « naturels » du substrat en céramique. Si la variation de température est conséquente, des fissures peuvent apparaître dans la céramique. La localisation de telle fissure va dépendre de la géométrie des défauts et des défauts eux-mêmes (pore, microfissure, etc.) (111).

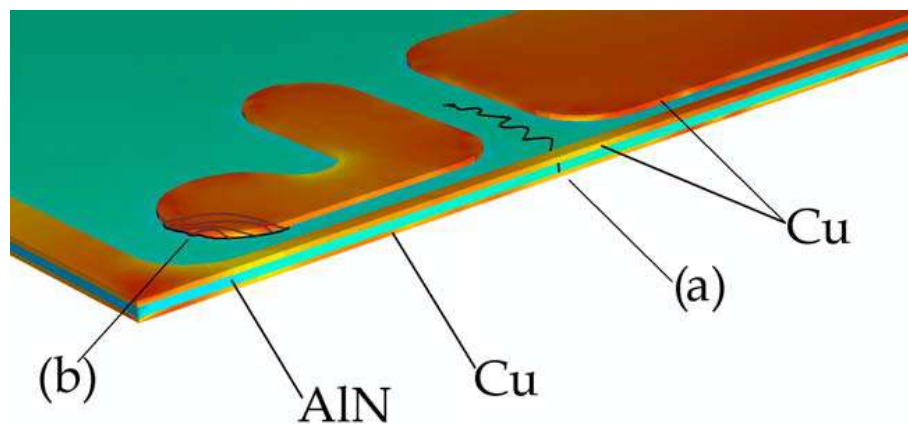


Figure 1.28 : Schéma des deux types de défaillances dans un substrat. (a) fracture du substrat en céramique. (b) croissance d'une fissure à l'interface cuivre/céramique (111)

Le réseau intergranulaire joue également un rôle dans la croissance des fissures/fractures résultant de la fatigue thermique (112). Des études ont montré que la fatigue thermique de couches contenant de l'étain (Sn) engendre une fatigue thermique intergranulaire (113) (114) (115). La fatigue thermique intergranulaire augmente avec le facteur de forme dans l'assemblage (116). Cet effet provient d'anisotropie entre les grains des joints de brasure qui ont un effet néfaste sur l'évolution des fissures/fractures lors de cyclage thermique même sur

de faibles variations ($+30^{\circ}\text{C}$ / $+75^{\circ}\text{C}$) (112). La microstructure a donc une corrélation directe avec les défauts résultant de la fatigue thermique.

Différents modèles réalisés à l'aide de logiciel de simulation permettent d'évaluer la durée de vie des modules de puissance et également de trouver des solutions afin améliorer leur fiabilité. Limiter le phénomène de lacunes, ajuster entre eux des différents CTE et/ou modifier la géométrie des modules sont des solutions envisageables (24). Des analyses de la structure à l'aide d'un microscope acoustique permettent de repérer les endroits « fragiles » (lacunes, fissures ou délaminage) d'un matériau et ainsi déterminer quelles modifications du procédé d'assemblage et de la structure sont nécessaires pour réduire ces effets néfastes (108) (109).

1.5.3.2. Présence de lacunes et de bulles dans les joints d'assemblage

La présence de lacunes et de bulles dans les joints d'assemblage est l'un des phénomènes engendrant le plus de défaillances dans les modules de puissances. Leur présence peut engendrer de la fatigue thermomécanique par interaction avec le flux thermique et/ou avec les amorces de fissures (24). La figure 1.29 montre une lacune sous trois IGBT observée aux rayons X. Certaines précautions lors des procédés d'assemblages sont pris afin d'éviter la formation de ces inclusions gazeuses. Les principales étant l'utilisation de four sous atmosphère contrôlée et de rendre le plus propre possible les différentes étapes du procédé. De plus, il est essentiel de réaliser des contrôles des profils de températures de brasures et de recuit afin de prévenir la croissance de couches intermétalliques fragiles. Ce phénomène reste encore à l'heure actuelle un problème dans les assemblages de grandes dimensions (24).

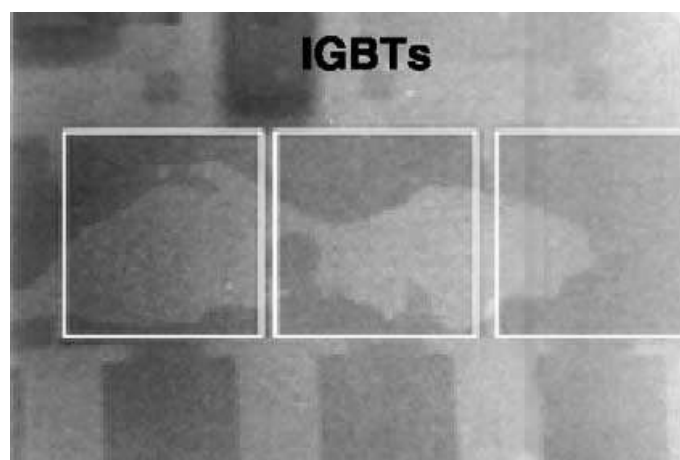


Figure 1.29 : Lacune sous des IGBT observé aux rayons X

1.5.3.7. Délaminage métallique et dégradation de surface

Des délaminages peuvent se produire dans les couches conductrices des modules de puissance : dans les pistes en cuivre reportées sur le substrat ou dans les brasures (117). La présence de lacunes ou une mauvaise optimisation de la géométrie de l'assemblage sont les principales causes de l'apparition de délaminage. L'interface entre la céramique et le cuivre est la zone principale où des délaminages peuvent apparaître. La différence entre les CTE des deux couches peut engendrer des contraintes entre elles. La gravure de trous aux arêtes des pistes de cuivre permet de réduire les contraintes mécaniques. Ainsi la probabilité d'apparition du phénomène de délaminage diminue malgré une augmentation possible de la résistance thermique (108). Les différences de CTE entre les matériaux, des recristallisations et des phénomènes d'électro-migration durant des cycles thermiques peuvent conduire à des dégradations de surfaces dans les modules de puissances (109).

1.5.4. Défaillances résultantes des conditions opératoires

Les modules de puissance sont utilisés dans différents domaines et sont donc sujets à des conditions opératoires très différentes selon le profil, l'environnement d'utilisation et le temps d'utilisation. Les conditions opératoires peuvent, elles aussi, agir sur la fiabilité des modules de puissance. Des températures de fonctionnement inadaptées peuvent conduire dans les composants à semi-conducteurs de puissance à des défauts de commutation. Ce qui a pour effet d'augmenter la surtension inductive et les pertes, et de réduire les temps de commutation. Afin d'éviter ces effets, une réduction de l'inductance ou une augmentation de la résistance de grille sont généralement réalisées si le module de puissance opère à basse température (108). La corrosion est également un problème majeur quand les modules sont utilisés en atmosphère sévère (présence d'oxygène en forte dose ou immersion dans une phase aqueuse). Les zones à fortes contraintes résiduelles (les fils de câblage et la métallisation des substrats) sont sujettes à ce phénomène (108).

Le court-circuit est l'un des phénomènes électriques extrêmes à ne pas négliger dans le cadre d'une étude sur la fiabilité des modules de puissance. En effet, le phénomène de court-circuit a de multiples origines : asymétrie des courants, utilisation du module hors de la zone de sécurité, surtension, isolation diélectrique déficiente, vieillissement, fonctionnement anormal de la grille, partage de courant inhomogène, rupture diélectrique, irradiation par rayons cosmiques ou encore propagation de fractures.

Le phénomène de trichyte (tin whiskers en anglais (filament d'étain)), a pris une place importante depuis l'introduction des brasures sans plomb. Ce phénomène était inhibé par la présence de plomb dans les brasures. La croissance de filament d'étain dans la brasure ou le dépôt métallique peut engendrer un court-circuit si ces filaments rencontrent une couche conductrice voisine (figure 1.30). Le mécanisme créant ce phénomène est méconnu mais il a été attribué à des contraintes en compression, des températures de fonctionnement fluctuantes et des différences entre les CTE des matériaux des modules de puissance (118).

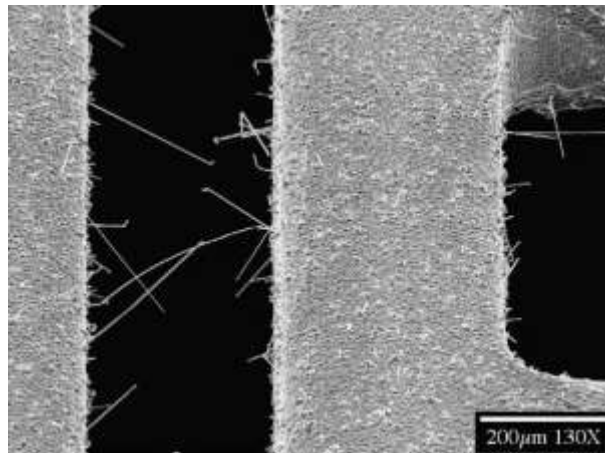


Figure 1.30 : Court-circuit dans un module de puissance causé par le phénomène de Tin whiskers (118)

Au final, un court-circuit dans un semi-conducteur engendre le phénomène de « Burnout » (vieillessement, usure). Phénomène qui par le maintien d'un important courant dans le circuit (causé par le court-circuit) durant un laps de temps important engendre des phénomènes thermiques non désirés jusqu'à la destruction du module de puissance (24).

1.5.5. Défaillances résultant d'un environnement hostile

L'aspect environnemental rentre également en compte quand on cherche à définir les paramètres influençant la robustesse des modules de puissance. En effet, un environnement hostile résultant de la présence d'un champ électromagnétique ou de rayons cosmiques peut être la cause de défaillances.

Les défaillances liées à des interférences électromagnétiques peuvent être de deux types : soit extérieur au module, soit provenant du module lui-même. Les interférences agissent sur le mouvement des électrons jusqu'au point de rupture qui est l'éjection d'électrons hors du semi-conducteur et donc la modification du comportement physique du semi-conducteur. La source interne de ce type de défaillances est la formation d'étincelles dans les circuits

électroniques fonctionnant en charges inductives. En effet, de tels circuits peuvent subir de brusques coupures de courant conduisant à l'élévation soudaine de la tension et ainsi à l'arrêt du passage du courant (phénomène d'avalanche). Ce phénomène peut créer l'étincelle et ainsi conduire à des interférences électromagnétiques dans les circuits électroniques voisins et aboutir à la défaillance d'autres modules de puissance proches.

L'irradiation des modules de puissance par des rayons cosmiques est une cause supplémentaire de défaillances (119). En effet, l'environnement extérieur est riche en rayons cosmiques pouvant déclencher des phénomènes de diffusion et de désintégration des neutrons du semi-conducteur (24). Ces deux phénomènes sont responsables de la formation de court-circuits (120).

1.5.6. Conclusion sur la fiabilité des modules de puissance

Cet état de l'art a permis de recenser les différentes défaillances pouvant se produire dans un module de puissance. Les puces de puissance, qui assurent la fonction électronique du module sont sujettes à divers facteurs engendrant un mauvais fonctionnement du module de puissance suite à des défaillances. La seconde catégorie de causes internes concerne le boîtier des modules de puissances : l'assemblage et les fils de câblage. En effet, lors de l'assemblage des différentes parties du modules (puce, substrat, semelle, etc.), des contraintes thermomécaniques résiduelles vont apparaître dans les différentes parties du module. Les différents matériaux du module de puissance ont chacun un CTE propre dont les différences sont le problème majeur lors de vieillissements accélérés par cyclage thermique. Les deux catégories suivantes concernent les défauts externes provenant des conditions opératoires et de l'environnement dans lequel fonctionne le module de puissance. La température, la fréquence de fonctionnement et la corrosion sont à considérer malgré la prépondérance des défaillances par court-circuit. Les impacts des rayons cosmiques peuvent également engendrer des court-circuits. Elles font parties des défaillances liées à l'environnement tous comme les défaillances résultant d'interférences électromagnétiques. Ces défaillances modifient le comportement physique et électronique des puces et du module de puissance. Quelques solutions à ces phénomènes ont été détaillées au cours des différentes parties afin d'améliorer la fiabilité des modules de puissance. Le problème majeur à l'heure actuelle reste toujours la compatibilité thermique par le biais du CTE entre les différents matériaux des modules.

1.6. Conclusion

L'électronique de puissance assure la conversion d'énergie et son utilisation s'accroît dans les domaines de l'avionique, du ferroviaire et de l'automobile. De plus en plus de systèmes électroniques embarqués sont présents et la nécessité de miniaturiser les systèmes entraîne l'émergence d'environnements plus sévères qu'auparavant. C'est pourquoi, dans un premier temps, l'étude de la structure et de la composition d'un module de puissance a été nécessaire dans le but d'en comprendre la structure. Cette étude, nous a permis de sélectionner les différents composants (puces semi-conductrices, substrats et semelle) utilisés au cours des différentes études décrites dans ce manuscrit.

La directive européenne RoHS de 2002 a pour objectif d'interdire six substances dangereuses dont le plomb, principal métal utilisé dans les alliages de brasures. Dans le but de remplacer ce composé important pour l'électronique en général, des alternatives aux alliages de brasure à base de plomb sont nécessaires. Différentes solutions ont été présentées : les adhésifs conducteurs, la soudure par phase liquide transitoire, les assemblages « auto-agrippants » et le frittage de pâte d'argent ainsi que différentes brasures sans plomb. Ce dernier du fait des propriétés de l'argent massif et d'un procédé à basse température ($< 300^{\circ}\text{C}$) est la technologie idéale pour assurer la fonction permettant d'assembler entre eux les différents composants d'un module de puissance.

La technologie de frittage de pâte d'argent micrométrique ou nanométrique permet d'augmenter significativement la tenue thermomécanique des assemblages de puissance. La fiabilité des assemblages de puissance est une étude nécessaire dans le but d'évaluer une nouvelle technologie d'assemblage. En effet, comme nous l'avons vu dans la dernière partie de ce premier chapitre, de nombreux facteurs peuvent influencer sur la durée de vie des modules de puissance. Dans le cadre de notre étude, la fatigue thermomécanique est le principal facteur étudié qui induit des défaillances dans les assemblages. Par exemple la croissance de fissures/fractures aux interfaces puce /joint et joint/substrat ou encore le délaminage de la métallisation du substrat.

Les chapitres suivants vont permettre de s'intéresser à différents concepts dans le but d'obtenir une vision complète sur la technologie de frittage de pâte d'argent. Le chapitre 2 détaille la mise au point et l'optimisation de procédés d'assemblage avec plusieurs pâtes d'argent (particules micrométriques et nanométriques). De plus, deux études ont été menées

sur le vieillissement de module selon différents critères dans le but de connaître le comportement thermomécanique de tels assemblages. Le chapitre 3 s'intéresse à l'étude du comportement thermomécanique de modules de puissance frittés par simulation numérique sous ANSYS. Pour conclure, le chapitre 4 est centré sur l'étude de la faisabilité de module de puissance fonctionnel 3D par report de frittage de pâte d'argent.

Chapitre 2. Expérimentations sur le frittage de pâte d'argent, procédés d'assemblage et campagnes d'essai en vieillissements accélérés

SOMMAIRE

2.1. INTRODUCTION	65
2.2. PROCEDES D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT.....	66
2.2.1. INTRODUCTION	66
2.2.2. PROCEDE D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT MICROMETRIQUE	68
2.2.3. PROCEDE D'ASSEMBLAGE PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT NANOMETRIQUE	72
2.2.4. CONCLUSION SUR LES PROCEDES D'ASSEMBLAGES PAR FRITTAGE DE PATE D'ARGENT.....	74
2.3. ETUDE DE L'INFLUENCE DU FRITTAGE DE PATE D'ARGENT SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE EN VIEILLISSEMENT PASSIF ACCELERE.....	75
2.3.1. INTRODUCTION	75
2.3.2. INFLUENCE DE LA METALLISATION DU SUBSTRAT SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE	76
2.3.2.1. <i>Introduction</i>	76
2.3.2.2. <i>Véhicules de tests</i>	77
2.3.2.3. <i>Influence de la métallisation sur la tenue en cisaillement avant vieillissement passif</i>	78
2.3.2.4. <i>Evolution de la résistance thermique des assemblages frittés au cours de vieillissement</i>	80
2.3.2.5. <i>Analyses optiques des véhicules de tests après cours de vieillissement accéléré</i>	88
2.3.2.6. <i>Conclusion sur l'influence de la métallisation du substrat sur la tenue thermomécanique</i>	91
2.3.3. INFLUENCE DE LA SURFACE DE LA PUCE ET DE LA TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE SUR LA TENUE THERMOMECHANIQUE.....	91
2.3.3.1. <i>Introduction</i>	91
2.3.3.2. <i>Véhicules de tests</i>	92
2.3.3.3. <i>Evolution de la résistance thermique des assemblages brasés et frittés au cours du vieillissement</i>	94
2.3.3.4. <i>Analyses optiques de la structure des assemblages</i>	96
2.3.3.5. <i>Conclusion sur l'influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la tenue thermomécanique</i>	103
2.4. CONCLUSION	103

2.1. Introduction

Le chapitre 1, nous a montré que plusieurs techniques alternatives d'assemblage composés d'alliages de brasure existent : les assemblages « auto-aggrépants », les adhésifs conducteurs, la soudure par phase liquide transitoire et le frittage de pâte d'argent. Les premiers résultats sur le frittage sont prometteurs, nous avons donc choisi d'évaluer cette technique d'assemblage au cours de ces travaux de thèse. Le frittage de pâte d'argent est une technologie récente et donc peu de travaux ont été publiés sur les procédés d'assemblage.

Le premier objectif de ce chapitre est de mettre au point des procédés d'assemblage par frittage de pâte d'argent adaptés aux composants électroniques (puces semi-conductrices et substrats) mis à notre disposition. En effet, plusieurs travaux ont montré que les propriétés des composants (rugosité du substrat, métallisations de la puce et du substrat, etc.) influent sur le procédé d'assemblage (2) (102). D'autres paramètres agissent également sur le procédé de frittage (cf. 1.4.1.4) : la température, la pression et le temps de frittage. Nous allons donc étudier les effets de ces paramètres sur les performances mécaniques et thermiques de l'attache puce/substrat dans le but de développer des procédés d'assemblage. Pour cela, nous disposons de plusieurs pâtes d'argent se différenciant principalement par la taille des particules d'argent (micrométrique ou nanométrique), paramètre additionnel influençant grandement la cinétique du frittage (cf. 1.4.1.4).

Le second objectif est d'évaluer la tenue thermomécanique d'assemblages réalisés par les procédés de frittage de pâte d'argent développés. En effet, les modules de puissance sont soumis à des variations de température pouvant être importantes au cours de leur cycle de fonctionnement. Cet effet est quantifiable par des essais de vieillissements accélérés qui permettent d'évaluer la robustesse des modules de puissance. Cette étude est la première partie d'une méthodologie permettant l'évaluation de la durée de vie de modules de puissance (cf. chapitre 3). Nous pourrions ainsi estimer l'intérêt du frittage de pâte d'argent par rapport au procédé de brasure pour les assemblages de puissance.

2.2. Procédés d'assemblage par frittage de pâte d'argent

2.2.1. Introduction

Dans le but de déterminer une procédure d'assemblage par frittage de pâte d'argent spécifique à chaque type de pâte, nous avons mené une série d'expériences préliminaires. Pour effectuer cette tâche, nous avons à notre disposition différentes pâtes d'argent : une micrométrique et la seconde nanométrique. Les deux pâtes d'argent ont été fournies avec des procédés d'assemblage établis par les fabricants (Heraeus pour la pâte d'argent micrométrique et Alpha pour la pâte d'argent nanométrique). Néanmoins, différents tests ont été menés afin d'établir des procédures adaptées aux substrats et aux puces utilisés au cours de nos études. La procédure générale d'assemblage se déroule en trois étapes. Dans un premier temps, la sérigraphie de la pâte d'argent sur le substrat avec un clinquant ou un écran de sérigraphie. Suivi de l'étape de déliantage qui, à moyenne température ($< 150^{\circ}\text{C}$), permet l'élimination des différents solvants présents dans la pâte d'argent. La dernière étape est le frittage sous pression à basse température (figure 2.1).

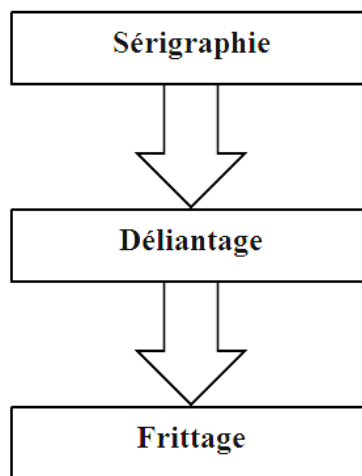


Figure 2.1 : Représentation schématique des différentes étapes permettant l'obtention d'un assemblage fritté

La sérigraphie est une technique ancienne de report de motif (imprimerie) sur un substrat. Elle est largement utilisée dans l'industrie car elle permet le dépôt de pâte/crème sur de faible surface. Le principe de la sérigraphie est le suivant. Le modèle à imprimer est reporté sur un écran poreux qui sert de négatif de l'image à « imprimer ». L'encre passe entre les ouvertures de l'écran et imprime l'image voulue sur le substrat. La figure 2.2 représente de façon simplifiée le principe de la sérigraphie. Le dessin (C) est reporté sur l'ensemble grille (D) -

cadre (E). Cet ensemble est ensuite placé au-dessus du substrat puis plaqué contre celui-ci. L'encre (A) est déposée sur un bord de la grille afin que le tampon (B) puisse l'appliquer sur la surface du dessin et reporter le motif sur le substrat (F). Cette technique est très utilisée dans le cadre de report de puces de puissance sur substrat en électronique (104) (121).

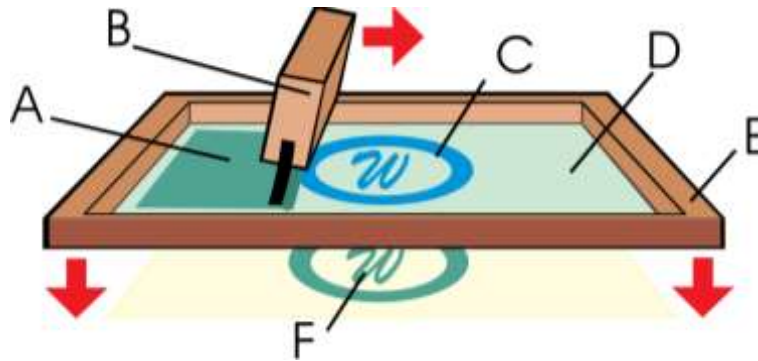


Figure 2.2 : Représentation schématique du principe de la sérigraphie

La sérigraphie permet d'obtenir des dépôts d'argent reproductibles et d'épaisseurs fixes. Pour nos travaux, nous disposons de deux écrans métalliques appelés clinquants de 100 μm d'épaisseur (épaisseur recommandée par les fabricants de pâtes d'argent) avec différentes surfaces d'ouvertures afin de pouvoir sérigraphier une large gamme de puces semi-conductrices (figure 2.3). Le dépôt de la pâte d'argent se fait manuellement à l'aide d'une raclette. Différents tests de reproductibilité de cette méthode pour le report de pâte d'argent ont été effectués par mesures de l'épaisseur du dépôt en utilisant un profilomètre.



Figure 2.3 : Clinquant de 100 μm permettant de sérigraphier la pâte d'argent sur les substrats pour différentes tailles de puces semi-conductrices

Le déliantage et le frittage nécessitent le maintien en température de l'assemblage ainsi qu'une mise en pression de l'assemblage pour le frittage. Pour cela, une presse Instron 5967 de capacité 30 kN équipée de plateaux chauffants a été utilisée (figure 2.4). Les plateaux

chauffants sont indépendants l'un de l'autre et permettent d'atteindre une température de 300°C en surface. Les températures des plateaux chauffant sont contrôlées par des capteurs implantés dans le boîtier électrique de commande. Le pilotage de la pression appliquée lors du frittage se fait via un logiciel fourni avec la presse et permet de contrôler le déroulement exact du procédé (suivi des différents paramètres de frittage (temps et pression)).

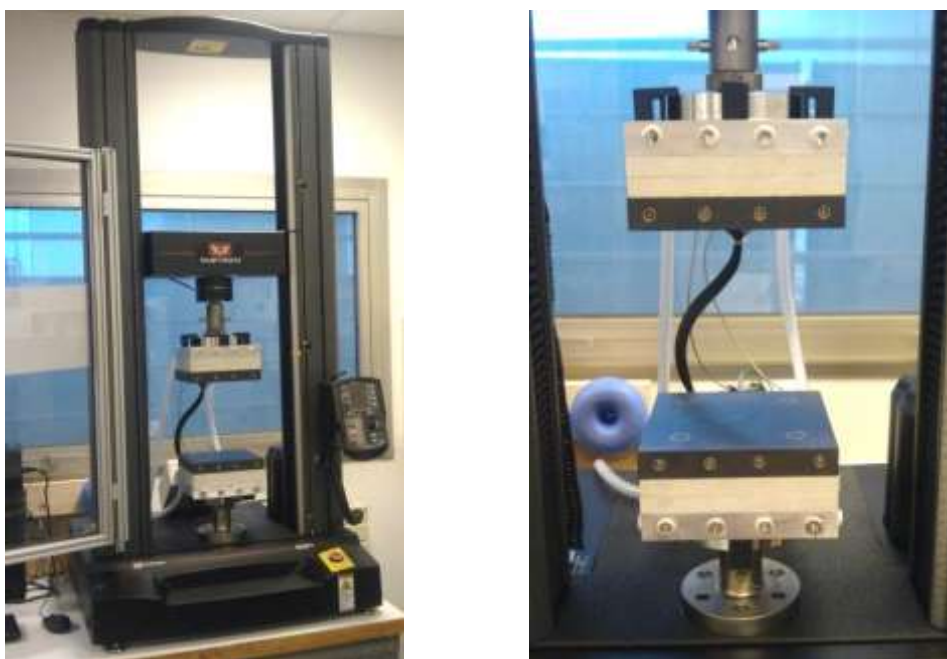


Figure 2.4 : Presse Instron équipée de plateaux chauffants

2.2.2. Procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent micrométrique

Dans un premier temps, nous avons effectué les essais sur les pâtes d'argent micrométriques (taille moyenne des particules entre 10 et 20 μm) fournies par Heraeus. Elles ont été développées spécialement pour le frittage de pâte d'argent sous pression. Ces pâtes d'argent sont caractérisées par une excellente faculté à être sérigraphiée et contiennent environ 83% d'argent, les 17% restant étant des solvants permettant la stabilité de la pâte à température ambiante et s'évaporant lors de l'étape du déliantage. Nous avons eu à notre disposition trois pâtes d'argent : LTS 023-35P2, LTS 043-04P2 et LTS 043-06P2 qui sont issues de la première génération de pâte d'argent fabriquées par Heraeus (figure 2.5). Les trois pâtes d'argent ont été développées pour être employées avec le même procédé d'assemblage. Elles sont différenciées par les types de solvants permettant la stabilité de la pâte et le type de poudre d'argent (tailles des particules). La pâte d'argent est sérigraphiée avec un clinquant de 100 μm d'épaisseur sur un substrat ayant une métallisation compatible

avec le frittage d'argent (or, cuivre ou argent typiquement). Le substrat est ensuite déposé sur une zone chauffée à 150°C durant 15 minutes afin d'effectuer le déliantage de la pâte d'argent. Les puces sont ensuite placées sur la zone sérigraphiée du substrat. L'assemblage est posé entre les plateaux chauffants de la presse et l'assemblage est fritté à 240°C sous 10 MPa de pression en 3 minutes. L'assemblage, une fois fritté, est retiré des plateaux chauffants afin qu'il refroidisse naturellement jusqu'à température ambiante.

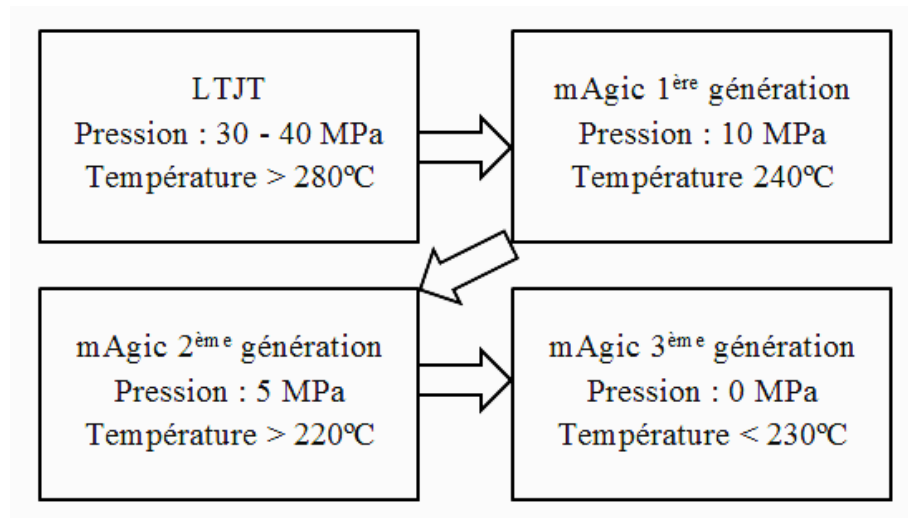


Figure 2.5 : Différentes générations de pâte d'argent conçues par Heraeus - Evolution de la pression appliquée au cours du frittage d'assemblage

Dans le cadre d'une seconde étude (cf. 2.3.3), nous allons étudier l'influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la tenue thermomécanique (une pâte d'argent micrométrique et une nanométrique). C'est pourquoi, en plus de développer une procédure adaptée à nos composants, cette étude va donc nous permettre de sélectionner l'une des trois pâtes d'argent micrométrique. Le but est d'avoir une quantité suffisante de pâte d'argent pour la suite des travaux tout en respectant les contraintes budgétaires. En effet, le coût des pâtes d'argent est relativement élevé compte-tenu du prix du lingot de 1 Kg d'argent (507 euros au 7 Octobre 2013 (122)). Nous avons donc réalisé une série de tests de la tenue en cisaillement sur les trois pâtes à notre disposition. En utilisant la procédure détaillée ci-dessus, nous avons réalisé deux types de véhicules de tests (deux fois cinq échantillons par pâte d'argent). Des diodes en silicium de 2 x 4 mm² (face arrière en argent) ont été reportées sur deux types de substrat DBC : le premier avec une métallisation en cuivre et le second en argent (figure 2.6)

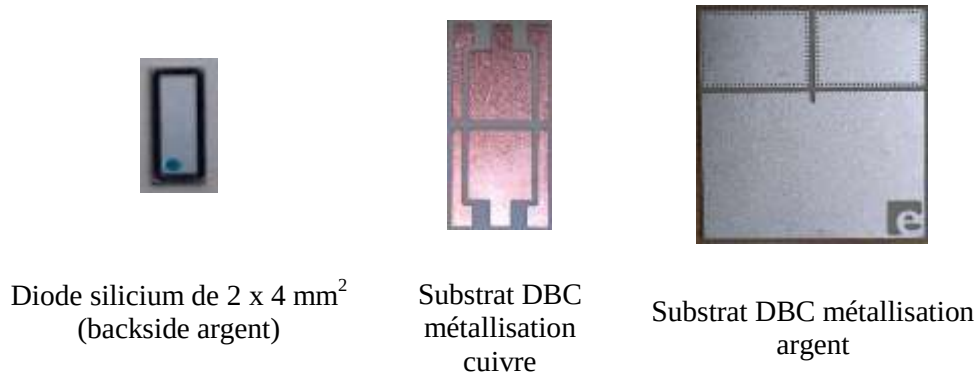


Figure 2.6 : Composants utilisés pour réaliser les véhicules de tests afin de caractériser la tenue en cisaillement de trois pâtes d'argent micrométrique

Le banc de mesure de la tenue mécanique en cisaillement permet de caractériser qualitativement l'attache frittée des assemblages (figure 2.7). Afin d'obtenir une moyenne représentative, cinq véhicules de tests seront caractérisés par type d'assemblages. Pour effectuer ces mesures, nous disposons d'un équipement de traction/cisaillement Dage série 4000 équipé d'un capteur de force maximale de 100 Kg. La hauteur de cisaillement doit être supérieure à l'épaisseur de la couche d'argent frittée. Afin de déterminer cette dernière, des mesures d'épaisseur à l'aide d'un profilomètre Altisurf 500 ont été réalisées. Différentes mesures ont été effectuées sur les assemblages présentés ci-dessus et nous aboutissons à une épaisseur de 30 μm en moyenne pour la couche d'argent frittée (épaisseur cohérente par rapport aux données du fabricant).



Figure 2.7 : Dage série 4000

Suite à ces mesures d'épaisseur, nous avons pu effectuer les mesures de tenue en cisaillement sur les véhicules de tests frittés. Les figures 2.8 et 2.9 présentent les mesures ainsi que l'écart type dans le but de pouvoir sélectionner une pâte d'argent parmi les trois étudiées. La tenue mécanique est deux fois plus élevée pour la métallisation argent que pour la métallisation cuivre. Ceci s'explique par l'échange possible de particules par diffusion entre la métallisation argent du substrat et de la puce et la couche d'argent. Ce phénomène qui a pour effet de renforcer la tenue mécanique de l'attache, est également observable pour des substrats métallisation or. Pour la métallisation cuivre, la tenue en cisaillement ainsi que l'écart type sont très proches pour les différentes pâtes d'argent, aucune différence majeure ne ressort de ces mesures. Le choix a donc été fait par rapport aux substrats ayant une métallisation argent. En effet, comme le montre la figure 2.9, les écarts sont plus importants et la pâte LTS 043-04P2 présente à la fois la tenue en cisaillement la plus élevée et l'écart type le plus faible par rapport aux deux autres pâtes (LTS 023-35P2 et LTS 043-06P2). Pour la suite des travaux, la pâte LTS 043-04P2 a donc été choisie pour être utilisée afin de réaliser les différents véhicules de tests.

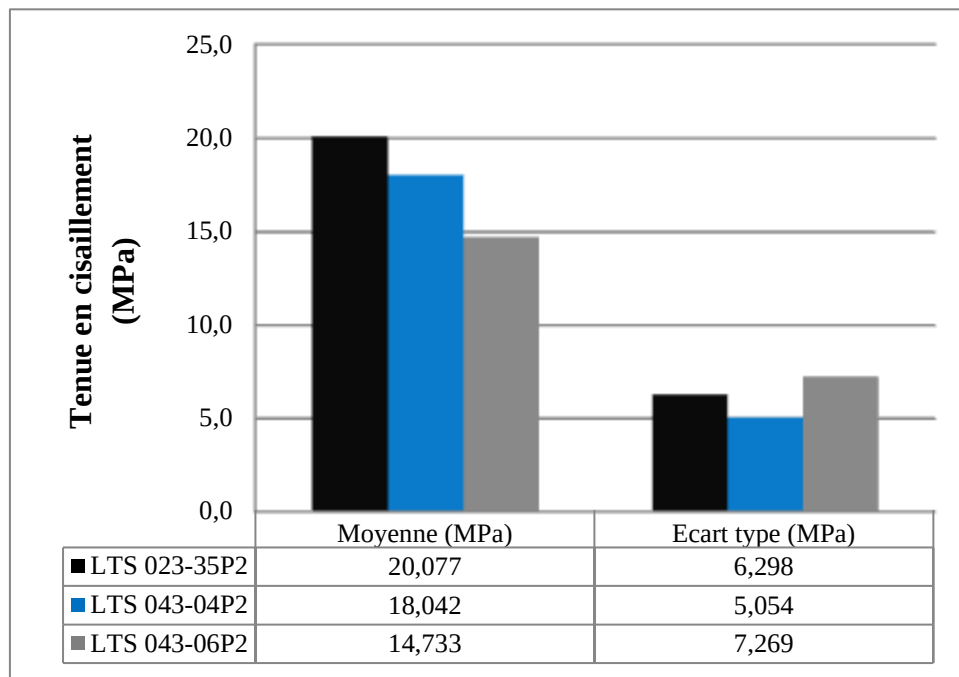


Figure 2.8 : Tenue en cisaillement (gauche) et écart type (droite) pour des puces de 2 x 4 mm² reportées sur substrat DBC métallisation cuivre

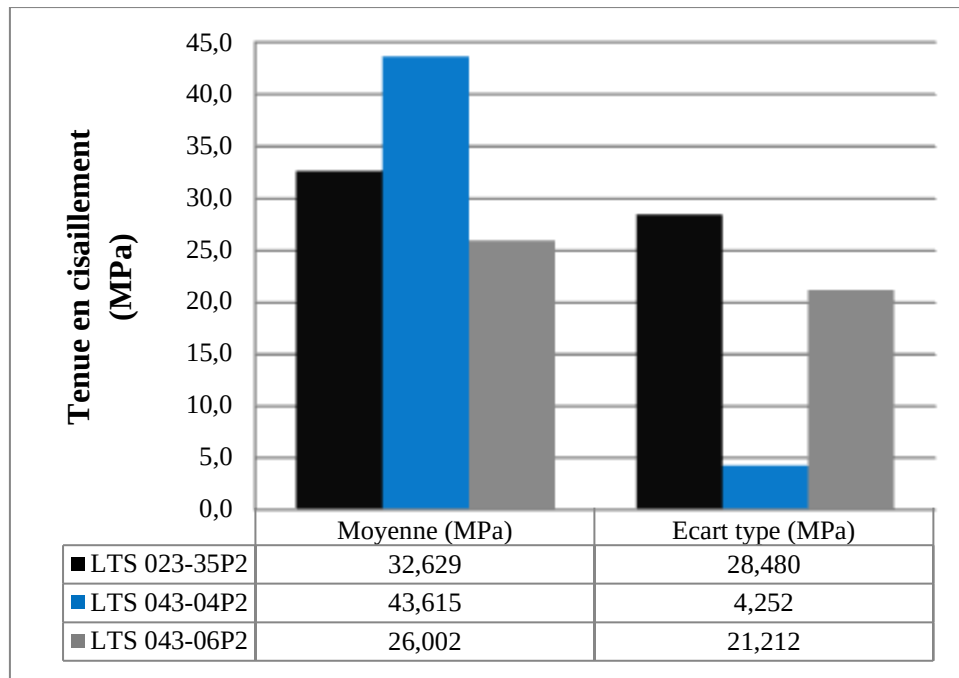


Figure 2.9 : Tenue en cisaillement (gauche) et écart type (droite) pour des puces de 2 x 4 mm² reportées sur substrat DBC métallisation argent

2.2.3. Procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent nanométrique

Le diamètre des particules d'argent influe sur les mécanismes de frittage (cf. 1.4.1.4.), d'où l'intérêt d'utiliser le frittage de pâte d'argent nanométrique comme alternative au frittage de pâte d'argent micrométrique. Différents acteurs sont présents sur le marché. Les pâtes d'argent produites par NBETech via l'université de Virginia ont été l'objet de nombreuses publications dans différentes conférences et journaux scientifiques. C'est l'une des raisons qui nous a amené à nous intéresser à un autre fabricant. Alpha propose une large gamme de pâte d'argent nanométrique permettant d'assembler les composants de puissance, les composants discrets ou encore les LED. Dans le cadre de nos travaux, nous avons réalisé les différents assemblages avec trois produits qu'Alpha propose : la pâte d'argent Argomax® 2020 spécifique aux métallisations or et argent, la pâte d'argent Argomax® 4020 spécifique à la métallisation cuivre et le film d'argent Argomax® 8000 permettant un procédé plus rapide (étape de déliantage non nécessaire).

Les pâtes d'argent Argomax® 2020 et 4020 suivent une procédure en trois étapes alors que la procédure avec le film d'argent Argomax® 8000 permet de réaliser des assemblages en deux étapes uniquement. Suite à la sérigraphie de 100 µm de pâte d'argent (Argomax® 2020 ou Argomax® 4020) avec un clinquant, le déliantage à 130°C pendant 30 minutes permet d'éliminer les solvants contenus dans la pâte d'argent. Ensuite, le frittage à 250°C

sous 10 MPa de pression pendant une minute permet d'obtenir un assemblage fritté avec une couche d'argent de 25 μm d'épaisseur. La procédure d'assemblage avec le film d'argent est différente. En effet, un déliantage n'est pas nécessaire (absence de solvants, l'argent est sous la forme d'un film comparable aux préformes de brasure) et est remplacé par une étape appelée *stamping*. Cette étape se déroulant à 130°C sous 1 MPa en une minute permet l'accroche du film d'argent sur les faces inférieures des puces semi-conductrices ou sur celle d'un wafer entier. L'étape du frittage se déroule dans les mêmes conditions que pour les pâtes d'argent (250°C, 10 MPa et 1 minute). L'utilisation du film d'argent permet une automatisation du procédé complet avec une machine de pick&place adaptée.

Comme pour la pâte d'argent micrométrique, différents tests ont été effectués dans le but d'établir un procédé d'assemblage adapté à nos composants. Ces tests ont été effectués sur la pâte d'argent Argomax® 2020. Des substrats DBC métallisation or de 1'' x 2'' et des diodes de 3x3 mm² ont été assemblés en faisant varier le temps, la température et la pression de frittage (sérigraphie de 100 μm et déliantage à 130°C en 30 minutes). Deux séries de tests mécaniques ont été effectuées, la première est centrée sur l'influence de la température (200°C, 250°C et 300°C) et du temps de frittage (15 et 60 secondes) (figure 2.10) et la seconde sur l'influence du temps (15, 30, 60 et 100 secondes) et de la pression de frittage (5 et 10 MPa) (figure 2.11).

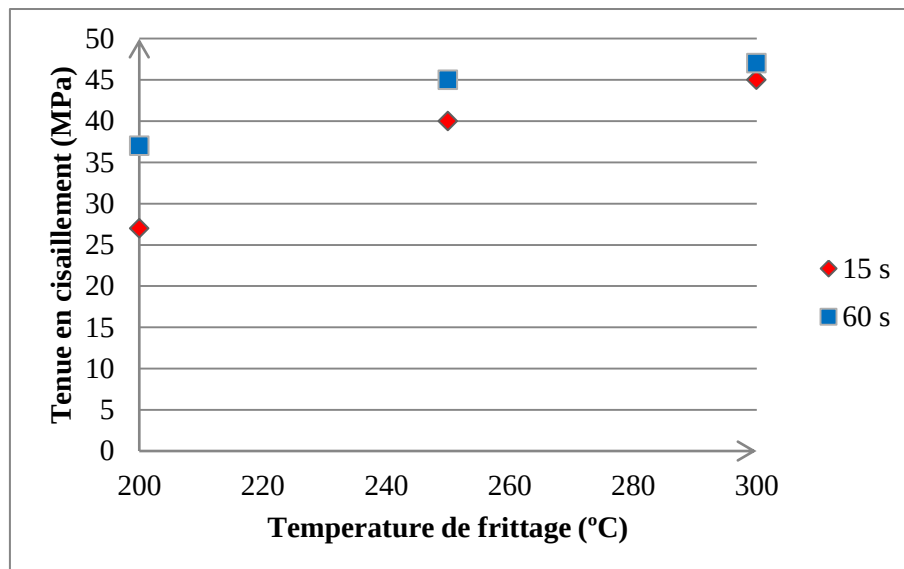


Figure 2.10 : Évolution de la tenue en cisaillement en fonction de la température de frittage pour deux temps de frittage pour des assemblages de puces de 3 x 3 mm² sur substrat DBC or frittés sous 10 MPa de pression

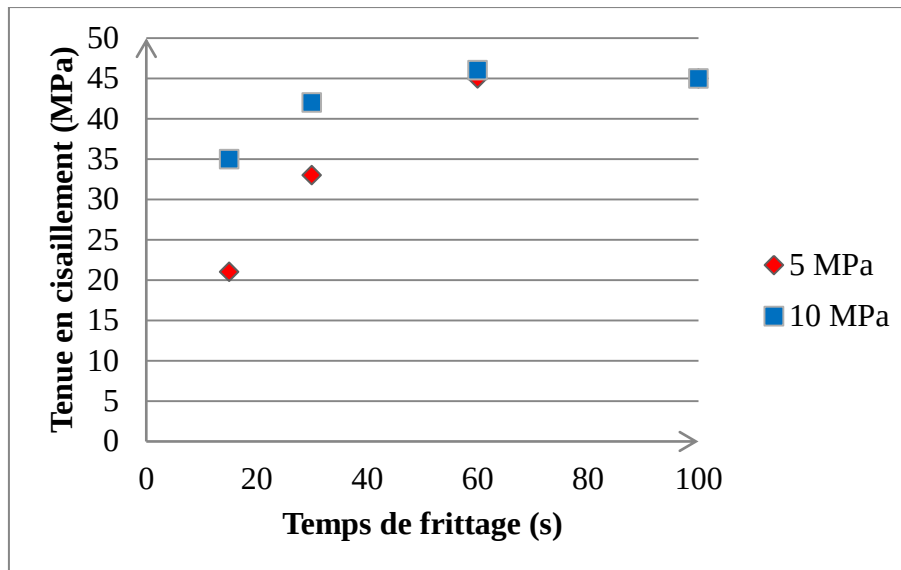


Figure 2.11 : Evolution de la tenue en cisaillement en fonction du temps et de la pression de frittage pour des assemblages de puces 3 x 3 mm² sur substrat DBC or frittés à 250°C

Augmenter la température de frittage de 250°C à 300°C n'apporte que peu de gain en termes de tenue mécanique de l'assemblage (figure 2.10). D'autant plus qu'une température plus élevée conduira à une plus grande densité de contraintes résiduelles dans les matériaux de l'assemblage du fait des différences de CTE. Le premier test montre également qu'une diminution du temps de frittage est possible (15 secondes) mais ce phénomène est limité pour des puces de grandes tailles (>100 mm²). En effet, plus la surface à fritter est grande, plus le temps de frittage doit être long (phénomène connu pour certaines pâtes d'argent nanométrique (2)). C'est la raison qui a amené Alpha à choisir un temps de frittage de 60 secondes afin d'avoir un procédé unique pour tous types de surface de puce et non plusieurs procédés d'assemblage (102). Cet aspect se retrouve également sur la seconde série de tests où l'on observe également que la pression joue un rôle important. En effet, une pression de 10 MPa permet d'obtenir des tenues en cisaillement plus élevées qu'une pression de 5 MPa appliquée lors du frittage. Dans la suite de nos travaux, nous avons utilisé le procédé d'assemblage développé spécifiquement pour la pâte d'argent Argomax® 2020 : sérigraphie de 100 µm, déliantage à 130°C en 30 minutes et frittage à 250°C, 10 MPa en une minute.

2.2.4. Conclusion sur les procédés d'assemblages par frittage de pâte d'argent

Les différentes expérimentations préliminaires réalisées sur les pâtes d'argent micrométrique (Heraeus) et nanométrique (Alpha), nous ont permis de bien prendre en main la technologie d'assemblage par frittage de pâte d'argent au laboratoire IMS. Dans la suite des travaux nous utiliserons les procédés d'assemblage définis par les fabricants et adaptés

aux substrats et puces à notre disposition qui assurent une excellente tenue mécanique des assemblages frittés. Deux études seront présentées dans les parties suivantes, la première s'intéresse à l'influence de la métallisation du substrat sur la robustesse de l'assemblage soumis à un vieillissement accéléré. La seconde étudie l'influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la durée de vie des assemblages soumis à un vieillissement accéléré. Le but final étant d'évaluer la durée de vie des assemblages frittés en s'appuyant sur les modélisations par éléments finis décrites dans le chapitre 3.

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

2.3.1. Introduction

La fiabilité des modules de puissance est l'un des facteurs majeurs qui oriente le choix des technologies et des matériaux utilisés pour la fabrication d'assemblages de puissance. Dans ce but, des essais de vieillissements accélérés sont nécessaires afin de déterminer la fiabilité des modules de puissance. Ils sont couplés avec un suivi de l'évolution de paramètres caractéristiques des assemblages de puissance tel que la résistance thermique, la tenue mécanique en cisaillement ou les caractéristiques électriques. Ces essais de vieillissement accélérés permettent d'observer l'apparition de défaillances dues à l'accumulation de contraintes dans les assemblages plus rapidement qu'en fonctionnement réel. Couplée à des modélisations par éléments finis (Ansys), une estimation de la durée de vie des assemblages de puissance peut être définie par le biais d'une méthodologie précise et détaillée dans le chapitre 3. Une étude expérimentale et une étude de modélisation par éléments finis sont donc nécessaires afin de définir le comportement thermomécanique des assemblages frittés.

Les vieillissements accélérés sont classés en deux grandes catégories : vieillissement actif (vieillissement électrique du composant) et vieillissement passif (vieillissement thermique entre deux températures de l'assemblage). Cette dernière technique a été utilisée pour les études de fiabilité réalisées au cours de nos différents travaux. Plusieurs types d'enceintes de vieillissement existent : variations rapides de température (une enceinte thermique permet la variation de température selon un profil de température défini), type choc (une enceinte thermique dispose de deux chambres chacune à une température et une nacelle déplace

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

rapidement les véhicules de tests d'une chambre à l'autre à des instants définis). L'atmosphère dans l'enceinte climatique joue un rôle important qu'elle soit composée d'air ou de liquide. Dans le cadre du projet FIDEA auquel une partie de ces travaux de thèse est rattachée, l'objectif est de caractériser la fiabilité des modules de puissance pour l'automobile. Dans cette optique, nous avons choisi -40°C et $+125^{\circ}\text{C}$, de réaliser les essais avec une enceinte permettant un vieillissement de type chocs avec des paliers de 30 minutes (ce type de vieillissement étant le plus utilisé dans le cadre d'essais de fiabilité pour l'automobile) (figure 2.12). Deux études sur la fiabilité d'assemblages de puissance frittés et brasés ont été réalisées dans le but d'évaluer la technologie de frittage de pâte d'argent vis-à-vis des technologies utilisées actuellement.

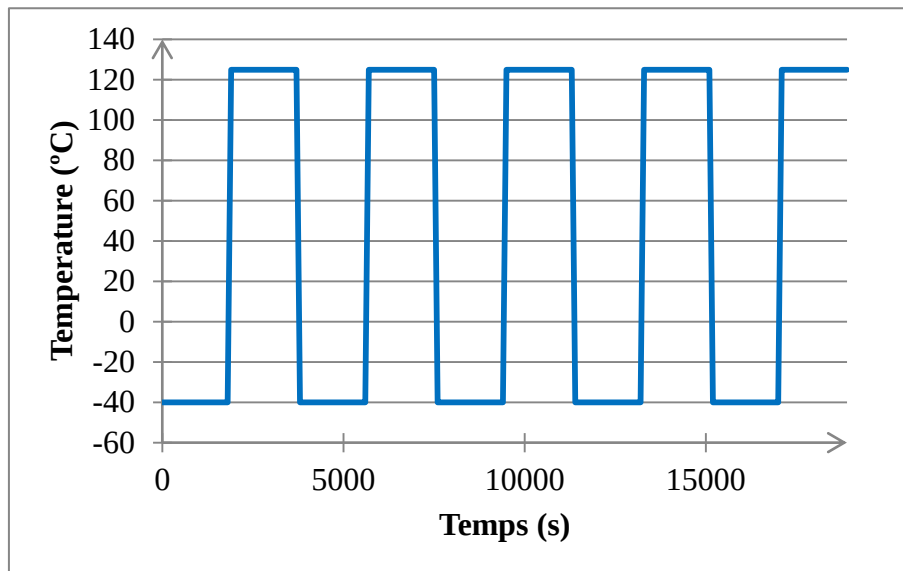


Figure 2.12 : Profil de température de vieillissement passif de type choc entre -40°C et $+125^{\circ}\text{C}$ - cinq cycles sont représentés

2.3.2. Influence de la métallisation du substrat sur la tenue thermomécanique

2.3.2.1. Introduction

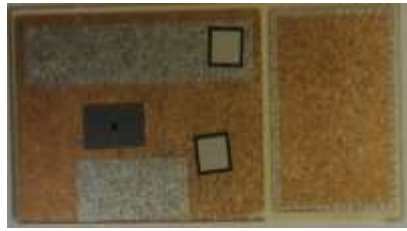
Dans les parties précédentes de ce chapitre, nous avons pu observer l'influence des paramètres du procédé de frittage sur la tenue mécanique de l'assemblage (temps, pression, température de frittage et diamètre des particules des pâtes d'argent) et ainsi définir des procédés d'assemblage adaptés aux composants utilisés au cours de ces travaux. Il a été montré que d'autres paramètres peuvent influencer sur la tenue mécanique mais aussi thermique et thermomécanique des assemblages de puissance : la rugosité du substrat, les conditions opératoires, la métallisation du substrat et des puces etc. Cette première étude s'intéresse

donc à l'influence de la métallisation du substrat sur la tenue thermomécanique d'assemblages frittés avec deux pâtes d'argent nanométriques (Argomax® 2020 et 4020) suivant le procédé d'assemblage présenté dans la partie précédente (cf. 2.2.3).

2.3.2.2. Véhicules de tests

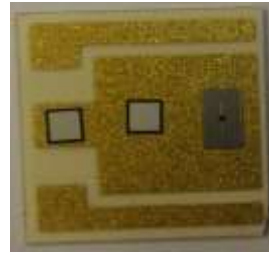
Pour cette étude, la première étape a été de réaliser des véhicules de tests en utilisant le procédé développé pour les pâtes d'argent nanométrique (Argomax® 2020 et 4020). Quatre séries de véhicules de tests ont été assemblées par la société Alpha (fabricant des pâtes d'argent nanométrique). Chaque série se différencie par le type de métallisation du substrat (or, cuivre, argent et argent/cuivre sélectif) sur lesquels ont été reportés deux types de puces semi-conductrices (des diodes et des TrenchFET) (figure 2.13). La pâte d'argent Argomax® 2020 (substrats métallisations argent et or) et la pâte d'argent Argomax® 4020 (substrats métallisation cuivre) ont été utilisées afin de réaliser les assemblages avec la procédure suivante : sérigraphie de 100 μm avec un clinquant, déliantage à 130°C en 30 minutes et frittage à 250°C sous une pression de 10 MPa en 1 minute. Des essais de cisaillement ont ensuite été effectués sur les TrenchFET et la moitié des diodes (une diode par substrat) pour évaluer l'influence de la métallisation sur la tenue mécanique des assemblages. Les véhicules de tests ont ensuite été vieillis (-40°C / +125°C, chocs, 30 minutes à chaque palier de température) et des mesures de la résistance thermique ont été effectuées tous les 200 cycles.

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré



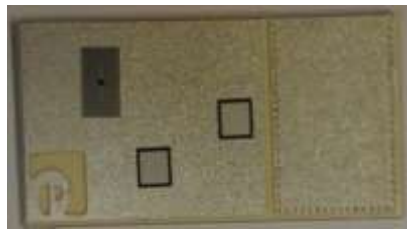
6 DBC Cu/Ag sélectif
2 Diodes Si 3,8 x 3,8 mm²
1 TrenchFET 4 x 7 mm²

Pâte d'argent Argomax® 2020 et 4020

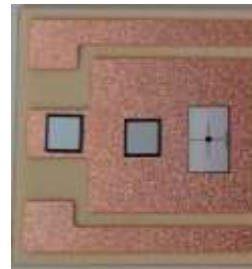


6 DBC Cu/Ni/Au
2 Diodes Si 3,8 x 3,8 mm²
1 TrenchFET 4 x 7 mm²

Pâte d'argent Argomax® 2020



6 DBC Cu/Ag
2 Diodes Si 3,8 x 3,8 mm²
1 TrenchFET 4 x 7 mm²
Pâte d'argent Argomax® 2020



6 DBC Cu
2 Diodes Si 3,8 x 3,8 mm²
1 TrenchFET 4 x 7 mm²
Pâte d'argent Argomax® 4020

Figure 2.13 : Différents véhicules de tests assemblés par frittage de pâte d'argent nanométrique en vue d'étudier l'influence de la métallisation en vieillissement accéléré

2.3.2.3. Influence de la métallisation sur la tenue en cisaillement avant vieillissement passif

Le nombre de véhicules de tests réalisés pour cette étude étant de six par type de métallisation, la tenue en cisaillement des assemblages n'a pu être testée qu'avant vieillissement. Les paramètres de mesures ont été les mêmes que ceux utilisés dans la partie 2.2.2 afin de pouvoir comparer les pâtes d'argent micrométrique et nanométrique. L'objectif est de caractériser la tenue mécanique de cinq diodes et cinq TrenchFET par types de substrat. La limite du capteur (100 kg) de la machine de cisaillement (Dage 4000) n'a pas permis d'aboutir à l'arrachement des puces TrenchFET compte-tenu de leur grande surface et d'une tenue en cisaillement supérieure à la capacité de la machine. Les figures 2.14 et 2.15 détaillent uniquement les résultats pour les diodes (pour la métallisation cuivre/argent sélectif, seules les diodes reportées sur les parties métallisées argent ont été cisailées).

Comme pour les véhicules de tests réalisés avec la pâte d'argent micrométrique (cf. 2.2.2.), les résultats confirment que le procédé d'assemblage utilisé est reproductible. En effet, les écarts types des mesures de la tenue au cisaillement sont faibles (inférieur à 7 MPa pour des mesures de l'ordre de 35-40 MPa) (figure 2.15). La différence majeure avec les

mesures effectuées sur les pâtes d'argent micrométrique, est l'utilisation d'une pâte d'argent spécifique pour la métallisation cuivre. Cette différence permet d'obtenir une tenue en cisaillement d'environ 35 MPa pour les diodes reportées sur les substrats DBC métallisation cuivre alors qu'elle n'était que de 20MPa pour les assemblages réalisés les mêmes composants (substrats et puces) avec les pâtes d'argent micrométrique. Cette pâte d'argent spécifique pour des substrats métallisation cuivre permet d'obtenir des valeurs de cisaillement quasiment identiques quelle que soit la métallisation du substrat (figure 2.14). Nous n'observons donc qu'une influence minimale de la métallisation du substrat sur la tenue mécanique des assemblages contrairement à l'étude précédente (cf. 2.2.2.).

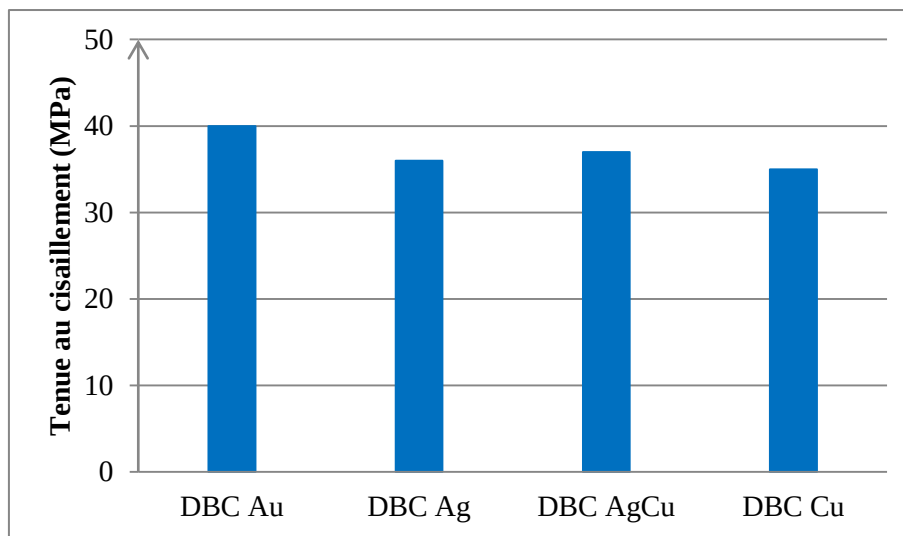


Figure 2.14 : Tenue mécanique en cisaillement des assemblages frittés selon le type de métallisation du substrat avant vieillissement accéléré (diodes $3,8 \times 3,8 \text{ mm}^2$)

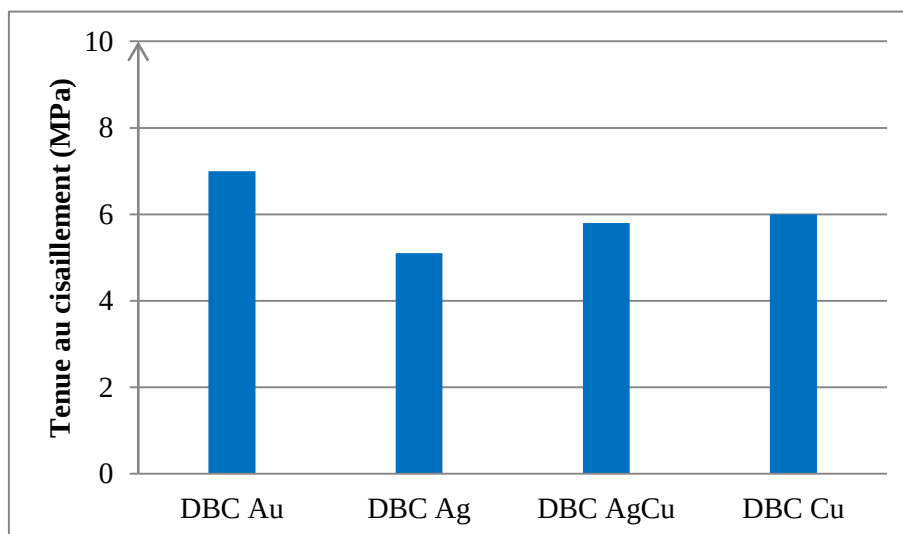


Figure 2.15 : Ecart type de la tenue mécanique en cisaillement des assemblages frittés selon le type de métallisation du substrat avant vieillissement accéléré (diodes $3,8 \times 3,8 \text{ mm}^2$)

2.3.2.4. Evolution de la résistance thermique des assemblages frittés au cours de vieillissement

La résistance thermique d'un corps est définie par la différence de température entre deux surfaces isothermes divisées par le flux de chaleur transitant de l'une vers l'autre. La totalité du flux de chaleur traversant la première surface doit traverser la seconde. Aucune accumulation ou génération de chaleur n'est possible afin d'obtenir la mesure de la résistance thermique exacte du matériau. Un flux de chaleur P (connu ou mesuré) traversant un matériau ou un ensemble de matériaux couplé à des relevés de températures T_j (température de jonction ou température moyenne de la puce) et T_a (température de référence) permet à l'aide de la formule (2.1) de déduire la résistance thermique recherchée (R_{thja} , résistance thermique jonction-ambiante entre les surfaces aux températures T_j et T_a).

$$R_{thja} = \frac{T_j - T_a}{P} \quad (2.1)$$

L'auto-échauffement provoqué par la chute de tension à l'état passant de la jonction P-N des composants électroniques (diodes, MOSFET, etc.) permet de mesurer la résistance thermique des assemblages de puissance. En effet, les caractéristiques électriques de la jonction P-N dépendent de la température par les équations (2.2) et (2.3).

$$V_d = \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_d}{I_s}\right) \quad (2.2)$$

$$I_d = I_s \cdot \left(e^{\frac{q.V_d}{k.T}} - 1\right) \quad (2.3)$$

Avec : V_d : Tension aux bornes de la jonction PN

I_d : Courant dans la jonction PN

I_s : Courant de saturation de la jonction PN

k : Constante de Boltzmann $k = 1,38.10^{-23}$ J/K

T : Température de la jonction PN

q : Charges des porteurs

Dans un premier temps, une calibration en température des paramètres électriques thermosensibles de la jonction est nécessaire afin ensuite de pouvoir déduire la température

de jonction en fonction d'une tension donnée et ainsi d'effectuer la mesure de la résistance thermique de l'assemblage par auto-échauffement de la puce semi-conductrice.

Le banc de mesure utilisé est un analyseur thermique (figure 2.16), il permet de caractériser la résistance et l'impédance thermique des assemblages de puissance. Cet appareil est associé à un générateur de puissance et à une boîte à eau. Afin de maintenir une température constante dans la boîte à eau, celle-ci est reliée à un cryostat qui dans notre étude assure une température constante de 25°C de l'eau. La température relevée à l'interface boîte à eau / assemblage définit la température T_a de la formule de la résistance thermique (2.1). Le banc de mesure comprend également une partie permettant d'effectuer la calibration. Un liquide inerte (Galden D02) est monté en température à l'aide d'une plaque chauffante. Ensuite lors du refroidissement, la calibration est effectuée et ainsi nous obtenons les variations de la tension de la jonction P-N en fonction de la température.



Figure 2.16 : Banc de mesure de la résistance thermique : banc de calibration (gauche), DeltaVbemètre Analysis Tech Phase 10 thermal analyzer (milieu) et boîte à eau régulé par un cryostat (droite)

Durant la phase de calibration, l'assemblage, placé dans un bain de galden inerte agité en permanence (figure 2.17), est relié au banc de test, qui mesure la tension de l'assemblage. Le banc de mesure polarise la jonction P-N à l'aide d'un faible courant de référence (1, 5 ou 10 mA). Ce courant doit être faible afin d'éviter un auto-échauffement parasite. Un thermocouple est placé au plus près de l'assemblage afin de relever les valeurs de température au cours de la mesure. Le bain inerte est chauffé jusqu'à 95°C à l'aide d'une

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

plaque chauffante puis la seconde phase de retour à la température ambiante commence. Cette étape est longue (environ 2 heures) compte-tenu de l'inertie du liquide, ce qui permet de faire l'hypothèse que la température du bain est la même que celle de la jonction à tout moment. La tension aux bornes de la jonction P-N est mesurée tous les 5°C pour obtenir la courbe température-tension de l'assemblage testé. Cet étalonnage permet d'obtenir la température en fonction d'une tension de la jonction lors de la mesure de la résistance thermique.

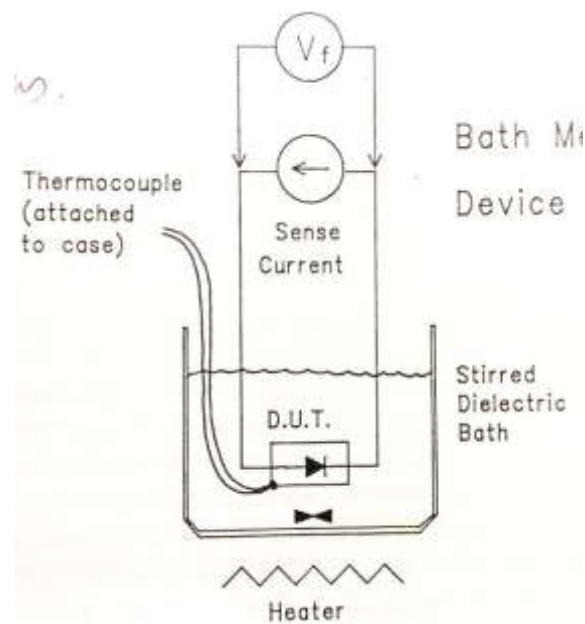


Figure 2.17 : Schéma de la calibration de la jonction d'un composant électrique

Après cette étape de calibration, l'assemblage est placé sur la boîte à eau et relié à l'analyseur thermique afin d'effectuer la mesure de résistance thermique. Un intercalaire thermique (Hi-flow ® 105 (123)) est placé entre la boîte à eau et l'assemblage. Une pression de 0,1 MPa est appliquée sur l'assemblage dans le but de favoriser le contact thermique et de minimiser la résistance thermique de contact. Un auto-échauffement de l'assemblage est provoqué en injectant une puissance donnée dans le composant. La mesure de résistance thermique nécessite la connaissance de la puissance injectée, de la température de référence et de la température de jonction. La température de référence est mesurée avec un thermocouple placé sous la puce semi-conductrice entre l'assemblage et la boîte à eau. La température de la jonction est obtenue par la mesure de la tension aux bornes de la jonction et grâce à la calibration. L'appareil déduit automatiquement la température de jonction et affiche la valeur de la résistance thermique mesurée pour cet assemblage.

Suite aux mesures de la tenue mécanique au cisaillement et aux mesures de la résistance thermique, les assemblages ont été placés dans l'enceinte climatique. Elle permet de réaliser le vieillissement passif de type chocs entre -40°C et $+125^{\circ}\text{C}$ avec des paliers de 30 minutes. Nous disposons d'une enceinte climatique Climats série CTr équipée de deux chambres thermiques permettant d'assurer la transition rapide entre les deux paliers de température (figure 2.18).



Figure 2.18 Enceinte climatique Climats série CTr équipée de deux chambres permettant de réaliser des essais de vieillissement passif de type choc

Nous avons donc choisi notre méthode de caractérisation de la fiabilité des véhicules de tests (vieillissement passif de type chocs) ainsi que le type de caractérisation utilisée (mesure de la résistance thermique). Il nous reste à déterminer le critère de défaillance qui permet de définir s'il y a apparition ou non de défaillances dans les véhicules de tests. Un critère de défaillance est un paramètre indicateur du vieillissement et doit être représentatif du type de défaillance rencontré en conditions réelles de fonctionnement. Une limite est définie et une fois celle-ci atteinte les composants sont considérés comme défaillants.

Le comportement thermique joue un rôle important en électronique de puissance, nous avons donc choisi de suivre l'évolution de la résistance thermique au cours du vieillissement. En effet, les matériaux constitutifs des assemblages de puissance sont thermosensibles et des variations de températures (cycle d'échauffement et de refroidissement en fonctionnement) activent les phénomènes de dilatation ou de rétractation. Ces phénomènes quantifiés par les

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

CTE des matériaux sont la cause de la création de contraintes thermomécaniques dans les assemblages (tableau 2.1). Ces contraintes génèrent ou amplifient des défauts existants (fissures, délaminage, etc. cf. 1.5) qui rendent la diffusion thermique moins aisée au sein de l'assemblage. Dans notre étude, nous avons défini la limite du critère de défaillance à une augmentation de 20% de la résistance thermique mesurée avant vieillissement. Une telle augmentation de la résistance thermique correspond au déclenchement du phénomène cumulatif d'auto-échauffement pour une puce en fonctionnement (plus la résistance thermique augmente et plus il y a de fissures qui se forment dues aux contraintes thermomécaniques et plus la résistance thermique augmente).

Tableau 2.1 : Comparaison entre les CTE des différents matériaux constitutifs des assemblages de puissance

Matériau	alumine	cuivre	argent	silicium
CTE ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8,1	16,5	19,6	2,8

Les conditions expérimentales et le critère de défaillance étant définis, nous avons pu effectuer les vieillissements accélérés des véhicules de tests (figure 2.12) et suivre l'évolution de la dissipation thermique avec les mesures de résistance thermique tous les 200 cycles (figures 2.19, 2.20, 2.21 et 2.22). Les valeurs moyennes, l'écart type et le critère de défaillance sont représentés sur chaque courbe afin d'avoir une vue complète de l'évolution de la résistance thermique. L'erreur de mesure est calculée à partir de la formule suivante (2.4). La précision des thermocouples est considérée à $\pm 1^{\circ}\text{C}$, T_j et T_a sont les températures mesurées. Ce qui nous permet d'obtenir une erreur de mesures comprise entre 4% et 5%.

$$\text{Erreur (\%)} = \frac{\pm 1}{T_j - T_a} \times 100 \quad (2.4)$$

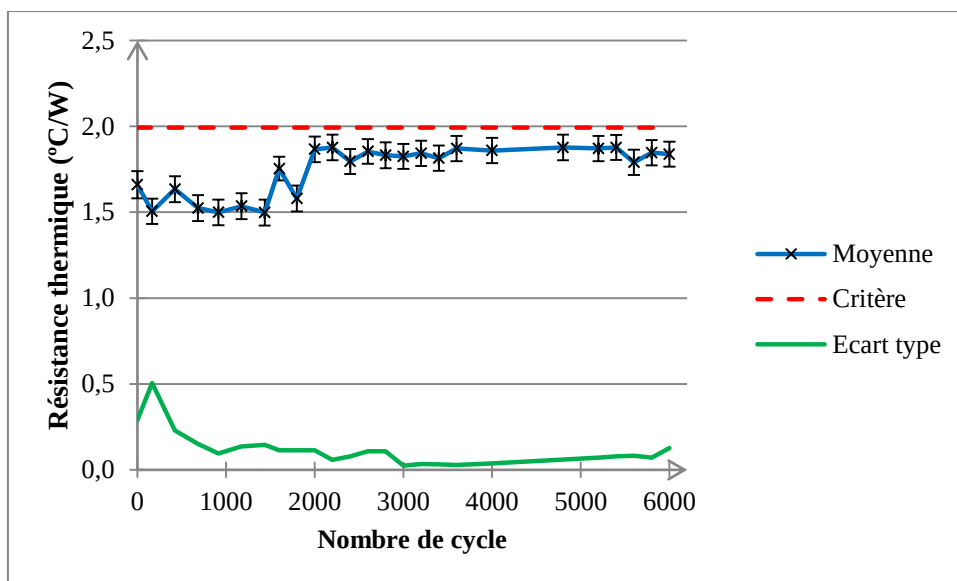


Figure 2.19 : Evolution de la résistance thermique pour la métallisation cuivre en fonction du vieillissement

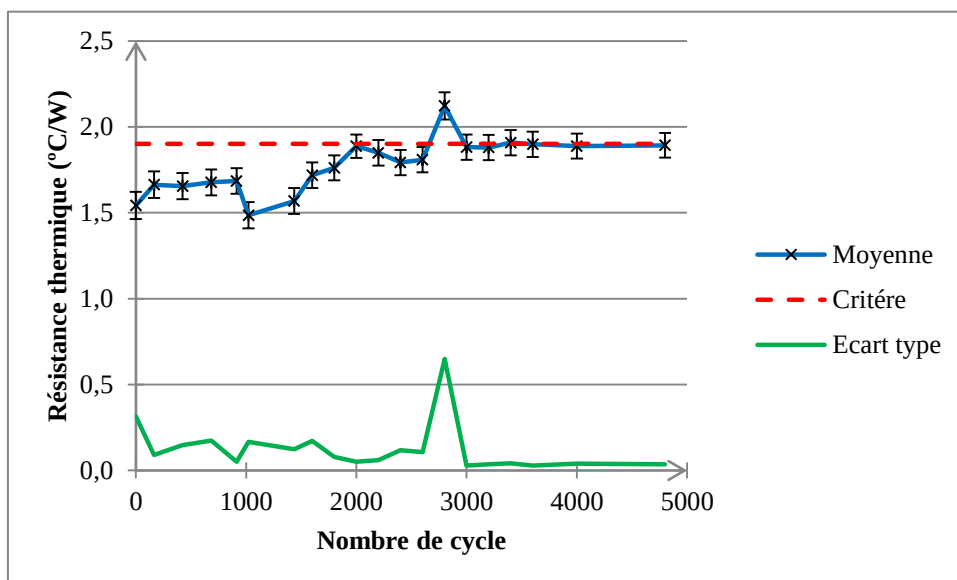


Figure 2.20 : Evolution de la résistance thermique pour la métallisation cuivre/argent sélectif en fonction du vieillissement

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

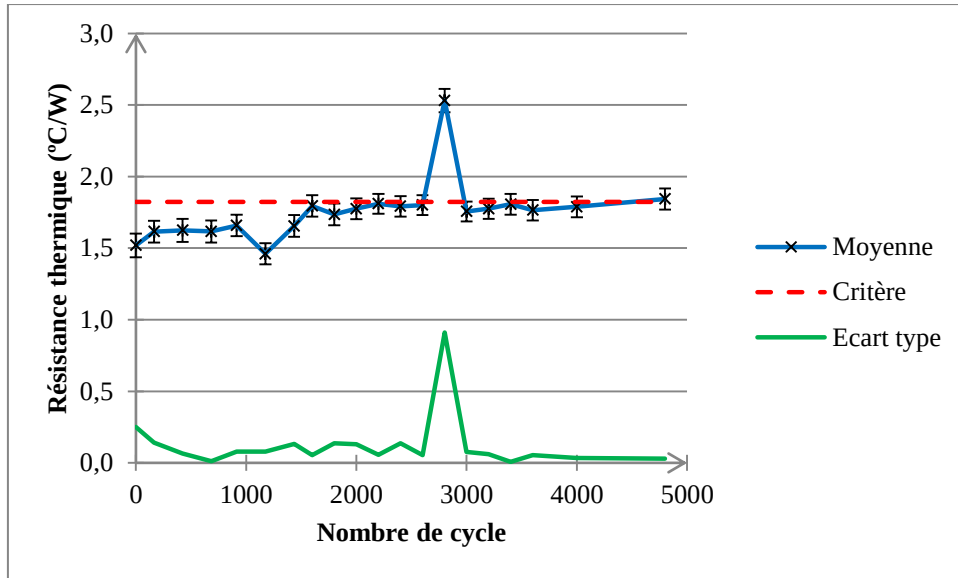


Figure 2.21 : Evolution de la résistance thermique pour la métallisation argent en fonction du vieillissement

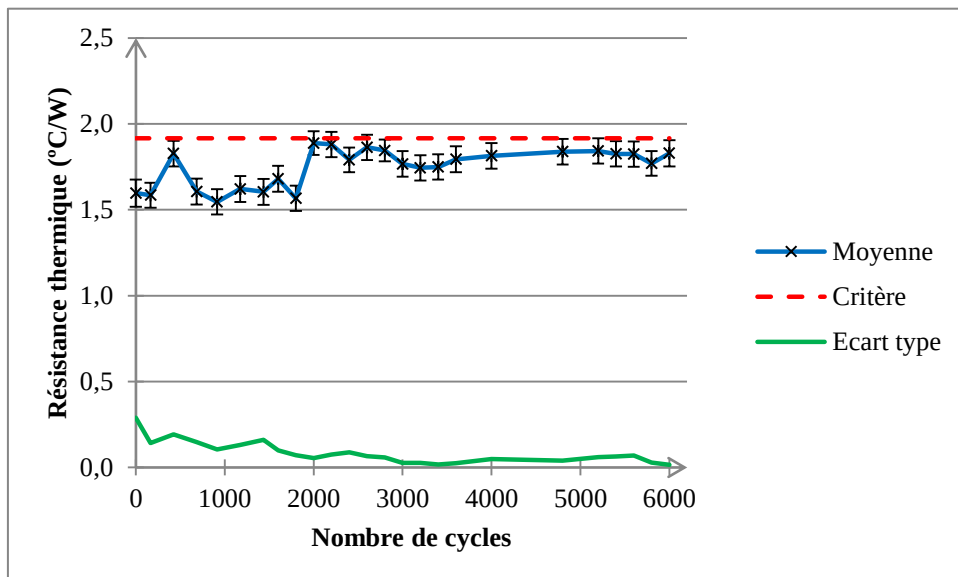


Figure 2.22 : Evolution de la résistance thermique pour la métallisation or en fonction du vieillissement

Nous observons des comportements identiques pour les substrats au design identique : DBC Au / DBC Cu et DBC Ag / DBC AgCu sélectif. Les substrats DBC Ag et CuAg sélectif ayant été découpés en deux à la scie diamantée (dans le but de pouvoir réaliser davantage de véhicules de tests), présentent visuellement des fissures dans la céramique et des délaminages de la métallisation (figure 2.23). Il en a résulté une augmentation brutale de la résistance thermique (pics des courbes de la R_{th} à 2800 cycles sur les figures 2.20 et 2.21). Trois véhicules de tests pour les substrats métallisation Ag et deux pour les substrats métallisation CuAg sélectif ont été retirés et les autres (non défaillants) ont été remis en vieillissement. Les

véhicules de tests métallisation Ag et CuAg sélectif restant ont ensuite été vieillis jusqu'à 5200 cycles avant l'apparition de défaillances du même type, qui ont conduit à l'arrêt du vieillissement de ces véhicules de tests.

Les véhicules de tests avec métallisation or et cuivre ont pu être vieillis pendant 6000 cycles sans que la résistance thermique des assemblages ne dépasse le critère de défaillance (figures 2.19 et 2.22). Néanmoins, les vieillissements accélérés ont été stoppés à ce stade afin d'effectuer les analyses optiques de la structure des assemblages et plus particulièrement de la zone proche de la couche d'argent frittée.

Les courbes représentant l'évolution de l'écart type entre les différents véhicules de tests montrent une réduction de celui-ci jusqu'à 1000 cycles pour ensuite se stabiliser. La durée du frittage étant courte (de une à trois minutes), la densification de la couche d'argent peut-être incomplète et à des stades différents pour les assemblages frittés. Au cours du vieillissement, celle-ci est de nouveau activée et les couches d'argent des assemblages se densifient. De plus, on observe une homogénéisation entre les différents assemblages d'où la réduction de l'écart type sur les mesures. Ces informations nous ont été confirmées par les fabricants de pâtes d'argent (Alpha et Heraeus).



Figure 2.23 : Exemples de défaillances dans des assemblages de puissance (substrat DBC CuAg sélectif – fissuration de la céramique après 2800 cycles et délaminage de la métallisation après 2800 cycles

2.3.2.5. Analyses optiques des véhicules de tests après vieillissement accéléré

Les véhicules de tests ont été analysés optiquement après les vieillissements accélérés. Des micro-sections ont été réalisées sur un assemblage par type de métallisation. Une analyse optique a été réalisée avant vieillissement dans le but d'étudier la structure des assemblages frittés. Un assemblage DBC Au / diode a été enrobé en utilisant une résine à froid Struers, découpé à la scie diamantée et poli avec différents draps de polissage Struers. Ces étapes de préparation des échantillons en vue d'étudier la structure des assemblages ont été utilisées de façon identique pour tous les assemblages.

Les assemblages frittés étudiés avant vieillissement ont permis d'observer une couche d'argent dense et uniforme ne présentant pas de lacune ou de fissure (figure 2.24). L'épaisseur moyenne de la couche d'argent est de 25 μm ce qui est en accord avec les mesures effectuées au profilomètre. Les différentes couches de la structure sont visibles sur la figure 2.24 de droite : silicium, métallisation de la face arrière de la puce (Ti, Ni et Ag), couche d'argent frittée et les différentes métallisations du substrat (flash d'or, nickel et cuivre), de haut en bas.

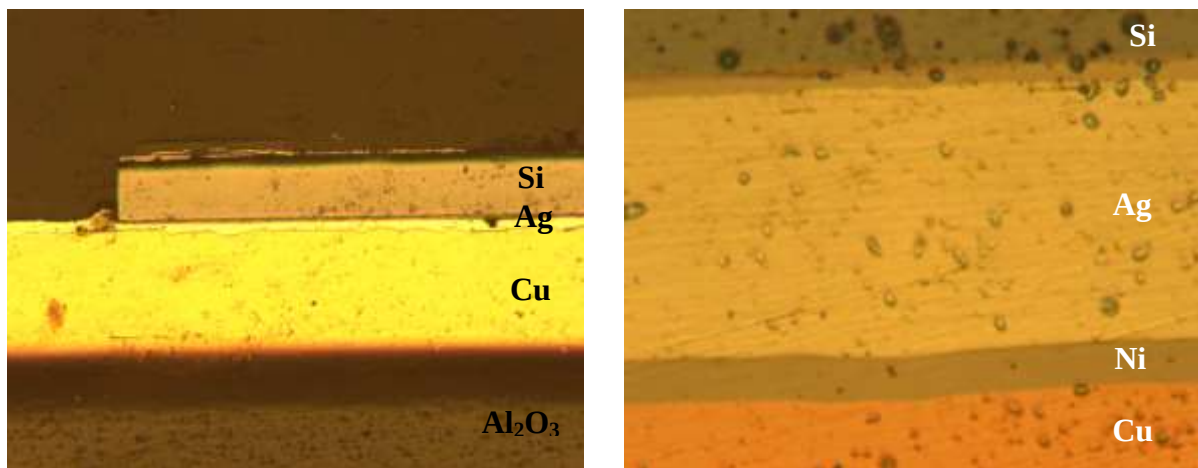


Figure 2.24 : Structure d'un assemblage fritté (diode Si + substrat DBC Au)

La structure de la couche d'argent après vieillissement (figure 2.25) n'a pas évolué par rapport à celle avant vieillissement (figure 2.24). Le phénomène de densification et d'homogénéisation de la couche d'argent au cours du vieillissement n'a pas pu être observé et ni confirmé par les analyses menées (phénomène décrit par les fabricants de pâte d'argent). Les différents véhicules de tests analysés après défaillance ne présentent aucune fissure dans la couche d'argent et aux interfaces avec la puce et le substrat.

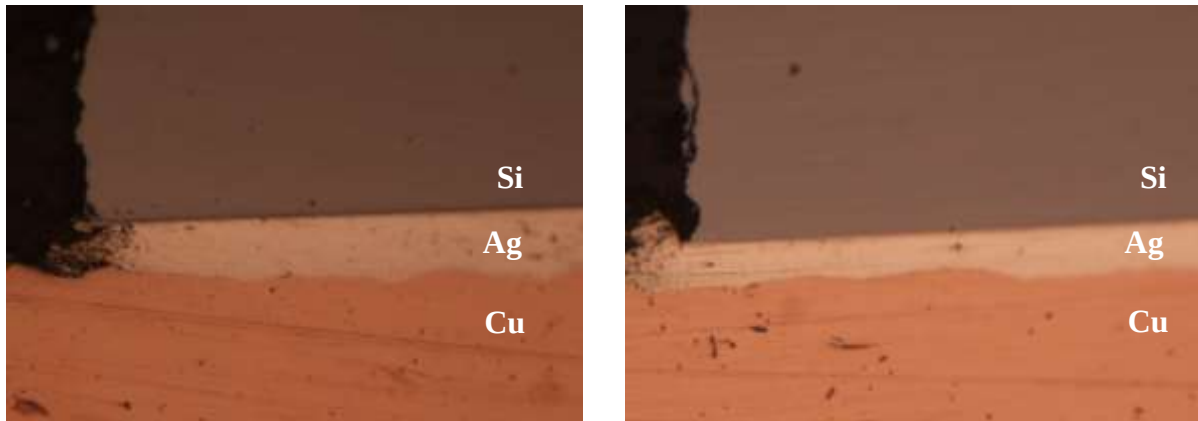
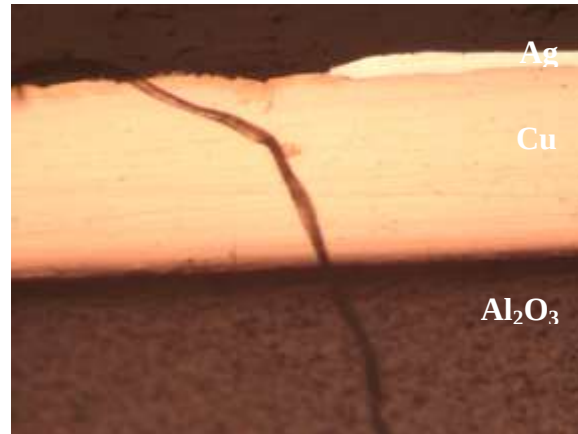


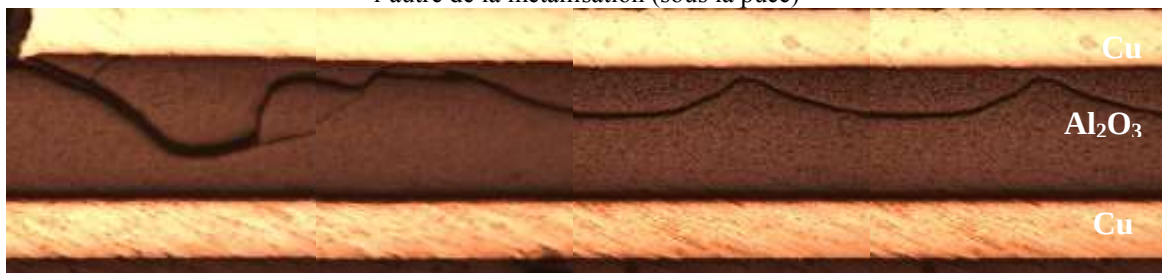
Figure 2.25 : Structure de la couche d'argent après 4800 cycles de vieillissement - Assemblage métallisation Ag après 4800 cycles (gauche) et Cu après 6000 cycles (droite)

Des fissures sont générées aux bords de l'interface métallisation/céramique, comme on peut l'observer sur la figure 2.26 et leur croissance s'effectue dans la céramique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1 (cf. 1.5.3.1), le premier mécanisme de défaillance dans les substrats est dû à la fatigue thermique d'assemblage par la croissance de fissures qui se propagent à partir des singularités géométriques dans la couche de cuivre et des interfaces cuivre/céramique. Ces fissures apparaissent à la singularité géométrique située aux bords de la métallisation à l'interface avec la céramique. Elles se propagent davantage dans les substrats DBC métallisation CuAg sélectif et Ag (substrat fragilisé par la découpe avant l'assemblage) par rapport aux substrats DBC Au et Cu. Par exemple, dans l'assemblage métallisation Ag, une telle fissure s'est propagée d'un bord à l'autre de la métallisation dans la céramique (figure 2.26) alors que pour un assemblage métallisation Au, la propagation de la fissure est plus restreinte (figure 2.26). Cette différence est en accord avec les résultats obtenus lors des mesures de la résistance thermique des assemblages. En effet, les véhicules de tests substrat CuAg sélectif et Ag ont dépassé le critère de défaillance alors que ce n'est pas le cas pour les autres véhicules de tests. De plus, les observations visuelles des assemblages ont permis d'observer un phénomène identique (cf. figure 2.23).

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré



Fissure dans la céramique d'un substrat DBC Ag après 5200 cycles – la fissure se prolonge d'un bord à l'autre de la métallisation (sous la puce)



Fissure dans la céramique d'un substrat DBC Au après 6000 cycles – fissure « incomplète » non présente sous la puce

Figure 2.26 : Fissures apparues dans la céramique au cours du vieillissement entraînant la défaillance des assemblages – Assemblage métallisation CuAg (4800 cycles) et assemblages métallisation Au (6000 cycles)

2.3.2.6. Conclusion sur l'influence de la métallisation du substrat sur la tenue thermomécanique

Cette première étude sur l'influence de la métallisation du substrat sur la fiabilité des assemblages de puissance frittés avec une pâte d'argent nanométrique a permis de montrer les avantages apportées par cette technologie. L'utilisation du frittage de pâte d'argent « déplace » la zone sensible thermomécaniquement auparavant située au niveau de la brasure. Cette zone se situe maintenant au niveau du substrat (fissures dans la céramique) et des connexions électriques (les décollements des fils de câblage, nous ont amené à câbler plusieurs fois les assemblages au cours du vieillissement). L'absence de phase intermétallique, une température de fusion élevée (961°C) et un CTE plus proche de celui du cuivre sont des explications possibles de la tenue thermomécanique plus élevée de l'argent fritte par rapport à la brasure SnPb37. Cette étude a été poursuivie par des simulations numériques présentées dans le chapitre 3 dans le but d'évaluer la durée de vie d'assemblages frittés. Différentes publications sur le frittage de pâte d'argent ont discuté sur le fait que le frittage est complexe pour des puces de grandes surfaces ($> 100 \text{ mm}^2$) et que l'on peut obtenir une couche d'argent dont le frittage est incomplet au centre de la puce. L'influence de la surface de la puce a été abordée au cours de la seconde étude réalisée et est présentée dans la partie suivante.

2.3.3. Influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la tenue thermomécanique

2.3.3.1. Introduction

Les essais préliminaires (cf. 1.2) et l'étude précédente ont montré l'apport technologique du frittage de pâte d'argent nanométrique et micrométrique dans le cadre de la réalisation d'assemblage de puissance. En plus d'une tenue mécanique des assemblages supérieure par rapport aux alliages de brasure, les véhicules de tests frittés ont démontré une tenue aux vieillissements très élevée pour des cycles de $-40^\circ\text{C} / +125^\circ\text{C}$ (5 à 6 fois supérieures aux brasures généralement utilisées comme nous avons pu le voir lors de l'étude précédente). Les paramètres de tests jouent un rôle important : le type de composant, les conditions expérimentales, les caractérisations effectuées. Nous avons donc décidé de réaliser une seconde étude sur différentes technologies d'assemblage avec un point de départ identique (substrats et puces identiques). Dans le but d'aller plus loin, nous avons choisi d'intégrer dans

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

ces essais, la problématique de la surface de la puce. En effet, le comportement thermomécanique n'est pas le même selon les dimensions et la géométrie des composants étudiés. L'étude s'intéresse donc au comportement thermomécanique des assemblages de puissance en fonction de deux paramètres (dimensions des puces et technologies d'assemblage). Pour cela, nous avons suivi l'évolution de la résistance thermique des assemblages au cours de vieillissement accéléré. Le but final étant de comparer et d'établir une classification entre les différentes technologies d'assemblage.

2.3.3.2. Véhicules de tests

Plusieurs technologies d'assemblages ont été utilisées au cours de cette étude : quatre brasures (SnCu, PbSnAg, SnAgCu et AuSn deux fois - tableau 2.2) et trois technologies de frittage présentées en partie 2.2 (pâte d'argent micrométrique LTS 043-04P2, pâte d'argent Argomax® 2020 et film d'argent Argomax® 8000). Nous avons sélectionné deux types de substrats (deux designs de DBC métallisation or et nickel figure 2.27) et trois types de puces (deux IGBT et un MOSFET figure 2.27) se différenciant principalement par leur surface. Les assemblages brasés ont été réalisés par Microsemi et les assemblages frittés ont été assemblés au laboratoire IMS. Le tableau 2.3 présente un récapitulatif de tous les véhicules de tests assemblés et des conditions de procédé d'assemblage. Les deux types d'IGBT (petite ($5,71 \times 4,5 \text{ mm}^2$) et moyenne ($12,59 \times 12,59 \text{ mm}^2$) surfaces) ont été reportés sur des substrats DBC 2'' x 1'' et les MOSFET (grande surface ($19 \times 15 \text{ mm}^2$)) sur des substrats DBC 1,1'' x 1'' (les dénominations petite, moyenne et grande surface seront utilisées pour la suite afin de simplifier la compréhension). Six véhicules de tests par puces ont été assemblés pour chaque technologie : un pour l'analyse optique avant vieillissement et les cinq autres pour le suivi de la résistance thermique et l'analyse optique après défaillance. Les véhicules de tests ont ensuite été câblés par Microsemi (figure 2.27). Deux séries de véhicules de tests ont été assemblés pour la brasure AuSn. Des analyses aux rayons X ont montré une grande quantité de défauts dans la brasure (figure 2.28 gauche). Une seconde série a donc été réalisée en plaçant un poids sur la puce lors de l'assemblage ce qui a permis de réduire le nombre de défauts dans la brasure (figure 2.28 droite).

Tableau 2.2 : Propriétés des alliages de brasures utilisés comparé à l'alliage SnPb37

Alliage	Température de fusion (°C)	Module d'Young (GPa)	CTE ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}$)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Conductivité Electrique (S/m)
SnPb37	183	40	25	51	$6,80 \cdot 10^{+7}$
SnCu0,7	227	11	19,3	2	$6,67 \cdot 10^{+6}$
PbSn5Ag1,5	300	13,8	25	23	$4,35 \cdot 10^{+6}$
AuSn20	363	68	12,3	27	$6,1 \cdot 10^{+6}$
SnAg3Cu0,5	219	30	23	55	$6,67 \cdot 10^{+6}$

Tableau 2.3 : Récapitulatif des différents assemblages réalisés

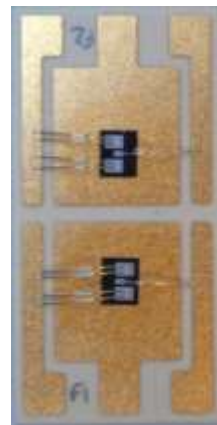
Série	Technologies d'assemblage	Epaisseur du matériau avant assemblage (μm)	Température de procédé (°C)	Substrats	Puces
A	AuSn	100	390	DBC Au	IGBT 5,71 x 4,53 x 0,18 mm ³
B	PbSnAg	100	370	DBC Ni	
C	AuSn poids	100	390	DBC Au	
D	SAC 305	100	270	DBC Ni	
E	SnCu	100	270	DBC Ni	IGBT 12,59 x 12,59 x 0,2 mm ³
F	Argomax® 8000	100	250	DBC Au	
G	Argomax® 2020	100	250	DBC Au	MOSFET 19 x 15 x 0,2 mm ³
H	LTS 043-04P2	100	240	DBC Au	



(a)



(b)



(c)

Figure 2.27 : Trois exemples de véhicules de tests assemblés par les différentes technologies de report sélectionnées pour cette étude : (a) MOSFET brasé AuSn sur DBC Au, (b) IGBT brasé SnCu sur DBC Ni et (c) IGBT fritté film d'argent sur DBC Au

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

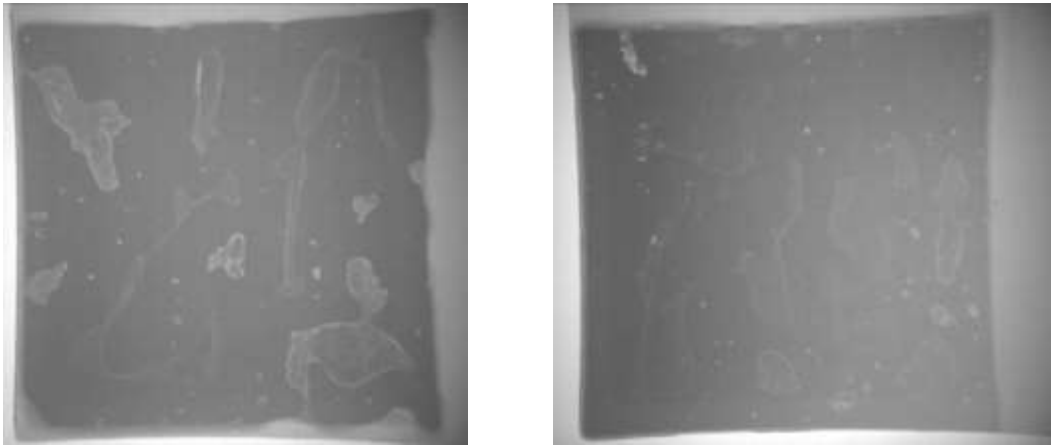


Figure 2.28 : Images de deux véhicules de tests aux rayons X : IGBT moyenne surface brasé AuSn sur DBC Au et IGBT moyenne surface brasé AuSn sur DBC Au avec un poids sur la puce lors de l'assemblage afin de réduire le nombre de défauts

2.3.3.3. Evolution de la résistance thermique des assemblages brasés et frittés au cours du vieillissement

Les conditions expérimentales de vieillissement accéléré ont été les mêmes que lors de la précédente étude (vieillissement de type choc avec deux paliers de 30 minutes aux températures de -40°C et de $+125^{\circ}\text{C}$). La résistance thermique des assemblages a été mesurée avant vieillissement et le critère de défaillance a été défini par une augmentation de la résistance thermique de 20% par rapport à la valeur de départ. Les mesures ont été effectuées tous les 200 cycles et le tableau 2.4 regroupe les différentes causes d'arrêt du vieillissement ainsi que le nombre de cycles nécessaire pour les atteindre. Des défaillances électriques sont apparues dans les MOSFET (puce de grande surface) et ont rendu impossible toutes mesures sur ces véhicules de tests (tableau 2.4). Le nombre de véhicules de tests restant pour les puces de grandes surfaces n'étant pas suffisant, la suite de cette étude ne traite uniquement que des résultats obtenus pour les assemblages de puce de petites et moyennes surfaces.

Tableau 2.4 : Résultats des mesures de la résistance thermique des assemblages après 2000 cycles de vieillissement - nombres de cycle et augmentation de la Rth à défaillance - * pas de véhicules de tests assemblés pour cette technologie

	Puce de petite surface		Puce de moyenne surface		Puce de grande surface	
Série	Nombres de cycles à défaillance	Cause d'arrêt du vieillissement	Nombres de cycles à défaillance	Cause d'arrêt du vieillissement	Nombres de cycles à défaillance	Cause d'arrêt du vieillissement
A	800	Rth 30%	800	Rth 27%	800	Rth 27% (3 VT) Electrique (2 VT)
B	400	Rth 27%	800	Rth 33%	400	Electrique (2 VT)
					600	Electrique (2 VT)
					800	Rth 48%
C	*	*	1400	Rth 28%	400	Electrique (2 VT)
					600	Electrique (1 VT)
					800	Rth 38%
D	400	Rth 68%	400	Rth 27%	400	Electrique (1 VT)
					800	Electrique (3 VT)
					800	Rth 27%
E	600	Rth 86%	800	Rth 35%	200	Electrique (3 VT)
					400	Electrique (1 VT)
					400	Rth 48%
F	800	Rth 42%	2000	Rth 5%	200	Electrique (2 VT)
					400	Electrique (1 VT)
					600	Electrique (2 VT)
G	2000	Rth 11%	2000	Rth 5%	200	Electrique (4 VT)
					400	Electrique (1 VT)
H	200	Rth 140%	2000	Rth 20%	*	*

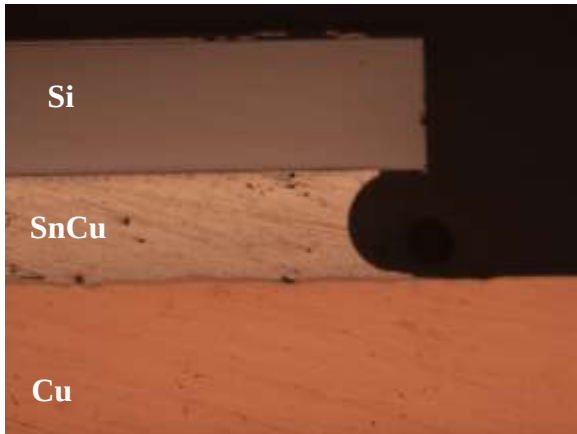
Les vieillissements ont été arrêtés après 2000 cycles afin d'analyser les résultats et d'effectuer les analyses structurales des assemblages. L'évolution de la résistance thermique des séries F moyenne surface et G petite et moyenne surfaces n'a pas dépassé le critère de défaillance, néanmoins des analyses optiques ont été réalisées. Ce résultat est cohérent par rapport à l'étude précédente où les assemblages frittés n'ont pas été défaillants après 6000 cycles de vieillissement. L'augmentation de la résistance thermique des assemblages brasés au cours du cyclage est rapide, après 800 cycles l'ensemble des véhicules de tests sont entrés en défaillance à l'exception de la série C moyenne surface (brasure AuSn). Cette défaillance rapide par rapport aux assemblages frittés est en accord avec d'autres travaux effectués sur le vieillissement d'assemblages brasés (51) (124). La série H petite surface présente un décollement des puces après 200 cycles. Nous notons également une incohérence dans les résultats des séries F petite surface et H moyenne surface (défaillances après 800 et 2000

cycles) par rapport à ceux des autres assemblages frittés (non défaillants après 2000 cycles). Comme les résultats le montrent, la surface de la puce ne semble pas avoir un effet important sur le nombre de cycles à défaillance des assemblages brasés et frittés. Les analyses thermiques ont permis de confirmer que les assemblages frittés ont un comportement thermomécanique supérieur à celui des assemblages brasés. Nous obtenons donc des joints ayant une durée de vie plus longue.

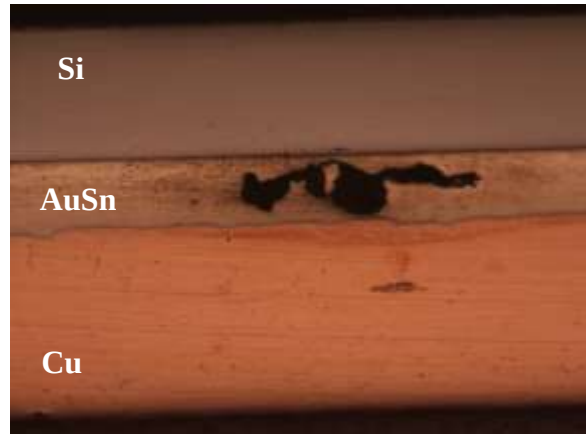
2.3.3.4. Analyses optiques de la structure des assemblages

Deux séries d'analyses optiques ont été menées sur les véhicules de tests : dans un premier temps, la structure des assemblages a été analysée avant vieillissement et dans un second temps lorsque le critère de défaillance a été atteint par les véhicules de tests. Cette étude est scindée en deux parties : l'étude de la structure des assemblages brasés et celle des assemblages frittés.

Les analyses optiques effectuées avant vieillissement, ont permis d'observer les différents types de défauts initiaux dans les assemblages brasés (figure 2.29) : présence de lacunes, début de fissure aux interfaces puce/brasure et brasure/substrat et manque de brasure. Nous notons également la présence de zone d'intermétalliques dans les assemblages des séries B, D et E. Ces défauts initiaux (lacunes et fissures) sont caractéristiques des assemblages brasés et entraînent la défaillance des assemblages suite à des vieillissements accélérés. Les différentes causes entraînant l'apparition de tels défauts ont été traitées dans le chapitre 1 (cf. 1.5) et nous avons pu voir que les lacunes sont des inclusions gazeuses dues à des procédés non propres. Les amorces de fissures sont dues aux différences de CTE entre les différents matériaux de l'assemblage. Les zones à intermétalliques sont susceptibles de croître et de fragiliser la structure de l'assemblage.



Assemblage E (puce moyenne)
Manque de brasure sur les bords de la puce
Présence de lacunes dans la brasure
Présence d'intermétallique (AuSn)



Assemblage A (puce moyenne)
Lacune dans la brasure



Assemblage D (puce petite)
Début de fissure à l'interface puce/brasure
Présence d'intermétallique (AuSn)



Assemblages B (puce petite)
Présence d'intermétallique

Figure 2.29 : Différents types de défauts dans les assemblages brasés

La présence de défauts initiaux dans les assemblages brasés engendre une réaction en chaîne au cours du vieillissement accéléré qui entraîne la défaillance des assemblages. Le suivi de la résistance thermique au cours du vieillissement, nous permet de détecter la croissance ou/et l'apparition de défauts qui sont ensuite analysés par des observations optiques. Les véhicules de tests ont été analysés aux temps donnés dans le tableau 2.4 dans le but de définir les causes entraînant les défaillances. Les différents types de défauts entraînant la défaillance des assemblages sont la présence de fissures, de lacunes et la croissance des zones à intermétalliques (figure 2.30). Néanmoins, la principale cause de la défaillance semble être la présence d'importantes fissures dans le substrat (figure 2.31). En effet, les analyses optiques ont montré que l'ensemble des véhicules de tests brasés présentent des fissures dans la céramique. Celles-ci sont initiées aux bords de la métallisation à l'interface céramique/métallisation (comme vu dans l'étude précédente cf. 2.3). Deux types de fissures

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

sont observables dans la céramique des véhicules test brasés : fissures partielles ou totales. Une fissure totale est définie comme étant une fissure présente sous toute la surface de la puce, allant d'un bord à l'autre de la métallisation alors qu'une fissure partielle n'est présente que partiellement sous la puce (figure 2.30). Comme pour la première étude, le substrat est donc la cause de la défaillance des véhicules de tests. L'apparition de ce type de défaillance est par contre précoce par rapport à la première étude. Les analyses optiques des assemblages frittés (détaillées par la suite) ont montré un phénomène de fissuration de la céramique identique mais dans une moindre mesure (les fissures sont moins prononcées). Le procédé de brasage et les propriétés des assemblages brasés semblent donc accélérer ce phénomène de fissuration de la céramique. Ce phénomène, dû à l'inadéquation entre les CTE de la céramique et de la métallisation (cf. 1.5.3.7), entraîne ainsi la défaillance thermique des assemblages.

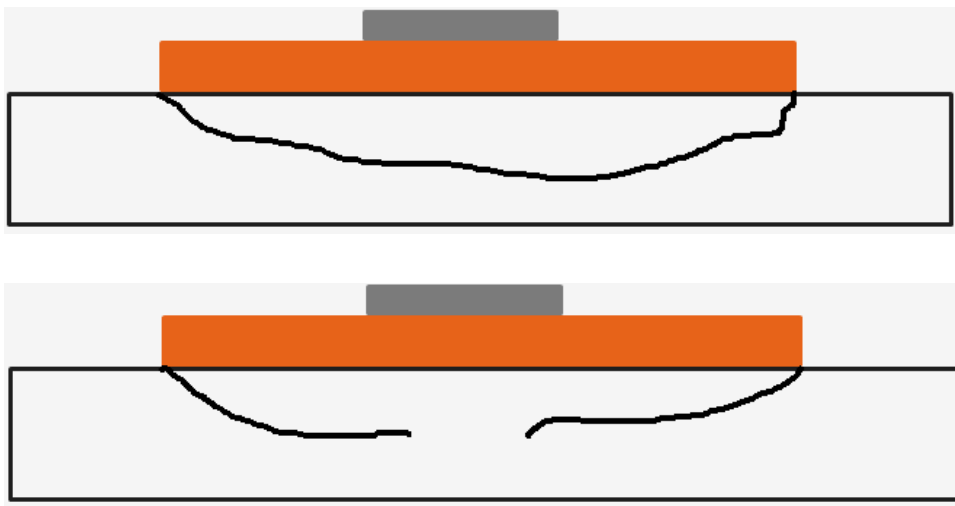
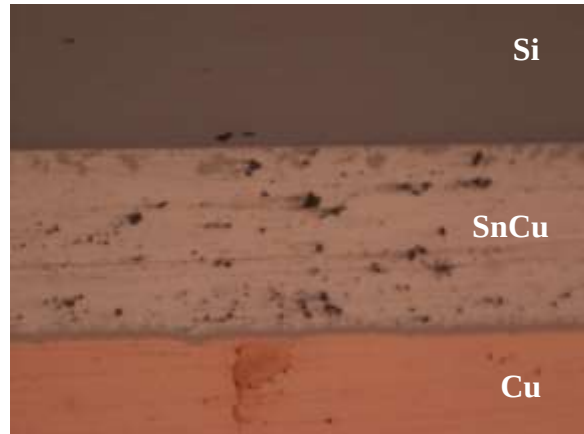


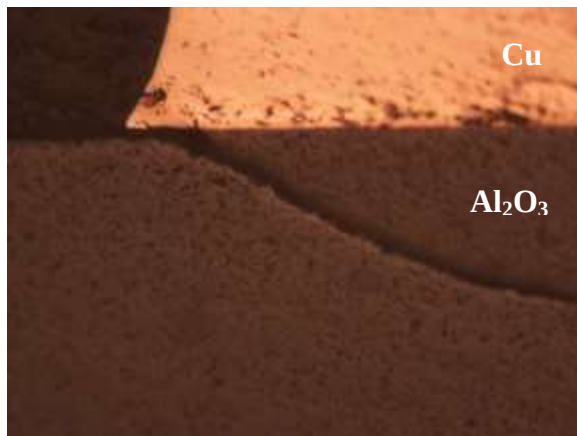
Figure 2.30 : Fissure totale et partielle amorcée à l'interface entre les bords de la métallisation et la céramique



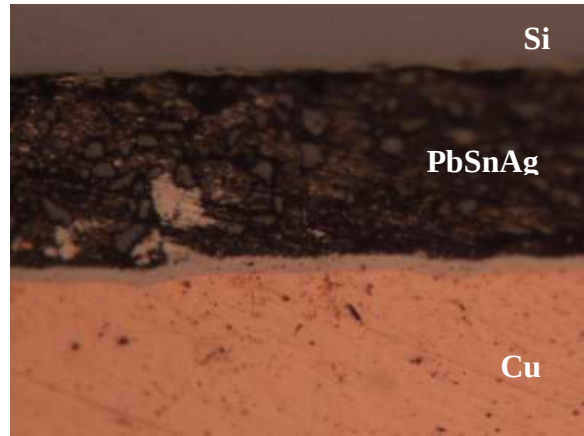
Assemblée A (puce petite)
800 cycles
Fissure dans brasure



Assemblée E (puce petite)
600 cycles
Intermétalliques AuSn en plus forte quantité qu'avant vieillissement (zone grisâtre proche de l'interface puce/brasure et brasure/substrat)
Présence de lacunes dans la brasure



Assemblée E (puce moyenne)
800 cycles
Fissure dans la céramique



Assemblages B (puce moyenne)
800 cycles
Présence d'intermétallique en plus forte quantité qu'avant vieillissement

Figure 2.31 : Différents types de défauts dans les assemblages brasés apparus après vieillissement accéléré

La première étude (cf. 2.2) n'ayant pas abouti à l'observation de défaillance dans la couche d'argent frittée après 6000 cycles de vieillissement accéléré, il est logique que les observations optiques réalisées pour cette étude ne permettent pas d'observer de défaillance (figure 2.32). Néanmoins, le phénomène de fissuration importante de la céramique est également observable mais dans une moindre mesure. Les fissures observées sont toutes de type partiel et leur croissance est limitée (les fissures ne sont pas présentes sous la puce) et ne perturbent donc pas la dissipation thermique. Les résultats des mesures thermiques des séries F petite surface et H moyenne surface n'étaient pas cohérent vis-à-vis des mesures pour les autres séries d'assemblages frittés. Les observations optiques ont montré que le

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

phénomène de fissuration de la céramique est plus avancé pour les assemblages de la série F petite surface (fissure totale dans l'assemblage observé). Le phénomène entraînant la défaillance des assemblages de la série H moyenne surface est l'apparition d'une fissure à l'interface puce/couche d'argent (figure 2.33). Ce phénomène est également observé sur les assemblages de la série H petite surface avant vieillissement, les puces de ces assemblages se sont décollées après 200 cycles de vieillissement.

Les assemblages réalisés par frittage de pâte ou film d'argent nanométrique ne présentent donc pas de défaillance dans la couche d'argent ou dans la zone avoisinante (interface avec la puce ou avec le substrat) ce qui n'est pas le cas pour les assemblages frittés avec la pâte d'argent micrométrique. Le frittage nanométrique semble donc permettre des performances supérieures à celles du frittage micrométrique. Comme dans l'étude précédente, l'utilisation du frittage de pâte d'argent déplace la zone thermomécaniquement sensible dans le substrat.

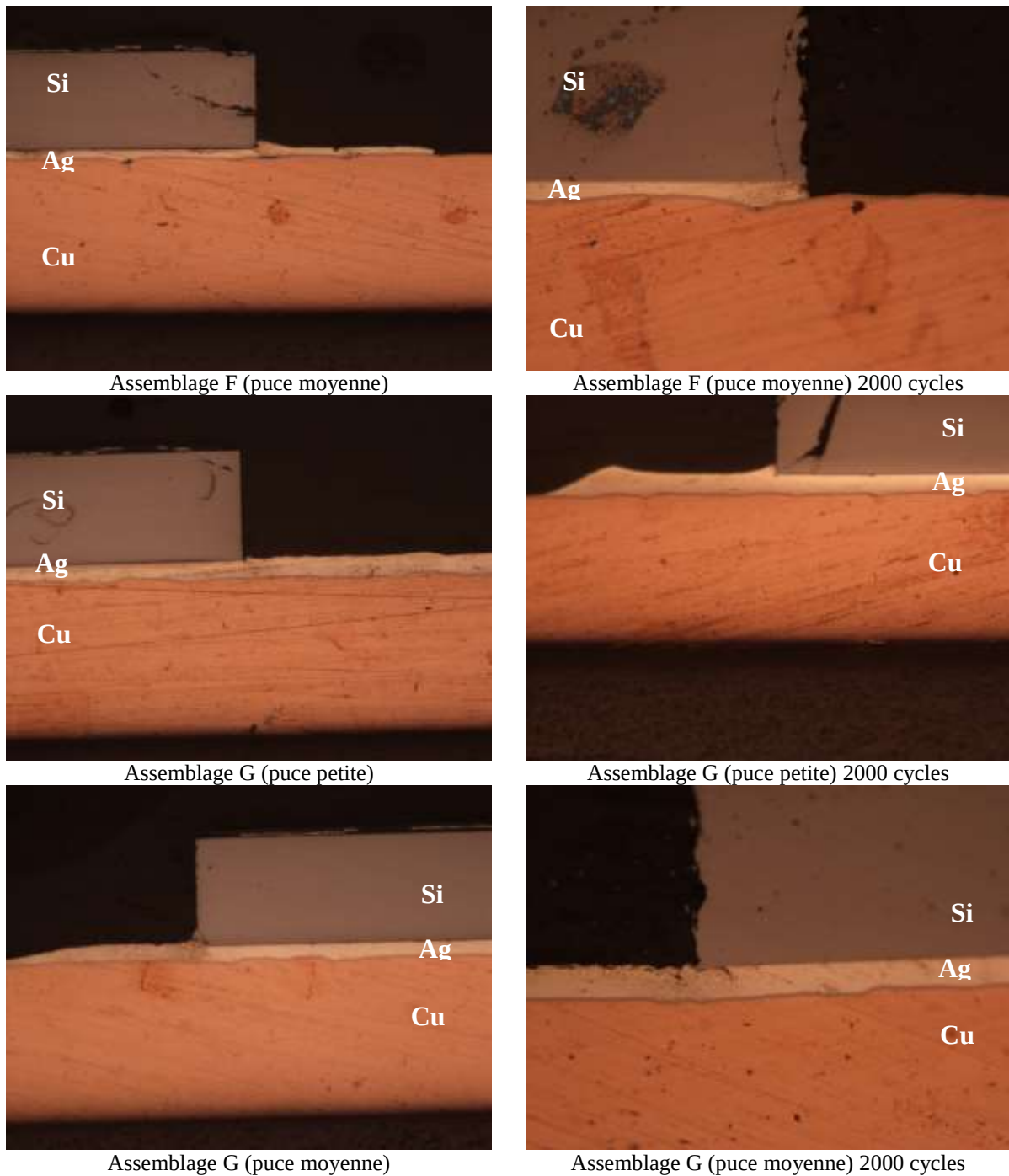


Figure 2.32 : Observations optiques des assemblages frittés avant et après vieillissement

2.3. Etude de l'influence du frittage de pâte d'argent sur la tenue thermomécanique d'assemblage de puissance en vieillissement passif accéléré

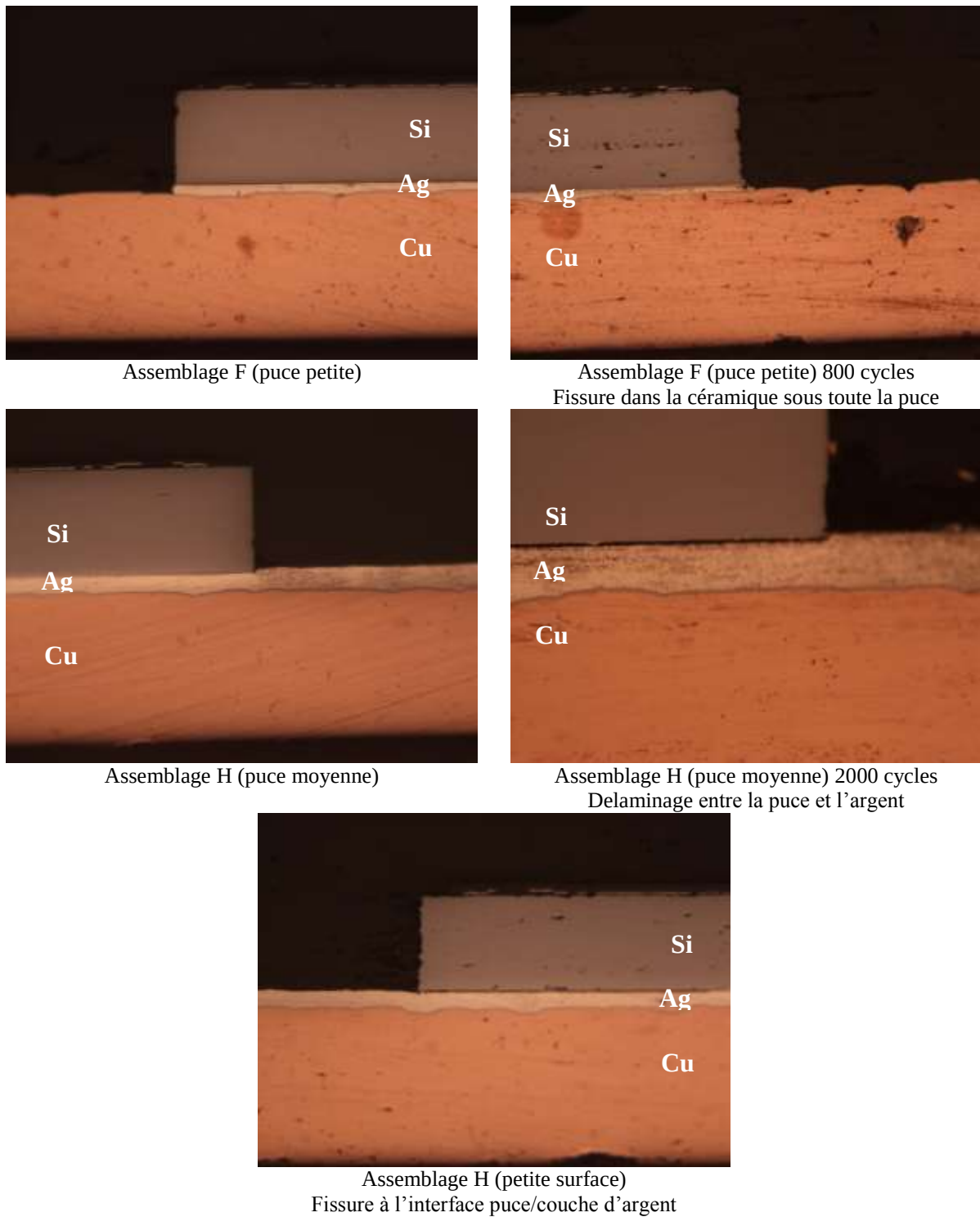


Figure 2.33 : Observations optiques des assemblages frittés défaillant avant et après vieillissement

2.3.3.5. Conclusion sur l'influence de la surface de la puce et de la technique d'assemblage sur la tenue thermomécanique

L'objectif de cette seconde étude était de comparer le comportement thermomécanique des assemblages de puissance en fonction de la technologie de report et des dimensions des puces. Dans ce cadre, nous avons assemblé trois types de puces différentes par le biais de huit technologies d'assemblage (cinq brasures et trois technologies de frittage). Les différentes séries de véhicules de tests ont subi un vieillissement accéléré et nous avons suivi l'évolution de leur résistance thermique. Les mesures de la résistance thermique et les observations optiques ont permis d'étudier les défaillances des assemblages ainsi que les causes de l'apparition de défaillances. Les dimensions de la puce ne semblent pas avoir d'effet sur le comportement thermomécanique des assemblages brasés), au contraire de la technologie d'assemblage dans notre étude. Les assemblages frittés n'étant pas défaillants, nous ne pouvons pas conclure sur l'influence de la taille des puces. Le substrat apparaît être la zone la plus sensible thermomécaniquement des modules de puissances étudiés. Des fissures sont apparues dans la céramique du substrat avec comme origine la singularité géométrique de l'interface métallisation/céramique au bord de la métallisation. La croissance de telles fissures est plus forte dans les assemblages brasés. La présence de lacunes et la croissance d'intermétalliques engendrent des défaillances d'autant plus rapides dans les assemblages brasés. Nous pouvons classer les assemblages, suite à notre étude, de la moins à la plus performante thermomécaniquement : Série D (SAC 305) < Séries A (AuSn), B (PbSnAg) et E (SnCu) < Série C (AuSn) < Série H (pâte d'argent micrométrique) < Séries F et G (film et pâte d'argent nanométrique).

2.4. Conclusion

Les différentes études expérimentales menées et décrites dans ce chapitre, nous ont permis de comprendre et de cerner davantage les possibilités apportées par le frittage de pâte d'argent dans le but de réaliser des assemblages de puissance. Les différents essais expérimentaux ont été menés à la suite d'une période de prise en main des différents appareillages du procédé d'assemblage (presse, sérigraphie) et des différentes pâtes d'argent à notre disposition. Ils ont porté, dans un premier temps, sur le développement de procédés d'assemblages adaptés à nos composants et dans un second temps sur les essais de

vieillissement dans le but de caractériser le comportement thermomécanique des assemblages frittés.

La mise au point de procédé d'assemblage s'est déroulé en deux parties s'intéressant chacune à un type de pâte d'argent : micrométrique et nanométrique. En plus du développement d'un procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent micrométrique Heraeus, trois pâtes d'argent ont pu être testées dans le but d'en sélectionner une seule pour les expérimentations suivantes. Les essais sur le frittage de pâte d'argent nanométrique ont été menés sur deux types de pâtes d'argent Alpha. Les essais ont permis de définir des procédés d'assemblage simples et rapides en trois étapes (18 minutes pour les pâtes d'argent micrométriques et 31 minutes pour les pâtes d'argent nanométriques) : sérigraphie, déliantage et frittage sous pression (10 MPa). La suite des travaux a été effectuée en réalisant des assemblages avec une pâte d'argent micrométrique, une pâte d'argent nanométrique et la technologie de film d'argent.

Une fois, les procédés d'assemblages définis pour les différentes technologies de frittage de pâte d'argent, des essais de vieillissement accéléré (-40°C / $+125^{\circ}\text{C}$) ont été effectués dans le but d'étudier le comportement thermomécanique des assemblages frittés. Ces essais, couplés à un suivi de l'évolution de la résistance thermique, ont permis d'observer un déplacement de la zone thermomécaniquement sensible. En effet, après 6000 cycles de vieillissement, aucune défaillance n'a pu être observée dans la couche d'argent ou dans les interfaces avec la puce et le substrat. Les propriétés physiques (conductivité et CTE) de l'argent permettent des performances thermomécaniques plus élevées qu'une brasure. De ce fait, la zone sensible est déplacée dans le substrat et au niveau des connexions électriques. Les différentes études ont donc confirmé les premiers résultats prometteurs vus lors de nos recherches sur l'état de l'art du frittage de pâte d'argent. Les essais de vieillissement sont la première étape d'une méthodologie permettant l'évaluation de la durée de vie des assemblages de puissance réalisés par frittage de pâte d'argent. La seconde étape, présentée dans le chapitre 3, est la modélisation par éléments finis des assemblages frittés via le logiciel de simulation numérique Ansys. Dans ce troisième chapitre, consacré à la modélisation par éléments finis, plusieurs études sont abordées : l'étude du procédé de frittage, l'évaluation de la durée de vie des assemblages, l'étude du comportement d'un assemblage double face ainsi qu'une étude sur l'influence de la porosité de la couche d'argent

Chapitre 3. Etude du comportement thermomécanique des assemblages de puissance - modélisation par éléments finis

SOMMAIRE

3.1. INTRODUCTION	106
3.2. EVALUATION DES CONTRAINTES RESIDUELLES APRES FRITTAGE ET DE LA DISSIPATION THERMIQUE DANS UN ASSEMBLAGE FRITTE	109
3.2.1. INTRODUCTION	109
3.2.2. MODELE UTILISE	110
3.2.3. PARAMETRES DE CALCUL	112
3.2.4. RESULTATS	113
3.2.5. CONCLUSION SUR LA MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DU PROCEDE DE FRITTAGE ET DE LA DISSIPATION THERMIQUE	116
3.3. EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UN ASSEMBLAGE FRITTE	116
3.3.1. INTRODUCTION	116
3.3.2. MODELE UTILISE	119
3.3.3. MODELISATION DU VIEILLISSEMENT ACCELERE	119
3.3.4. MODELISATION DU PROFIL DE MISSION	122
3.3.5. CONCLUSION SUR L'EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UN ASSEMBLAGE FRITTE	124
3.4. EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA POROSITE DE LA COUCHE D'ARGENT	125
3.4.1. INTRODUCTION	125
3.4.2. MODELE UTILISE	126
3.4.3. PARAMETRES DE CALCUL	127
3.4.4. RESULTATS	127
3.4.5. CONCLUSION SUR L'INFLUENCE DE LA POROSITE DE LA COUCHE D'ARGENT	131
3.5. EVALUATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN ASSEMBLAGE DOUBLE FACE PAR RAPPORT A UN ASSEMBLAGE SIMPLE	132
3.5.1. INTRODUCTION	132
3.5.2. MODELE UTILISE	133
3.5.3. PARAMETRES DE CALCUL	134
3.5.4. RESULTATS	134
3.5.5. CONCLUSION SUR L'INFLUENCE D'UN ASSEMBLAGE DOUBLE FACE PAR RAPPORT A UN ASSEMBLAGE SIMPLE SUR LE PROCEDE DE FRITTAGE ET SUR LA RESISTANCE THERMIQUE DE L'ASSEMBLAGE	137
3.6. CONCLUSION	137

3.1. Introduction

La modélisation par éléments finis est une technique numérique utilisée pour résoudre les problèmes comportementaux (thermique, mécanique, micro-électronique, etc.) de structures macroscopique ou microscopique dans une configuration donnée (environnement extérieur, conditions initiales, chargement appliqué, etc.). De nombreux logiciels permettent des analyses uni ou multi-physiques (Ansys, Sentaurus, Comsol, Fluent, etc.). C'est l'une des techniques qui donne les résultats les plus proches et les plus complets du comportement réel des structures. En effet, la modélisation par éléments finis consiste à discrétiser une structure en un grand nombre d'éléments finis pour ensuite regrouper les solutions de chaque élément fini en une solution complète et détaillée de la structure. Une importante discrétisation de la structure (nombre d'éléments finis élevé) permet d'obtenir une solution complète et proche de la réalité mais engendre une augmentation de la durée de calcul et du besoin d'un espace de stockage important. Un compromis entre temps de calcul et précision des résultats est donc nécessaire. La modélisation par éléments finis est de plus en plus employée dans le but d'estimer la fiabilité des assemblages de puissance. En effet, la structure des assemblages est de plus en plus complexe, ce qui rend les essais de qualification de la fiabilité coûteux et long.

L'approche que nous avons menée pour l'étude sur le comportement thermomécanique des assemblages de puissance est multi-physique, c'est pourquoi nous avons utilisé le logiciel de modélisation par éléments finis ANSYS. Plusieurs étapes ont été nécessaires afin de comprendre le comportement thermomécanique des assemblages réalisés par le procédé de frittage de pâte d'argent.

L'objectif de la première étude est d'évaluer les contraintes résiduelles obtenues après le procédé de frittage et de les comparer à celle du procédé de brasage. De plus, une étude sur la dissipation thermique a été menée afin de la comparer avec le comportement expérimental d'assemblage fritté.

La seconde partie est le prolongement de l'étude sur le comportement thermomécanique de nos assemblages frittés effectuée dans le chapitre 2. Les modélisations par éléments finis nous permettent de quantifier l'accumulation d'énergie de déformation (paramètres indicateur du vieillissement) et ainsi d'estimer la durée de vie en utilisant une méthodologie précise.

La porosité est une propriété inhérente aux structures frittées. Le laboratoire PPrime au sein du projet FIDEA a montré la dépendance des propriétés mécaniques (densité, module d'Young, etc.) des couches d'argent frittées avec la porosité. Une étude mécanique et thermique sur l'influence de la porosité de la couche d'argent a donc été menée.

Dans le cadre du projet FIDEA, la recherche d'une solution innovante d'architecture 3D est abordée. Nous allons donc étudier dans cette dernière partie, les impacts d'un assemblage double face sur le comportement thermique et mécanique par rapport à un assemblage simple face. Cette solution est ensuite étudiée expérimentalement dans le chapitre 4 avec pour objectif de réaliser un prototype 3D par frittage de pâte d'argent.

3.2. Evaluation des contraintes résiduelles après frittage et de la dissipation thermique dans un assemblage fritté

3.2.1. Introduction

La loi de Hooke est un principe physique qui définit une proportionnalité k (raideur de la structure) entre la force F nécessaire pour compresser ou étirer un ressort d'une longueur x et cette longueur x (3.1).

$$F = k.x \quad (3.1)$$

En mécanique du solide, cette loi est applicable à tous types de matériaux si les déformations engendrées par la force F sont petites et que la limite d'élasticité Re du matériau n'est pas atteinte. Dans ce cas, on définit une constante E appelé module d'Young (Pa) qui relie la contrainte de traction ou de compression σ en (Pa) et la déformation ou allongement relatif ε (sans dimension) d'un matériau élastique et isotrope (figure 3.1). Le module d'Young caractérise la droite sur laquelle les contraintes n'engendrent pas de déformations irréversibles (le matériau a un comportement plastique). Une force engendrant une contrainte supérieure à la limite d'élasticité (Re) produit des déformations plastiques irréversibles pouvant créer des fissures dans les matériaux ductiles. Pour les matériaux fragiles, une contrainte résultante supérieure à la limite d'élasticité engendre la cassure du matériau via des microfissures internes. La contrainte Rm est définie comme étant la contrainte maximale avant rupture du matériau.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.2)$$

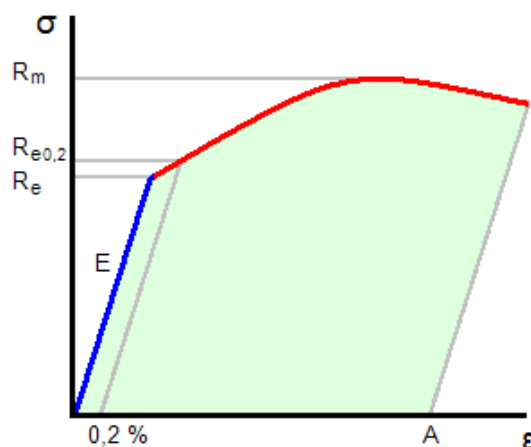


Figure 3.1 : Diagramme de la contrainte en fonction de la déformation

Le comportement mécanique des assemblages de puissance est un point critique compte-tenu des contraintes thermomécaniques qu'ils subissent en fonctionnement. L'étude des contraintes résiduelles obtenues par le procédé d'assemblage est donc une étape essentielle dans la compréhension de leur comportement. Le premier objectif de cette étude mécanique est d'évaluer et de comparer les contraintes résiduelles obtenues pour un assemblage fritté et un assemblage brasé SnPb37. Les contraintes obtenues pour un assemblage fritté ont ensuite été confrontées aux limites d'élasticité des différents matériaux.

Suite à cette étude mécanique qui nous permettra de valider le procédé d'assemblage par frittage, nous avons mené une étude thermique. Le but est d'évaluer la dissipation thermique d'un assemblage fritté et de vérifier l'exactitude de notre modèle par rapport aux mesures de la résistance thermique effectuée dans le chapitre 2.

3.2.2. Modèle utilisé

Les premiers travaux effectués sur le frittage de pâte d'argent ont été réalisés sur des assemblages de diodes $3,8 \times 3,8 \times 0,120 \text{ mm}^3$ et de substrat DBC Cu. Nous avons donc choisi de modéliser sous Ansys une géométrie se basant sur les dimensions de ces assemblages (figure 3.2 et tableau 3.1). La puce ayant été placée au centre du substrat, le modèle utilisé présente donc deux symétries. Les simulations ont donc été réalisées sur un quart de la géométrie initiale. Ce qui nous permet de réduire le nombre d'éléments finis et ainsi le temps de calcul. L'étape suivante a été de collecter les propriétés des différents matériaux pour ensuite les implémenter dans Ansys (tableau 3.2 et 3.3). Le modèle de Anand sera détaillé au cours de l'étude suivante (cf. 3.3). L'optimisation du maillage est l'une des étapes préliminaires les plus importantes. En effet, un maillage trop large donne des résultats incomplets et erronés alors qu'un maillage trop fin engendre un temps de calcul trop long mais les résultats seront précis et proches de la réalité. Il est donc nécessaire de trouver un juste milieu entre qualité de maillage et temps de calcul. La couche d'argent et la brasure sont les parties de l'assemblage sur lesquelles nous souhaitons avoir le plus de renseignements. L'essentiel du travail de maillage a donc été d'obtenir un maillage fin pour ces zones sans pour autant obtenir un temps de calcul démesuré. Pour cela, Ansys propose différents outils permettant de contrôler la qualité du maillage (*Element quality* et *Aspect ratio*). Différents paramètres de maillage ont été testés en calcul afin d'examiner l'effet du maillage sur les résultats mécaniques et thermiques obtenus. Un compromis entre la qualité du maillage, le temps de calcul et la qualité des résultats a été trouvé et un maillage a pu être sélectionné

pour cette étude (figure 3.3). Au final, deux modèles ont été réalisés : le premier avec une couche d'argent de 25 μm et le second avec une brasure de 100 μm .

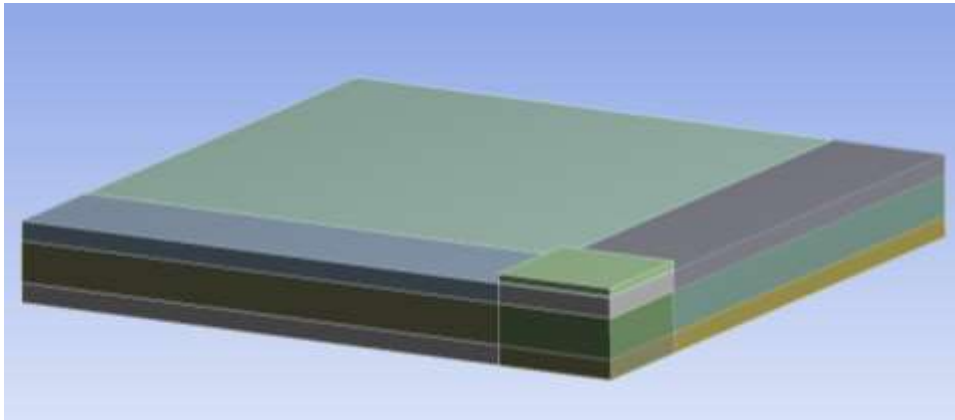


Figure 3.2 : Géométrie de l'assemblage fritté modélisé sous Ansys

Tableau 3.1 : Dimensions de chaque matériau de l'assemblage modélisé

Matériau	L (mm)	l (mm)	e (mm)
Silicium	3,8	3,8	0,120
Cuivre	25,4	25,4	0,305
Alumine	25,4	25,4	0,635
Argent	3,8	3,8	0,025
SnPb	3,8	3,8	0,100

Tableau 3.2 : Propriétés des matériaux pour la modélisation du procédé de frittage de de la résistance thermique (16) (41) (125)

	Densité (Kg/m ³)	CTE (10 ⁻⁶ .°C)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de poisson	Conductivité Thermique (W/m.°C)
Alumine	3900	8,1	390	0.25	11
Cuivre	8950	16,9	124	0,34	400
Silicium	2300	2,8	120	0,28	148
Argent fritté	8500	19,5	50	0,25	160
SnPb37	7370	25	40	0,39	51

Tableau 3.3 : Constantes du modèle de Anand pour une couche d'argent nanométrique fritté et la brasure SnPb37 (126) (127)

Constante	A (s ⁻¹)	Q (J/mol)	m	n	ξ	$\hat{s}$ (MPa)	ho (MPa)	so (MPa)	a
Argent fritté	9,81	47442	0,56720	0,00326	11	67,389	15800	2768	1
SnPb37	4.10 ⁶	29516	0,303	0,007	1,5	13,79	1378,95	12,41	1,3

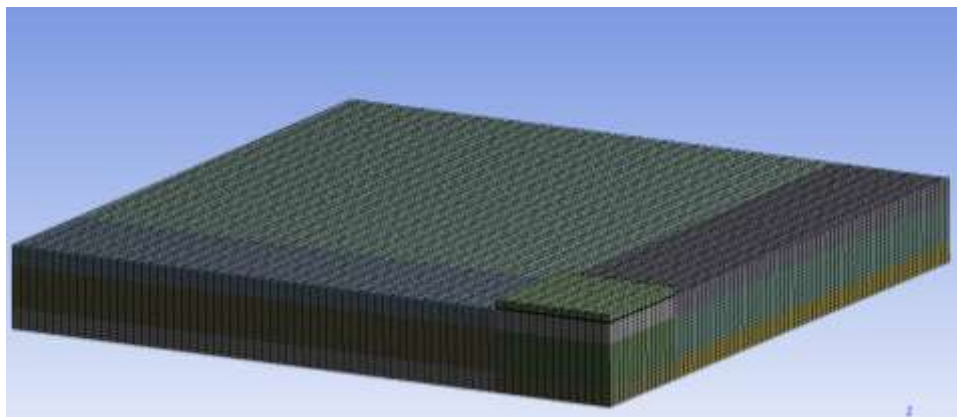


Figure 3.3 Maillage de la géométrie de l'assemblage fritté modélisé sous Ansys

3.2.3. Paramètres de calcul

Dans cette étude, nous avons modélisé le comportement mécanique d'un assemblage fritté et brasé lors du procédé d'assemblage et le comportement thermique (résistance thermique) des assemblages frittés.

Le chargement pour l'étude des contraintes résiduelles a été l'application d'une pression de 10 MPa en vertical de la puce et sur toute la surface de la puce pendant une minute (durée du frittage de pâte d'argent nanométrique). Le substrat est placé sur l'un des deux plateaux chauffants pendant le frittage, nous avons donc considéré la face inférieure du substrat comme fixe via la commande « *support fixe* ». Les différentes parties de l'assemblage ont été considérées à température constante (250°C) pendant le temps de frittage. Des relevés de températures effectués à l'interface puce/substrat au cours du frittage ont montré que la température maximale de frittage est atteinte en moins de dix secondes après la mise sous pression de l'assemblage, c'est pourquoi nous avons considéré la température homogène pendant le cycle de frittage. Pour finir, un retour à la température ambiante (25°C) en deux minutes est effectué pour obtenir l'état mécanique de l'assemblage suite au procédé.

Le chargement appliqué à l'assemblage brasé est plus simple. Les contraintes résiduelles apparaissent lors de la phase de refroidissement. Les différentes couches de matériau sont liées et les différences de CTE impliquent la création de contraintes. Nous avons donc appliqué un profil de décroissance de température de 183°C à 25°C uniformément à tout l'assemblage. Les résultats ainsi obtenus sont ensuite comparés afin de déterminer le procédé engendrant le plus de contraintes résiduelles.

Le chargement utilisé pour l'étude de la dissipation thermique a été l'application d'un auto-échauffement dans la puce (commande « *génération interne de chaleur* ») de 12W, puissance injectée lors des essais de mesure de la résistance thermique. Lors de la mesure expérimentale de résistance thermique, la face inférieure du substrat est placée en contact avec une boîte à eau à 25°C. Nous avons donc imposé une température constante de 25°C sur cette face du substrat pendant le calcul. Afin de ne prendre en compte que la conduction au sein de l'assemblage et non la convection avec l'environnement ambiant, les surfaces extérieures de l'assemblage ont été considérées adiabatiques (aucun échange thermique possible). Le coefficient de convection thermique d'un matériau avec l'air est d'environ 10 W/m².°C, il en résulte donc une résistance thermique entre la puce et l'air de 7.10⁺³°C/W (pour une puce de 3,8 x 3,8 mm²). Les expériences ont permis d'obtenir des résistances de l'ordre de 1,7 °C/W, nous obtenons donc un transfert par conduction 400 supérieur à celui par convection, ce qui justifie l'hypothèse effectuée.

3.2.4. Résultats

En mécanique du solide, le critère de Von Mises permet de prédire le début de la zone plastique (zone de déformations irréversibles) pour un matériau contraint. Ce critère prend différentes formes selon le type de contraintes appliquées au matériau. Dans notre cas de chargement uni-axial, le critère de Von Mises est défini comme étant la limite d'élasticité de ce matériau. La fonction solution « *Equivalent stress* » d'Ansys permet d'obtenir la contrainte résultante d'un chargement appliqué. Nous pouvons ensuite la comparer à la limite d'élasticité des matériaux et ainsi de contrôler quels types de contraintes (plastique ou élastique) subit le matériau. La limite d'élasticité des matériaux est une propriété qui dépend des forces de cohésions interatomiques, de la structure cristalline, des dislocations présentes dans le matériau ou des dimensions du matériau. Les valeurs trouvées au cours des recherches bibliographiques (tableau 3.4) sont donc à utiliser avec précaution mais vont permettre de se faire une idée du type de déformations engendrées par le frittage.

Tableau 3.4 : Limite d'élasticité des matériaux présents dans l'assemblage modélisé

	Limite d'élasticité (GPa)	Comportement mécanique
Alumine	15,4	Fragile
Cuivre	0,070	Ductile
Silicium	7	Fragile
Argent	0,035	Ductile

3.2. Evaluation des contraintes résiduelles après frittage et de la dissipation thermique dans un assemblage fritté

Les contraintes maximales obtenues par la modélisation du procédé de frittage varient entre 245 MPa dans les matériaux du substrat (alumine et cuivre), 42 MPa dans la couche d'argent et 80 MPa dans la puce en silicium (figure 3.4). En s'intéressant plus particulièrement à l'état mécanique de la couche d'argent frittée, les contraintes sont situées dans la zone plastique de l'argent (figure 3.5). En effet, les contraintes résiduelles dépassent la limite d'élasticité de l'argent (tableau 3.3). Des déformations irréversibles se sont donc formées au cours du procédé d'assemblage par frittage et cet état mécanique est donc à prendre en considération pour l'étude de l'évaluation de la durée de vie (cf. 3.3).

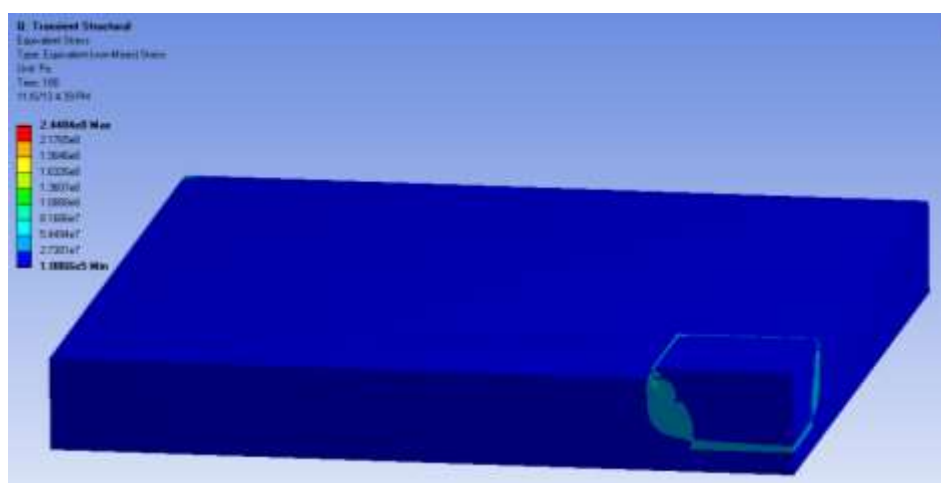


Figure 3.4 : Contraintes résiduelles dans l'assemblage obtenues au cours du procédé de frittage

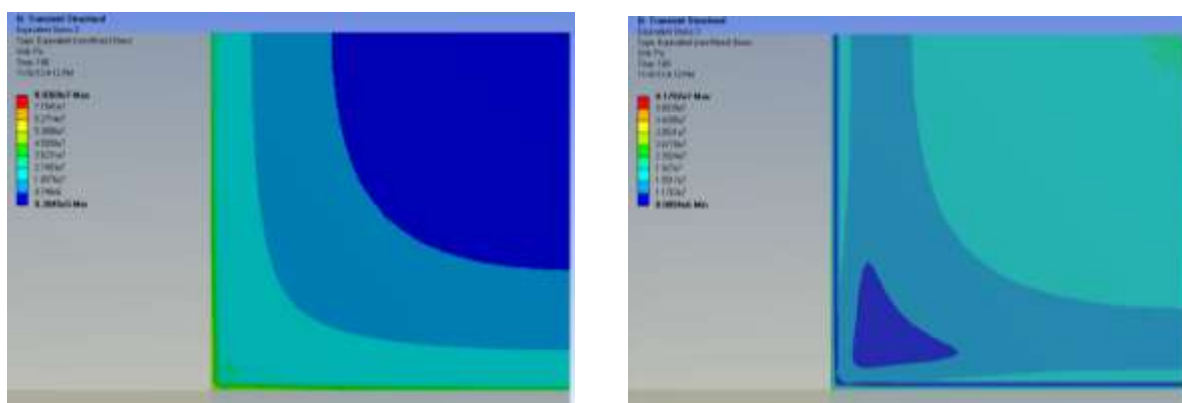


Figure 3.5 : Contraintes résiduelles (vue de dessous) dans la couche d'argent (gauche) et la puce (droite) obtenues au cours du procédé de frittage

La seconde partie de l'étude mécanique a été de comparer les contraintes résiduelles obtenues par le procédé de frittage et celui de brasage. Nous obtenons des contraintes résiduelles de 25 MPa dans la brasure et de 42 MPa dans la couche d'argent fritté. Les contraintes résiduelles pour un joint d'assemblage fritté sont donc supérieures à celle dans un joint d'assemblage brasé. L'état mécanique de l'assemblage résultant du procédé de frittage est donc davantage contraint que celui obtenu avec le procédé de brasage.

La seconde étape a été l'évaluation de la résistance thermique d'un assemblage fritté et de la comparer avec les valeurs mesurées expérimentalement. Les tests menés dans le chapitre 2 (cf. 2.3.2.4) sur des assemblages frittés (diodes $3,8 \times 3,8 \times 0,12 \text{ mm}^3$ reportées sur un substrat DBC Cu) ont permis de mesurer des résistances thermique de l'ordre de $1,66^\circ\text{C/W}$ pour une puissance injectée de 12 W. La modélisation thermique de la résistance thermique a permis d'obtenir une résistance thermique de $0,8^\circ\text{C/W}$ pour l'assemblage modélisé (figure 3.6). Une différence de $0,9^\circ\text{C/W}$ est obtenue entre les caractérisations et la modélisation. Lors de la mesure de la résistance thermique, une graisse thermique est utilisée afin d'obtenir un bon contact entre l'assemblage et la boîte à eau. Cette graisse thermique (Non-silicone heat transfer compound) a une résistance thermique de $0,9^\circ\text{C/W}$ (128). Nous obtenons donc une résistance thermique de $1,7^\circ\text{C/W}$ pour l'assemblage modélisé avec la graisse prise en compte. L'hypothèse de considérer les surfaces extérieures adiabatiques est confirmée (résistance thermique de conduction de $1,7^\circ\text{C/W}$ pour une convection de 700°C/W). De plus, nous obtenons un écart relatif entre l'expérimental et la simulation de 2,5%. Nous avons donc des résultats similaires entre les mesures réelles et la modélisation sous Ansys, ce qui valide notre modèle thermique.

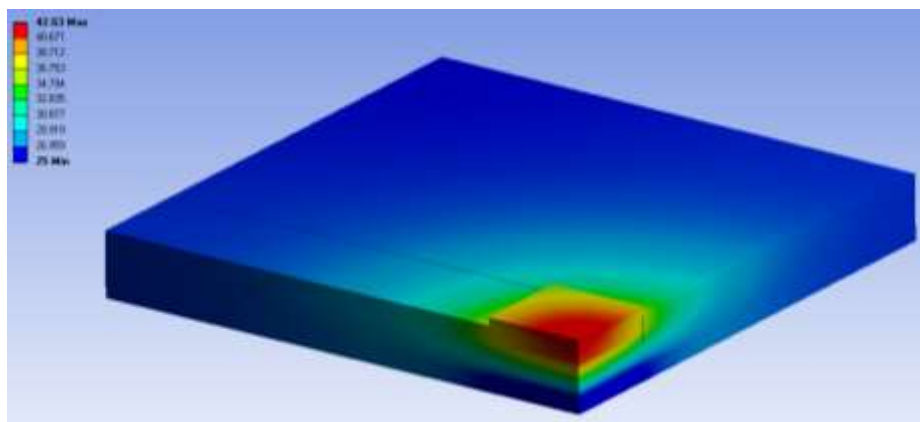


Figure 3.6 : Températures dans un assemblage fritté résultant d'un auto-échauffement de 12 W dans la puce

3.2.5. Conclusion sur la modélisation par éléments finis du procédé de frittage et de la dissipation thermique

Le premier objectif de ce chapitre était d'évaluer les contraintes générées et résiduelles dues au procédé de frittage de pâte d'argent et ensuite de réaliser une étude comparative avec un assemblage brasé. Nous avons donc modélisé les procédés de frittage et de brasage sous Ansys et étudié leurs effets mécaniques sur les assemblages. Dans un premier temps, nous avons pu établir que l'état mécanique résultant du frittage présente des déformations plastiques dans la couche d'argent. Dans un second temps, nous avons déterminé que les contraintes résiduelles sont plus fortes dans les assemblages frittés. Une température de procédé plus élevée et l'application d'une pression peuvent expliquer les contraintes résiduelles plus fortes obtenues dans les assemblages frittés.

Nous avons ensuite étudié le phénomène de dissipation thermique des assemblages frittés dans le but de corréler les mesures expérimentales avec les simulations numériques. La modélisation thermique nous a permis de valider notre modèle thermique de l'assemblage fritté. En effet, nous avons obtenu un écart relatif de 2,5% avec les mesures expérimentales de la résistance thermique.

3.3. Evaluation de la durée de vie d'un assemblage fritté

3.3.1. Introduction

L'objectif de cette partie est d'étudier le comportement thermomécanique des assemblages de puissance et ainsi d'estimer leur durée de vie. L'évaluation de la durée de vie est un procédé en deux volets et plusieurs étapes (figure 3.7). Dans un premier temps, nous exploitons le volet expérimental qui consiste à réaliser un vieillissement accéléré d'assemblages représentatifs (cf. chapitre 2). Ces essais nous permettent d'obtenir le nombre de cycles à défaillance des assemblages. Dans un second temps, nous réalisons le volet simulations numériques. Une série de modélisations par éléments finis sur le même type d'assemblage est effectuée et un indicateur caractéristique du vieillissement accéléré des assemblages en est extrait par corrélation avec les essais expérimentaux. En parallèle, nous menons une démarche identique avec un profil de mission représentatif du fonctionnement réel des assemblages. Au final, nous obtenons un indicateur de la fatigue des assemblages de

puissance pour les deux types de modélisations par éléments finis (vieillessement accéléré et profil de mission). Pour finir, nous effectuons une corrélation entre les deux indicateurs de la fatigue des assemblages obtenus par les modélisations du profil de mission et des vieillissements accélérés. Ainsi nous pouvons estimer la durée de vie des assemblages pour un profil de mission donné.

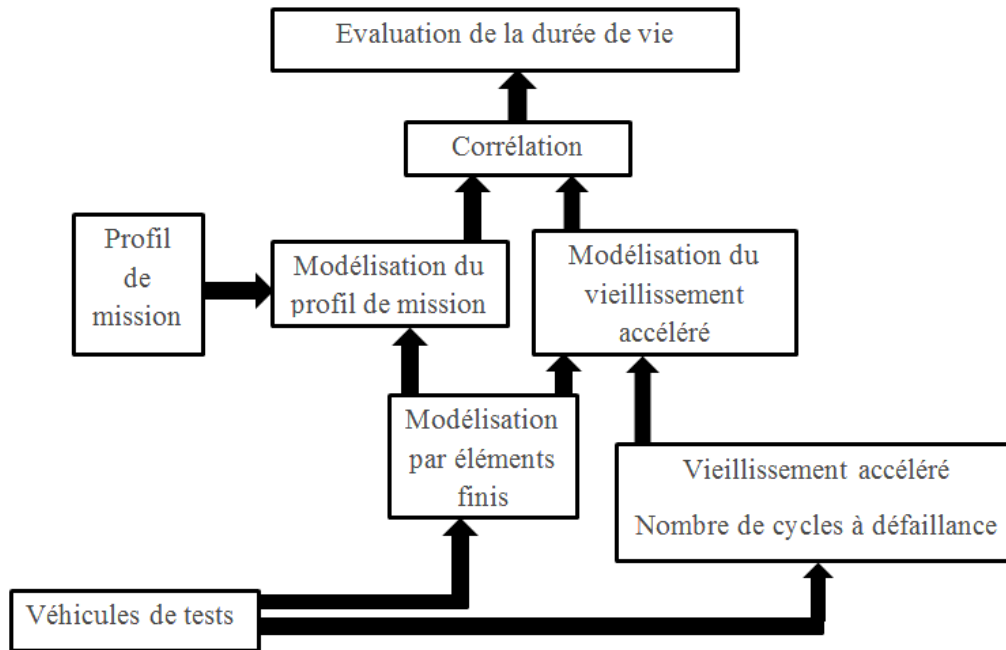


Figure 3.7 : Méthodologie utilisée afin d'évaluer la durée de vie des assemblages de puissance (129)

Les brasures des assemblages sont les zones les plus sensibles à la fatigue thermique de par la dépendance de leurs propriétés avec la température et de leur comportement viscoplastique. Elles sont le lieu de création et de propagation de fissures dues à des contraintes thermomécaniques qui entraînent la défaillance des assemblages de puissance. Les études de modélisation par éléments finis du comportement thermomécanique des assemblages de puissance sont donc centrées sur la fatigue engendrée dans la brasure. La densité d'énergie de déformation (DED en J/m^3) est l'indicateur caractéristique qui permet de suivre l'évolution de la fatigue thermique des brasures. Cette grandeur permet de quantifier l'accumulation de déformations engendrées par les variations de températures au cours du vieillissement. Par analogie, nous effectuons l'hypothèse que la couche d'argent d'assemblages de puissance fritté possède un comportement thermomécanique similaire. En effet, il a été montré que les couches d'argent frittées ont également un comportement dépendant de la température et que le modèle proposé par Anand permet de modéliser le comportement viscoplastique pour les températures de vieillissement généralement utilisées

en électronique (126). Les simulations numériques vont donc nous permettre de déterminer la DED accumulée dans la couche d'argent après avoir défini le modèle de Anand pour l'argent fritté.

Neuf constantes permettent de définir la cinétique de déformation du modèle de Anand au travers de trois équations (3.3, 3.4 et 3.5) : la première caractérise la vitesse de déformation plastique, la seconde la vitesse de résistance à la déformation plastique et la troisième la valeur de saturation de la résistance à la déformation (130).

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = A \cdot e^{\frac{-Q}{R.T}} \cdot \left[\sinh \left(\frac{\sigma \cdot \xi}{s} \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.3)$$

$$\dot{s} = \left[ho \cdot \left| 1 - \frac{s}{\hat{s}} \right|^a \cdot \text{sign} \left(1 - \frac{s}{\hat{s}} \right) \right] \cdot \frac{d\epsilon_p}{dt} \quad (3.4)$$

$$\dot{s} = \hat{s} \cdot \left(\frac{\epsilon_p}{A} \cdot e^{\frac{Q}{R.T}} \right)^n \quad (3.5)$$

Avec :

ϵ_p : taux de déformation plastique (sans dimension)

A : facteur pré-exponentiel (s^{-1})

Q : énergie d'activation (kJ/mol)

R : constante des gaz parfaits (kJ/mol.K)

T : température (K)

σ : contrainte équivalente (Pa)

ξ : Multiplicateur de contraintes (sans dimension)

s : résistance à la déformation (Pa^{-1})

m : sensibilité à la contrainte de la vitesse de déformation (sans dimension)

ho : constante de durcissement/adoucissement (MPa)

$\hat{s}$: vitesse de résistance à la déformation ($Pa.s^{-1}$)

a : sensibilité de la consolidation ou de l'adoucissement avec la vitesse de déformation (sans dimension)

$\hat{s}$: coefficient de la valeur de saturation de la résistance à la déformation (MPa)

n : sensibilité à la vitesse de déformation de la valeur de saturation de la résistance à la déformation (sans dimension)

Une série de caractérisations mécaniques est nécessaire pour obtenir les constantes du modèle de Anand (130). Ces essais n'ont pas été réalisés et le modèle utilisé a été basé sur les paramètres issus d'une publication sur la pâte d'argent nanométrique NBETech (126). La modélisation du comportement thermomécanique des assemblages frittés s'est appuyée sur les constantes ainsi que sur les variations du module d'Young avec la température (tableau 3.5 et 3.6).

Tableau 3.5 : Constantes du modèle de Anand pour une couche d'argent nanométrique fritté (126)

Constante	A (s ⁻¹)	Q (J/mol)	m	n	ξ	$\hat{s}$ (MPa)	ho (MPa)	so (MPa)	a
Valeur	9,81	47442	0,56720	0,00326	11	67,389	15800	2768	1

Tableau 3.6 : Variations du module d'Young en fonction de la température pour une couche d'argent nanométrique fritté (126)

Température (°C)	-40	0	25	60	120	150
Module d'Young (GPa)	9,01	7,96	6,28	4,52	2,64	1,58

3.3.2. Modèle utilisé

L'étude menée ici reprend le modèle développé lors de la précédente étude (cf. 3.2) ainsi que le maillage optimisé. De plus, comme nous l'avons vu lors de l'étude précédente, les contraintes résiduelles dues au frittage engendrent des déformations plastiques dans l'assemblage. Cet état mécanique de l'assemblage a donc été pris en compte en tant que conditions de départ de cette étude sur l'évaluation de la durée de vie.

3.3.3. Modélisation du vieillissement accéléré

Le vieillissement accéléré de type choc à des températures de -40°C et +125°C avec des paliers de 30 minutes a été utilisé pour étudier le comportement thermomécanique des

assemblages (cf. chapitre 2). Le but est de modéliser ces essais et de quantifier la DED s'accumulant dans la couche d'argent (J/m^3), indicateur de la fatigue accumulée au cours des cycles de vieillissement. Cette DED est obtenue pour le cycle de vieillissement accéléré et le profil de mission modélisé par éléments finis. Ensuite, par corrélation, une évaluation de la durée de vie d'un assemblage est déterminée comme nous le verrons par la suite.

La première étape est de modéliser le vieillissement accéléré en utilisant l'outil de calcul numérique Ansys en partant de l'état mécanique obtenu après le procédé de frittage. Nous appliquons à notre modèle un stockage de trois mois à 25°C puis un profil de température cyclique (figure 3.8) en considérant la température uniforme dans l'assemblage à tout instant du cycle. Le but n'est pas de modéliser le nombre de cycle obtenus à défaillance (6000 cycles dans notre cas) mais de définir une loi d'évolution à partir de la modélisation de seulement cinq cycles (figure 3.8). Ensuite, cette loi est extrapolée et permet de définir la DED accumulée pour le nombre de cycles à défaillance.

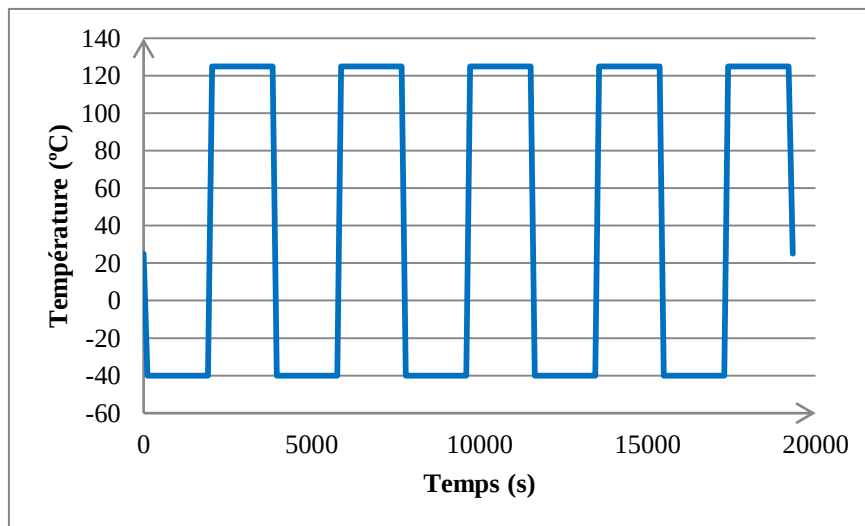


Figure 3.8 : Cycles de vieillissement

La DED est déterminée dans la couche d'argent par le biais de la fonction résultat « NLPLWK » (Plastic Work / Volume) (figure 3.9). L'observation de la répartition de cette énergie de déformation permet de voir que la DED est maximale dans le bord extérieur de la puce. C'est dans cette zone que les fissures se propagent comme peuvent nous le montrer des analyses optiques d'assemblages brasés. Par extrapolation, nous pouvons nous attendre à ce que les défaillances dans les véhicules de tests frittés aient un mécanisme et une zone de propagation similaire à celui des assemblages brasés.

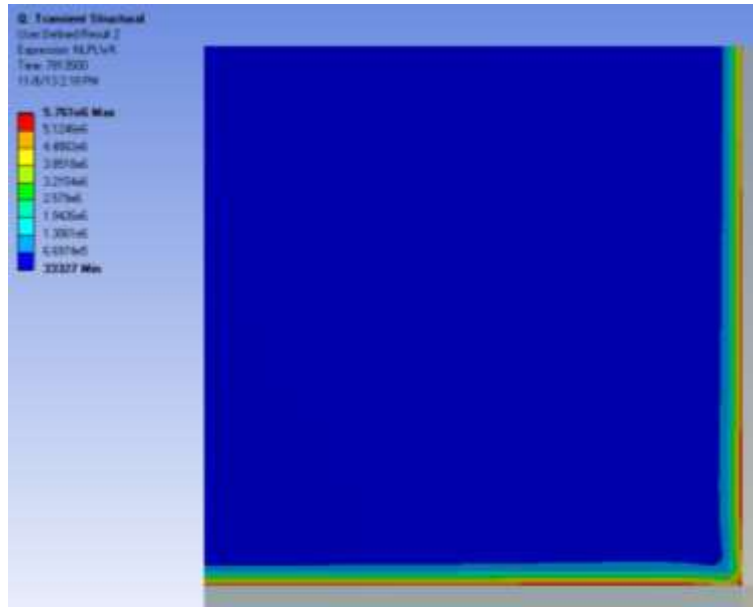


Figure 3.9 : DED accumulée dans la couche d'argent d'un assemblage fritté - la couche d'argent est divisée verticalement en quatre éléments identiques

La DED maximale de la couche d'argent (figure 3.9) a été utilisée pour obtenir une loi d'évolution caractéristique de la fatigue thermique. La figure 3.10 représente l'accumulation de DED sur cinq cycles de vieillissement. Cette accumulation est représentée d'une seconde façon cycle par cycle (figure 3.11) et permet d'observer une stabilisation rapide de la DED accumulée à chaque cycle. La DED résiduelle accumulée suite au frittage et au stockage est également représentée sur la figure 3.11. Nous pouvons donc définir la loi simple d'accumulation de DED suivante en se basant sur les modélisations du frittage, du stockage et des vieillissements accélérés (3.6).

$$DED_f = 5,35.10^{+05} \times (N_f - 1) + 2,89.10^{+6} \text{ J/m}^3 \quad (3.6)$$

Cette loi d'accumulation, nous permet de définir l'accumulation de DED dans la couche d'argent pour les assemblages frittés vieillis. Après 6000 cycles, les véhicules de tests frittés ont accumulé une $DED_{f(6000 \text{ cycles})}$ de l'ordre de $3,21.10^{+9} \text{ J/m}^3$. Cette valeur caractéristique du vieillissement des assemblages frittés bien qu'obtenue sans défaillance a été comparée à celle obtenue avec la modélisation du profil de mission comme nous le verrons par la suite (cf. 3.3.4).

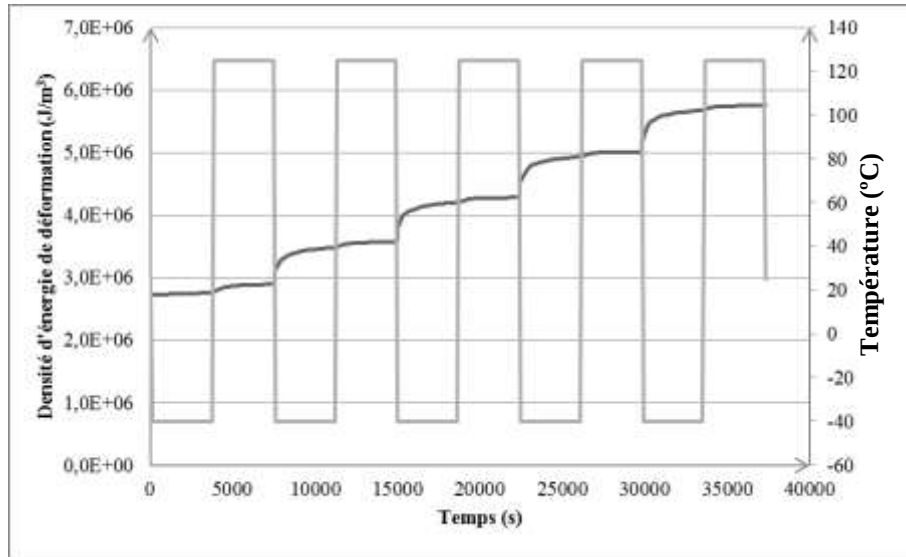


Figure 3.10 : DED accumulée au cours de cinq cycles de vieillissement accéléré - cycle de température appliqué au cours de vieillissement

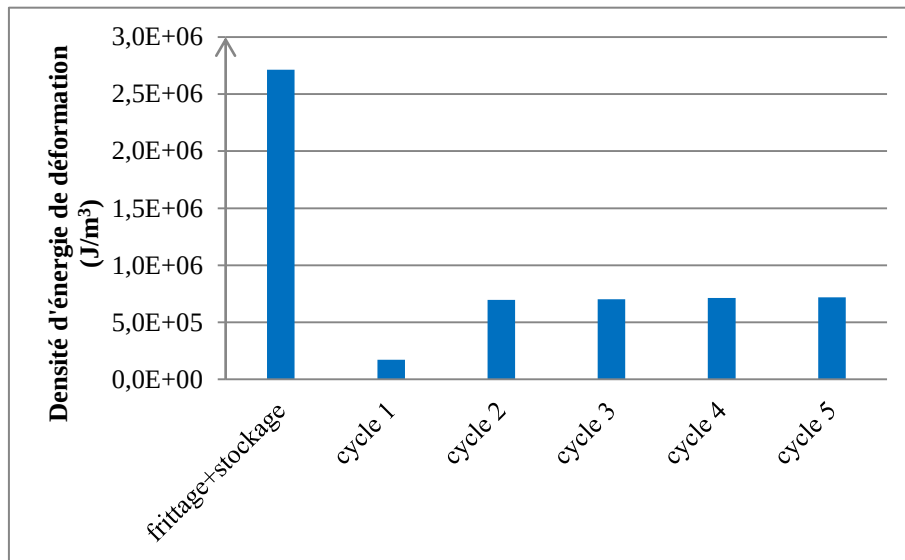


Figure 3.11 : DED accumulée à chaque cycle

3.3.4. Modélisation du profil de mission

Le choix du profil de mission influence grandement les résultats des tests réels et des modélisations numériques. Dans le cadre du projet FIDEA, des essais de type extra-urbain normalisés ont été effectués sur une voiture électrique sur le circuit d'Albi (France) pour la société Actia Automotive. Des relevés de températures ont ainsi été obtenus pour les IGBT d'assemblages de puissance présents dans la partie électrique de la voiture (figure 3.12). Ce profil de mission a été modélisé sous Ansys en utilisant la géométrie et les paramètres de matériaux définis précédemment (figure 3.7 et tableaux 3.2, 3.4 et 3.5).

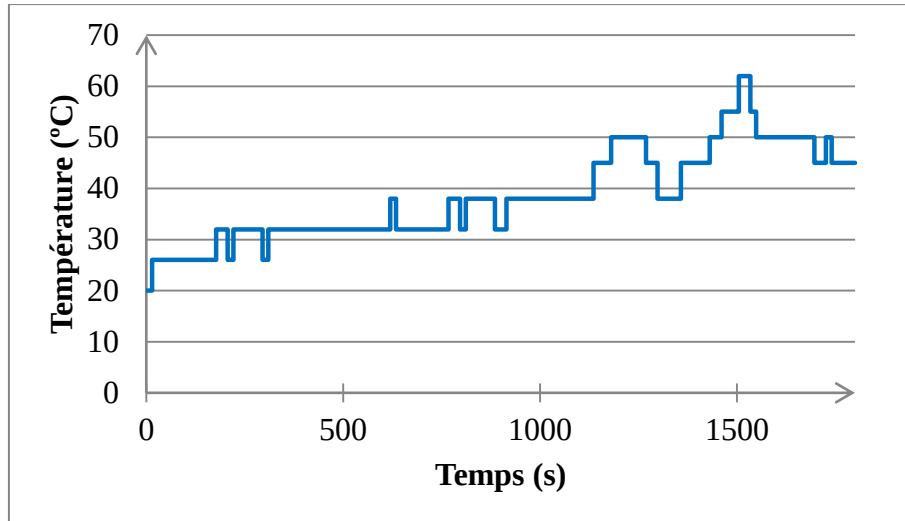


Figure 3.12 : Profil de mission de type extra-urbain réalisé par la société Actia Automotive

Comme pour la modélisation du vieillissement accéléré, la DED maximale dans la couche d'argent frittée est obtenue dans la singularité géométrique à l'interface argent/substrat. La zone la plus stressée ainsi définie, nous obtenons une DED de $2,7.10^{+6} \text{ J/m}^3$ pour le frittage, le stockage et le profil de mission de 30 minutes dans un assemblage fritté (figure 3.13). La majeure partie de cette DED accumulée provient du refroidissement suite au frittage ($DED_{résiduelle} = 2,71.10^{+06} \text{ J/m}^3$). Le profil de mission engendre une accumulation de 600 J/m^3 ($DED_{mission}$) de DED dans la couche d'argent. Nous obtenons donc la loi d'évolution suivante pour Nm profils de mission (3.7).

$$DED_{\text{profil}} (\text{Nm profils}) = 2,71.10^{+06} + 600.\text{Nm } \text{J/m}^3 \quad (3.7)$$

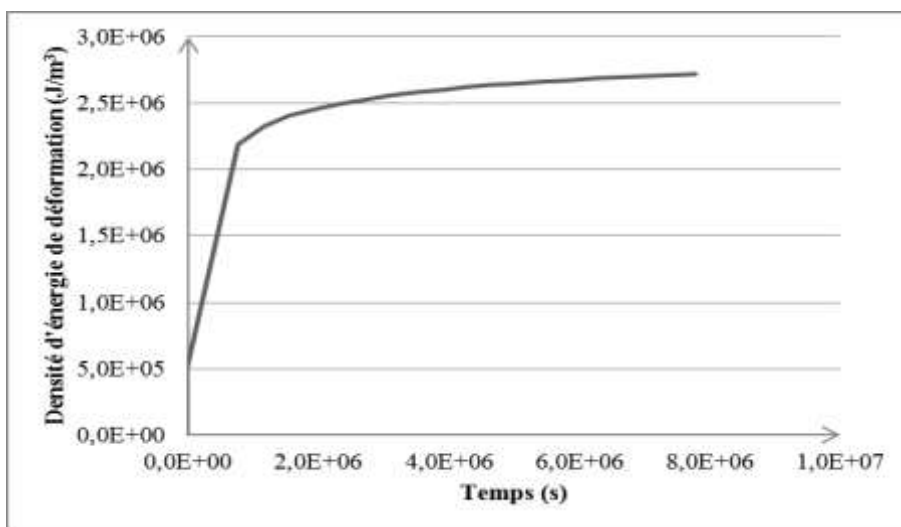


Figure 3.13 : Densité d'énergie de déformation accumulée dans la couche d'argent suite au frittage, stockage et profil de mission

3.3.5. Conclusion sur l'évaluation de la durée de vie d'un assemblage fritté

L'évaluation de la durée de vie d'assemblage de puissance adopte une méthodologie bien précise que nous avons suivie pour analyser la fatigue thermique des assemblages. Le volet expérimental a été présenté dans le chapitre 2 et nous a permis de définir le nombre de cycle de vieillissement à partir duquel les assemblages entrent en défaillance (cf. 2.3.2.4). Les modélisations par éléments finis, nous ont ensuite permis de définir une loi d'évolution de la DED (3.6), indicateur représentatif de la fatigue thermique. Pour les 6000 cycles de vieillissement effectués sur ces assemblages frittés, nous obtenons une accumulation de DED de $3,21.10^{+9} \text{ J/m}^3$ (DED_f).

$$DED_f = 5,35.10^{+05} \times (N_f - 1) + 2,89.10^{+6} \text{ J/m}^3 \quad (3.6)$$

L'analyse de la modélisation du profil de mission, nous a permis d'évaluer une DED de 600 J/m^3 obtenue pour un cycle de 30 minutes ($DED_{mission}$). et une loi d'évolution de la DED en fonction de la $DED_{résiduelle}$ due au frittage et au stockage et de la $DED_{mission}$ due au profil de mission (3.7).

$$DED_{fprofil} = 2,71.10^{+06} + 600.N_m \text{ J/m}^3 \quad (3.7)$$

Par extrapolation, la DED menant à la défaillance des assemblages peut être définie comme suit (3.8) avec n représentant le nombre de profils de mission nécessaires pour atteindre DED_f et obtenir la défaillance des assemblages. Dans notre cas, le profil de mission a une durée de 30 minutes, il est donc nécessaire de prendre la moitié de n afin d'obtenir la durée de vie en fonctionnement (tf) des assemblages en heures (3.9).

$$DED_{f(6000 \text{ cycles})} = DED_{résiduelle} + n.DED_{mission} \quad (3.8)$$

$$tf = \frac{n}{2} = \frac{DED_{f(6000 \text{ cycles})} - DED_{résiduelle}}{2 \times DED_{fprofil}} \quad (3.9)$$

Les assemblages de puissance frittés soumis à vieillissement accéléré n'ont pas permis d'obtenir un nombre de cycles à défaillance, 6000 cycles de vieillissement ont été effectués sans l'obtention de défaillance. L'évaluation de la durée de vie en fonctionnement (tf) est donc inexacte et n'est donnée qu'à titre informatif : $tf = 30 \text{ ans}$.

De plus, nous avons fait l'hypothèse que la couche d'argent était la zone la plus sensible thermomécaniquement de l'assemblage pour notre étude. Or, les analyses optiques des

véhicules de tests (cf. 2.3.2.5.) ont permis de définir une nouvelle zone sensible. En effet, les défaillances obtenues étaient toutes situées dans le substrat et provenait de la singularité géométrique de l'interface métallisation/céramique. Le modèle utilisé ne prenant en compte que la fatigue des joints d'assemblages n'est donc plus valide pour les assemblages frittés de notre étude car il ne permet pas de prédire la fissuration de la céramique ou le délaminage de la métallisation.

3.4. Evaluation de l'influence de la porosité de la couche d'argent

3.4.1. Introduction

Le comportement physique d'une microstructure est influencée par de nombreux paramètres comme la structure cristalline, les dimensions, la taille des particules ou encore la porosité. Le procédé de frittage en phase solide se compose de deux phénomènes physiques : la cohésion et la densification. La structure frittée obtenue par ce procédé possède une porosité contrôlée par les paramètres de frittage (cf. 1.4.1.). Les caractérisations des propriétés thermomécaniques d'une couche d'argent frittée menées par le laboratoire PPrime, au sein du projet FIDEA, ont montré cette dépendance vis-à-vis de la porosité. Par exemple le module d'Young est une fonction de la porosité de la couche d'argent (figure 3.14). Nous avons décidé de mener une étude sur l'impact thermique et mécanique de la porosité dans le but de quantifier cette influence par le biais de la modélisation par éléments finis.

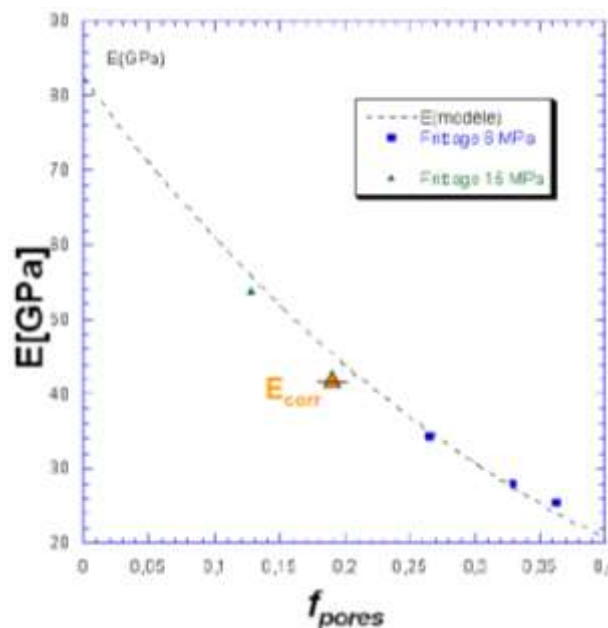


Figure 3.14 : Module d'Young d'une couche d'argent frittée en fonction de la porosité (f_{pores} représente la fraction de porosité) - Essais menés par PPrime au sein du projet FIDEA

3.4.2. Modèle utilisé

La sélection d'une géométrie représentative d'un modèle d'assemblage fritté a été une étape complexe. En effet, il s'est avéré que le placement aléatoire des pores sur une géométrie avec une grande disparité de dimensions (géométrie 2D utilisée dans l'étude précédente : couche d'argent de $25\mu\text{m}$ par 4 mm - figure 3.15) complexifie grandement la géométrie. Pour modéliser une porosité de 20%, environ 6300 pores de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre sont à « placer » aléatoirement. Nous avons donc choisi de représenter l'assemblage par l'empilement de trois couches (puce, couche d'argent et substrat en cuivre) de 100 cm^2 de surface. L'étape suivante a été de choisir les différents diamètres de pores ainsi que les fractions de porosité à modéliser. Cinq fractions de porosité (de 2,5% à 25%) et cinq diamètres de pores (de $0,1\text{ mm}$ à $0,5\text{ mm}$), soient 25 simulations, ont été modélisées et maillées ; ci-dessous cinq exemples de géométries poreuses (figure 3.15). Les diamètres des pores choisis pour représenter la porosité ne sont pas en accord avec une structure réelle dans une couche frittée. En effet, les pores d'une couche frittée sont de l'ordre du micromètre voire du nanomètre. Mais, le but de l'étude est d'obtenir une tendance de l'influence de la porosité sur les performances thermiques et mécaniques d'un assemblage. Ainsi pour ne pas complexifier la géométrie (afin d'avoir des temps de calcul raisonnables - quelques heures), nous avons donc choisi de représenter les pores avec des diamètres de l'ordre de la centaine de micromètres. Les propriétés des matériaux ont été celles utilisées pour les modélisations précédentes (tableau 3.2 et 3.3).

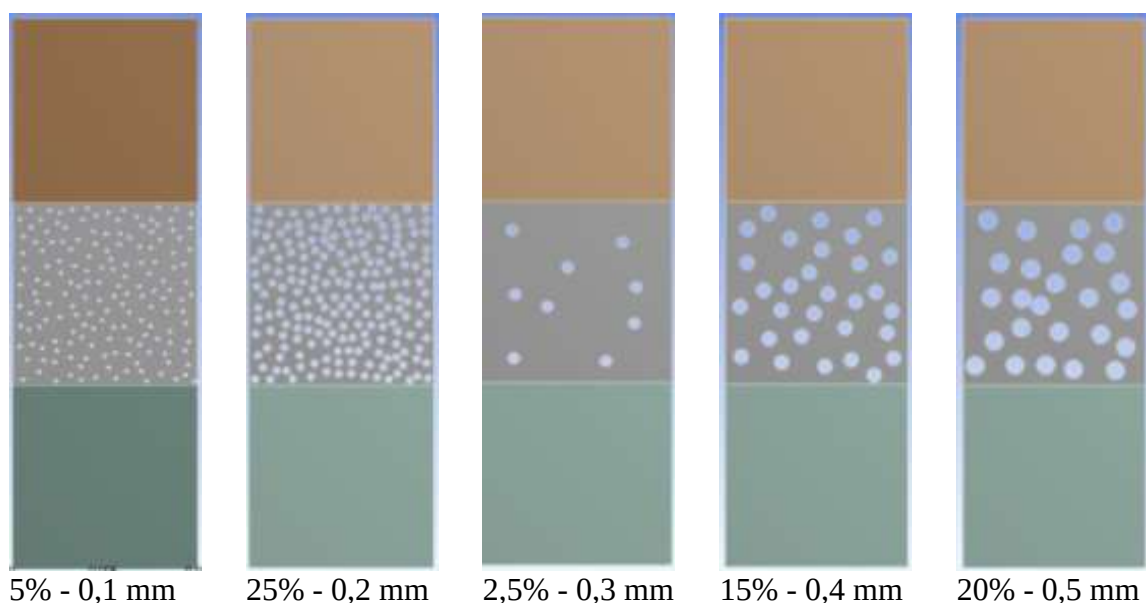


Figure 3.15 : Exemples de géométries poreuses

3.4.3. Paramètres de calcul

Deux aspects ont été étudiés au cours de la modélisation de la porosité d'une couche d'argent dans un assemblage : la réponse thermique à un auto-échauffement et la réponse mécanique à un chargement de type cisaillement.

Pour l'étude thermique, nous avons utilisé les hypothèses présentées lors de la première étude sur la réponse thermique d'un assemblage fritté à l'auto-échauffement (cf. 3.1). L'arête inférieure de la géométrie est considérée à une température constante de 25°C (modélisation de l'échange thermique avec la boîte à eau). Les arêtes extérieures de l'assemblage sont définies comme étant adiabatiques (hypothèse assurant un transfert thermique par conduction entre les matériaux et non par convection avec l'air) et un chargement d'auto-échauffement de 20 W est appliquée dans la puce.

Pour la partie mécanique de cette étude, une force horizontale de 500 N est appliquée sur l'arête gauche de la puce dans le but de modéliser le cisaillement de la puce. L'arête inférieure du substrat a été imposée comme fixe.

3.4.4. Résultats

Les différentes modélisations par éléments finis réalisées ont permis d'aboutir aux résultats suivants (tableau 3.7 et 3.8). La résistance thermique des assemblages augmente de façon linéaire avec la fraction de porosité de la couche d'argent, ce résultat était attendu (figure 3.16). En effet, pour une fraction de porosité élevée, les zones d'échanges thermiques sont réduites et la conduction thermique est donc défavorisée. Nous observons également que pour une fraction de porosité donnée, la résistance thermique augmente très légèrement avec le diamètre des pores mais que la distribution des pores n'a pas d'effet (figure 3.17).

Les contraintes de cisaillement résultantes du chargement ne suivent pas une loi linéaire comme nous avons pu le constater pour la résistance thermique (figures 3.18 et 3.19). La microstructure de la couche d'argent étant aléatoire et donc différente pour une porosité et un diamètre de pores donné, le comportement mécanique (résistance, modules d'élasticité) est très différent d'une configuration à une autre (131). La contrainte de cisaillement obtenue peut varier du simple au double selon la distribution des pores à porosité et diamètres de pores égaux (figure 3.20). Les contraintes de cisaillement augmentent avec la fraction de porosité et évoluent aléatoirement avec la distribution des pores. De plus, l'augmentation du

diamètre de pores semble induire une diminution des contraintes de cisaillement dans l'assemblage (figure 3.19).

Tableau 3.7 : Résistance thermique d'assemblage fritté en fonction de la fraction de porosité et du diamètre des pores de la couche d'argent

Porosité (%)	2,5	5	10	15	20	25
Diamètre des pores (mm)	Rth (°C/W)	Rth (°C/W)	Rth (°C/W)	Rth (°C/W)	Rth (°C/W)	Rth (°C/W)
0,1	14,48	14,72	15,32	15,95	16,73	17,57
0,2	14,48	14,75	15,3	16,01	16,74	17,57
0,3	14,49	14,76	15,33	16,04	16,75	17,61
0,4	14,49	14,76	15,38	16,02	16,79	17,71
0,5	14,47	14,71	15,37	15,97	16,73	17,8

Tableau 3.8 : Tenue mécanique au cisaillement d'assemblage fritté en fonction de la fraction de porosité et du diamètre des pores de la couche d'argent

Porosité (%)	2,5	5	10	15	20	25
Diamètre des pores (mm)	Tenue mécanique (MPa)	Tenue mécanique (MPa)	Tenue mécanique (MPa)	Tenue mécanique (MPa)	Tenue mécanique (MPa)	Tenue mécanique (MPa)
0,1	0,673	0,779	0,722	0,891	1,449	1,473
0,2	0,519	0,534	0,686	1,066	1,074	1,273
0,3	0,520	0,538	0,738	1,557	1,387	1,175
0,4	0,521	0,839	0,927	0,834	0,785	1,943
0,5	0,518	0,518	0,601	1,198	1,423	1,536

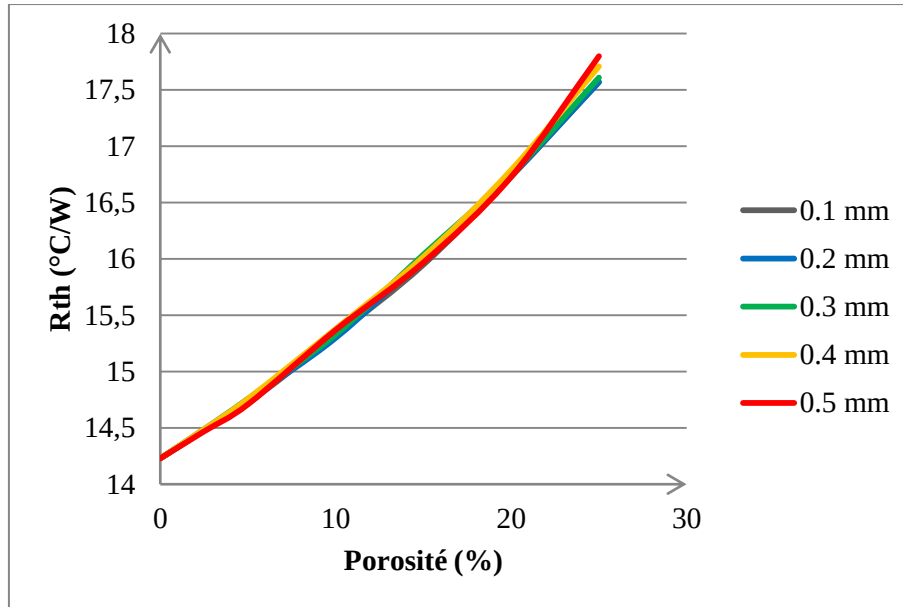


Figure 3.16 : Résistance thermique en fonction de la porosité pour différents diamètres de pores

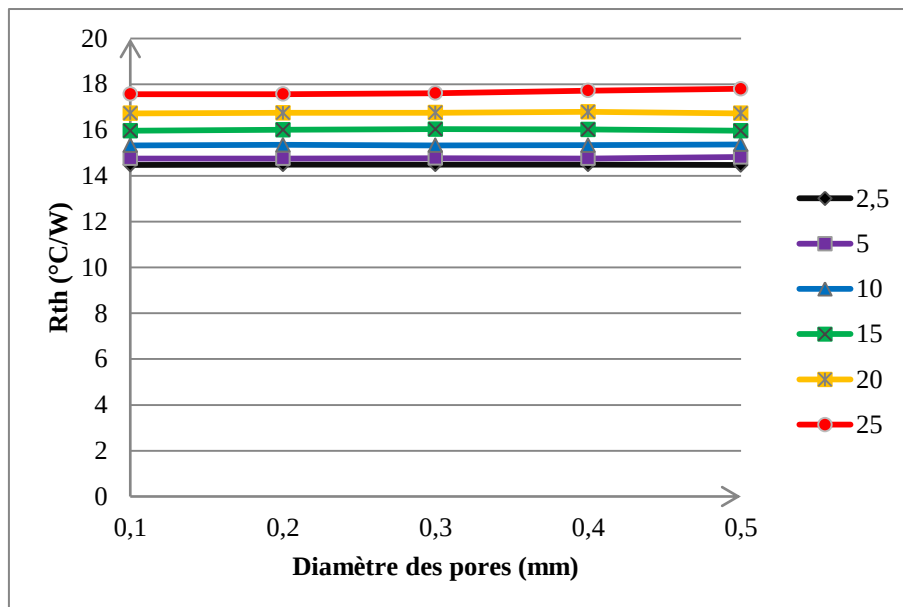


Figure 3.17 : Résistance thermique en fonction du diamètre des pores pour différentes fraction de porosité

3.4. Evaluation de l'influence de la porosité de la couche d'argent

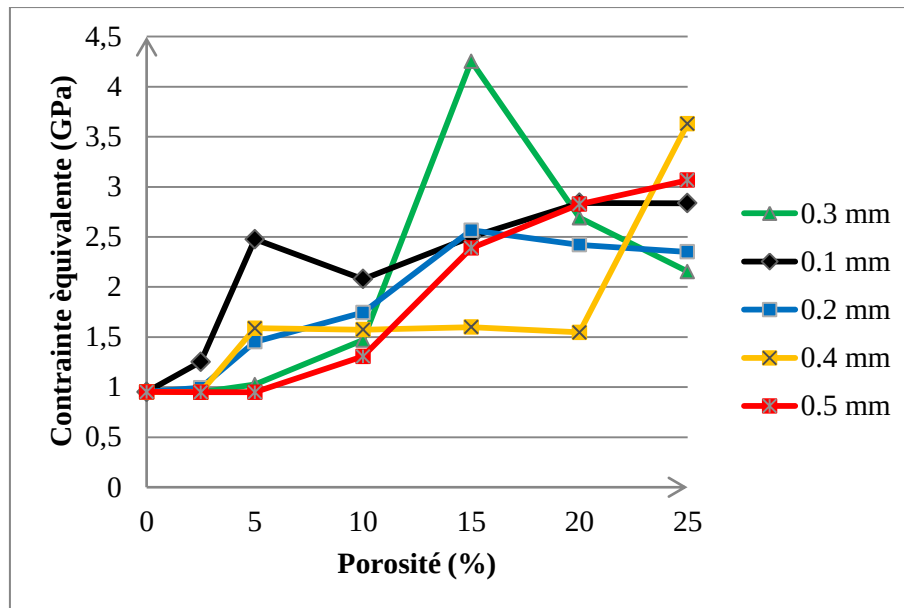


Figure 3.18 : Tenue mécanique au cisaillement en fonction de la porosité pour différents diamètre des pores

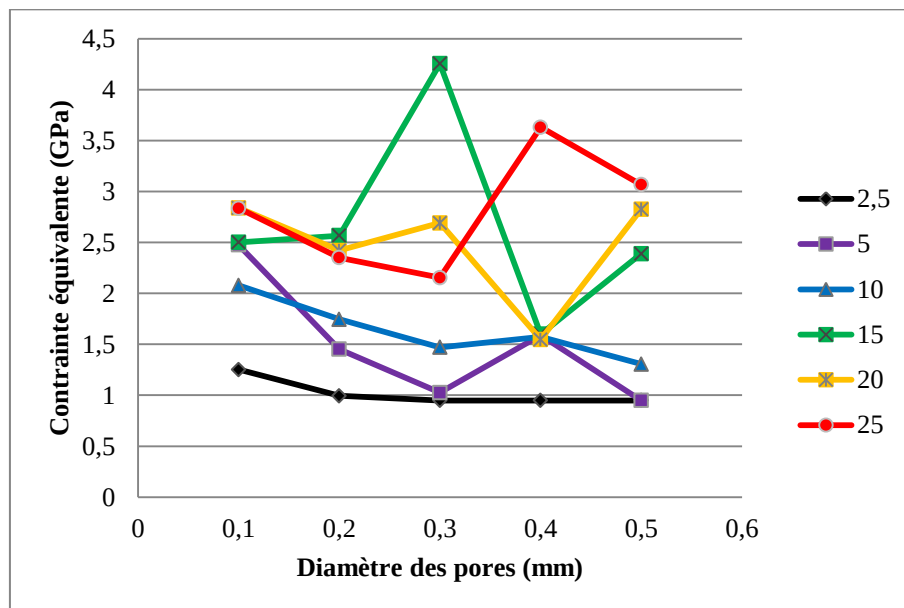


Figure 3.19 : Tenue mécanique au cisaillement en fonction du diamètre des pores pour différentes fraction de porosité

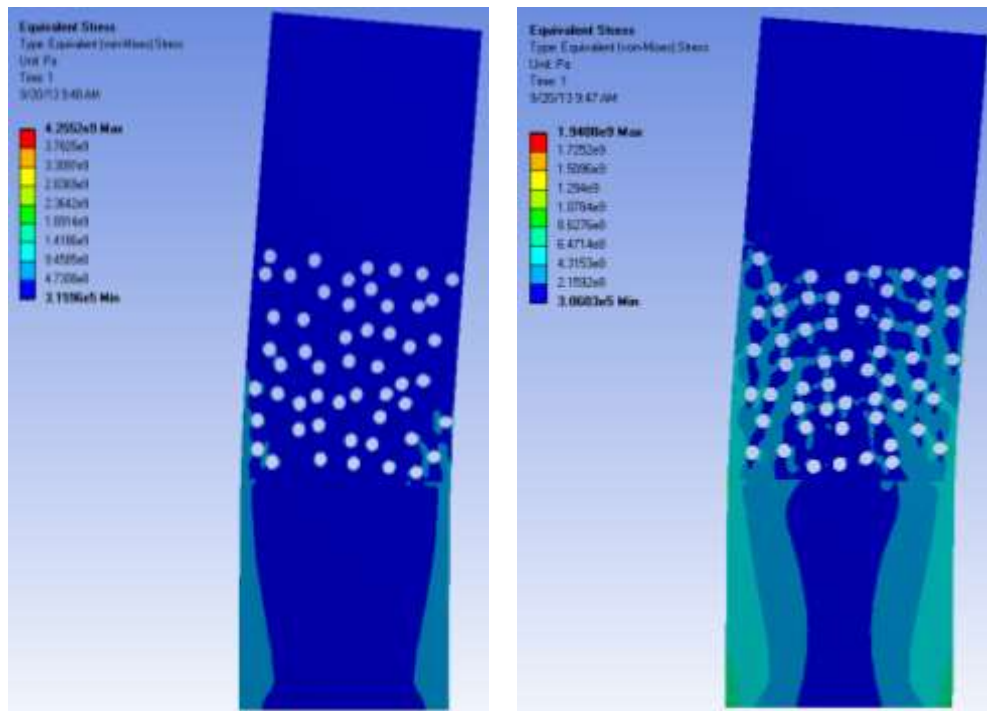


Figure 3.20 : Contraintes équivalentes pour deux distributions aléatoires de pores avec un diamètre de pores et une porosité identiques

3.4.5. Conclusion sur l'influence de la porosité de la couche d'argent

Comme le laboratoire PPrime a pu le constater, les propriétés mécaniques et thermiques d'une couche d'argent frittée sont influencées par la fraction de porosité et le diamètre de pores ainsi que par la distribution de ceux-ci dans le matériau. En effet, les modélisations par éléments finis effectuées ont permis de montrer que l'augmentation de la fraction de porosité accroît la résistance thermique de l'assemblage mais que le diamètre des pores n'a que peu d'influence. De même, les contraintes résultantes d'un essai de cisaillement sur la puce augmentent avec la fraction de porosité, diminuent avec le diamètre des pores et sont fortement dépendant de la distribution des pores. Cette dépendance vis-à-vis de la porosité a été également observée lors de vieillissement accéléré d'assemblages frittés (cf. 2.3.). En effet, l'écart type des mesures de résistances thermiques a diminué au fur et à mesure des vieillissements. Des informations données par les fabricants et les observations optiques réalisées lors de cette étude, ont montré une modification de la microstructure de la couche d'argent au fur et à mesure des cycles de températures du vieillissement. Une réorganisation de la structure de la couche d'argent est observée et permet d'obtenir de meilleures propriétés thermiques (résistance) et mécaniques (module d'Young).

3.5. Evaluation du comportement thermique d'un assemblage double face par rapport à un assemblage simple

3.5.1. Introduction

Les secteurs de l'automobile, de l'aviation et du ferroviaire possèdent de plus en plus de systèmes électroniques embarqués situés dans des environnements de plus en plus sévères thermiquement (température supérieure à 200°C). Les assemblages de puissance ont donc besoin de dissiper plus efficacement la chaleur engendrée par de l'auto-échauffement en fonctionnement. En effet, les puces semi-conductrices en silicium voient leurs propriétés modifiées voire dégradées pour des températures de fonctionnement supérieures à 200°C. Plusieurs solutions sont envisagées, comme l'utilisation de nouveaux matériaux coûteux pour fabriquer les puces (GaN ou SiC, ayant des températures de fonctionnement plus élevées). Une autre solution est l'utilisation d'assemblages double face qui permet d'assurer une dissipation thermique sur deux faces de la puce et ainsi de réduire la température de jonction de la puce pour une même puissance dissipée. Un assemblage double face est représenté comme une puce mise en sandwich entre deux substrats sans connexion électrique via des fils de câblage (figure 3.22).

L'objectif de cette étude est donc d'analyser les contraintes résiduelles obtenues lors du procédé de frittage sur un assemblage double face et d'évaluer la résistance thermique de cet assemblage. Une comparaison avec un assemblage simple face a été effectuée également.

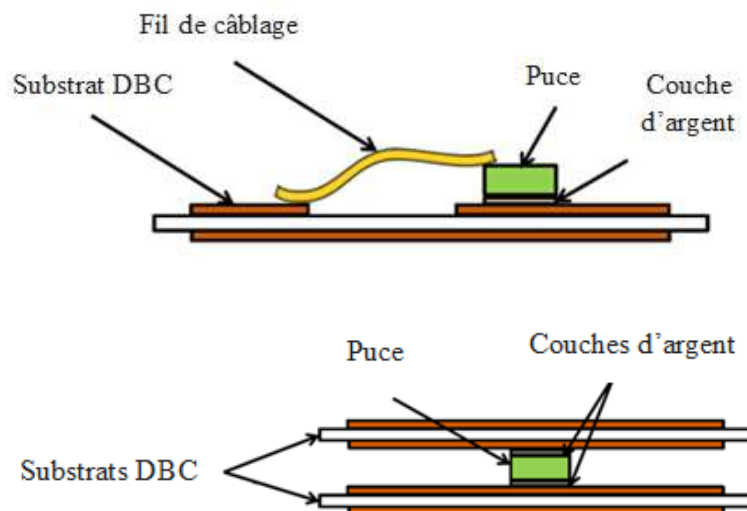


Figure 3.21 : Représentation schématique d'un assemblage classique et d'un assemblage double face

3.5.2. Modèle utilisé

L'assemblage double face est un empilement 3D d'un substrat (cuivre/alumine/cuivre), d'une couche d'argent fritté, d'une puce, d'une couche d'argent fritté et d'un second substrat (figure 3.21). L'assemblage simple face est l'empilement 3D d'un substrat, d'une couche d'argent fritté et d'une puce. Les assemblages, réalisés expérimentalement, ont été modélisés et maillés sous Ansys (figures 3.22 et 3.23). Les propriétés des différents matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau 3.9. Nous avons choisi différents matériaux pour la céramique (Al_2O_3 , AlN , Si_3N_4) dans le but d'étudier leurs effets sur les propriétés thermiques et mécaniques.

Tableau 3.9 : Propriétés des matériaux utilisés

Matériau	Densité (Kg.m^{-3})	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)	Chaleur spécifique ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)	CTE (ppm/°C^{-1})
Si	2300	130	0,28	150	700	2,8
Ag	8500	30	0,25	200	100	19,6
Cu	8950	124	0,34	390	385	16,9
Al_2O_3	3900	390	0,25	28	820	8,1
AlN	3260	330	0,24	160	740	4,5
Si_3N_4	3270	300	0,24	29	740	3,3

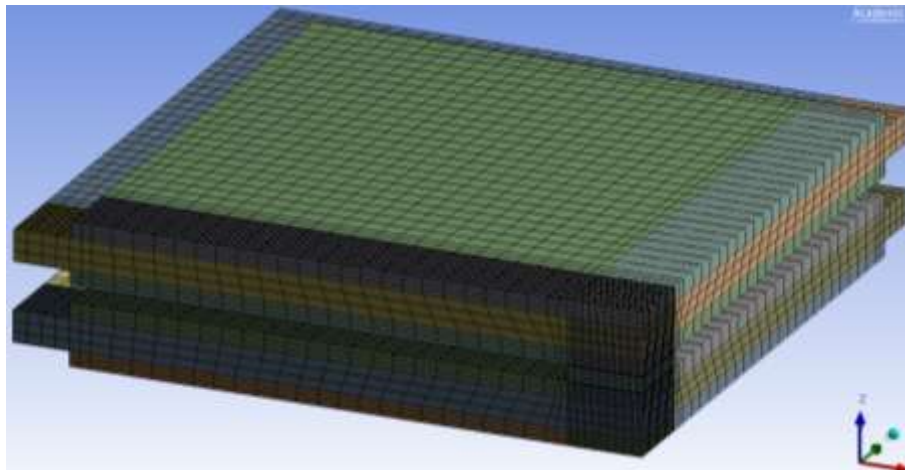


Figure 3.22 : Vue générale du maillage d'un assemblage double face

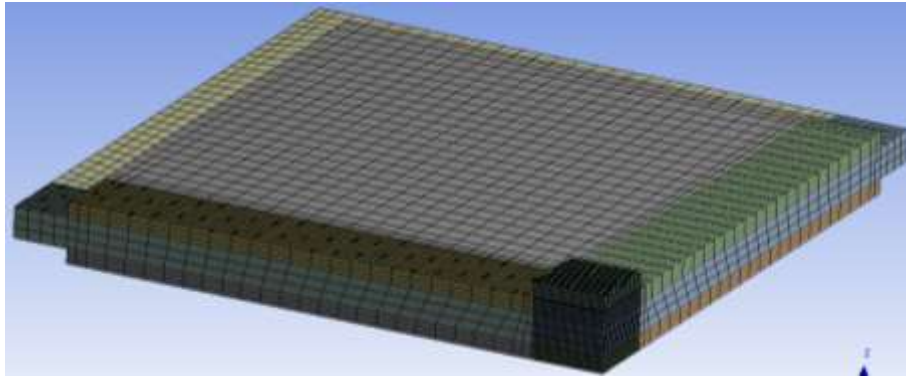


Figure 3.23 : Vue générale du maillage d'un assemblage simple face

3.5.3. Paramètres de calcul

L'aspect thermique est défini par un auto-échauffement de 240 W dans tout le volume de la puce et la boîte à eau est modélisée par une température uniforme de 25°C sur la ou les surfaces du substrat la ou les plus éloignées de la puce. Les dimensions de la puce étant supérieures ($3,05 \times 3,05 \times 0,350 \text{ mm}^3$) par rapport à celles de la puce utilisée lors de la première étude, un auto-échauffement plus élevé est nécessaire afin d'exciter thermiquement l'assemblage double face pour obtenir une résistance thermique cohérente. Les surfaces extérieures de l'assemblage sont adiabatiques afin de considérer uniquement la conduction entre les différentes parties de l'assemblage et non la convection avec l'environnement extérieur. La justification de cette hypothèse effectuée précédemment est encore valable pour cette étude (cf. 3.2).

La modélisation du procédé de frittage a suivi également les mêmes paramètres définis lors de la première étude (cf. 3.2). Un chargement de 10 MPa sur la puce pour l'assemblage simple face et sur le substrat supérieur pour l'assemblage double face (surface inférieure du substrat considérée comme fixe). Le profil de température est un palier à 250°C pendant 60 secondes, suivi d'une descente en deux minutes vers la température ambiante (25°C). La température est considérée uniforme dans l'assemblage à tout instant (les explications des différentes hypothèses faites ont été données dans la partie 3.2).

3.5.4. Résultats

Comme nous l'avons détaillé dans la première étude de ce chapitre (cf. 3.2), le frittage de pâte d'argent engendre des contraintes résiduelles importantes dans l'assemblage. Les contraintes résiduelles maximales obtenues pour un assemblage double face par la modélisation du procédé de frittage varient entre 28 MPa dans les matériaux du substrat

(alumine et cuivre), 100 MPa dans la puce en silicium et 67 MPa dans la couche d'argent (couche supérieure et inférieure). Comme pour l'étude de l'état mécanique pour un assemblage simple face, des déformations plastiques sont créées dans la couche d'argent suite au procédé d'assemblage. Ces contraintes sont également supérieures à celles obtenues pour un assemblage simple face (45 MPa dans la couche d'argent) du fait de la complexité accrue de la géométrie 3D.

L'assemblage double face est analogue à deux résistances thermiques identiques en parallèle, la résistance thermique totale de cet assemblage est donc en théorie la moitié de la résistance de celle d'un assemblage simple face (figure 3.24). En théorie, l'assemblage double face est deux fois plus efficace que l'assemblage simple face pour dissiper la chaleur due à un auto-échauffement identique de la puce. Pour une température moyenne T_j identique dans la puce suite à un auto-échauffement et une température de référence identique donnée T_a , un assemblage double face permet un fonctionnement à une puissance deux fois plus élevée par rapport à un assemblage simple face.

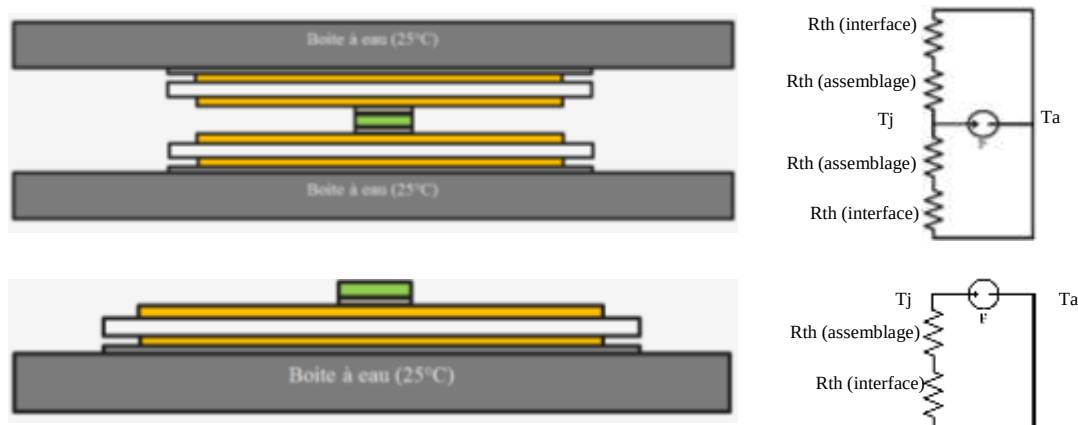


Figure 3.24 : Représentation schématique de la mesure de la résistance thermique et l'équivalence électrique pour des assemblages simple et double face

Au cours de notre étude, nous souhaitons vérifier la diminution par un facteur deux de la résistance thermique un assemblage double face par rapport à celle d'un assemblage simple face. Tout d'abord les cartographies de température, nous ont permis de confirmer que la dissipation est bien symétrique dans l'assemblage par rapport à la puce et cela quel que soit le type de céramique utilisée (figure 3.25). Le tableau 3.10 regroupe les différents résultats des simulations thermiques et nous observons que les résistances thermiques des assemblages double face sont la moitié de celle des assemblages simple face comme la théorie l'envisageait. Les assemblages peuvent être classés en deux catégories selon la céramique

3.5. Evaluation du comportement thermique d'un assemblage double face par rapport à un assemblage simple

utilisée : Al_2O_3 et Si_3N_4 ont des conductivités thermiques très faible et AlN une conductivité thermique plus élevée (cf. tableau 3.9). Cette classification se retrouve au niveau de la résistance thermique des assemblages double ou simple faces où la résistance thermique d'un assemblage AlN est deux fois plus faible que celle d'un assemblage Al_2O_3 ou Si_3N_4 . Ce gain en termes de dissipation thermique est contrebalancé par le coût de la céramique AlN supérieur à celui de l'alumine. Dans le chapitre 4, des essais ont été menés afin de déterminer expérimentalement la résistance thermique d'assemblage double face pour vérifier ce phénomène d'augmentation par un facteur deux de la dissipation thermique.

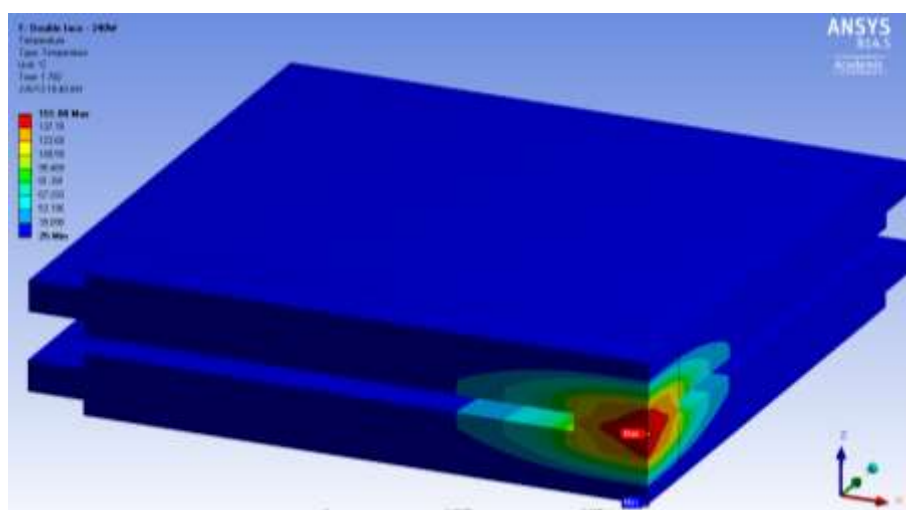


Figure 3.25 : Cartographie de la température dans un assemblage double face

Tableau 3.10 : Résistances thermiques d'assemblages simple et double face en fonction du matériau de la céramique

Géométrie	Céramique	P (W)	Tref (°C)	Tm (°C)	Rth (°C/W)
Double face	Al_2O_3	240	25	151,88	0,529
	AlN	240	25	82,52	0,240
	Si_3N_4	240	25	150	0,521
Simple face	Al_2O_3	240	25	278,83	1,058
	AlN	240	25	141,46	0,485
	Si_3N_4	240	25	275,13	1,042

3.5.5. Conclusion sur l'influence d'un assemblage double face par rapport à un assemblage simple sur le procédé de frittage et sur la résistance thermique de l'assemblage

L'étude sur la réalisation d'assemblage de puissance double face par un procédé de frittage de pâte d'argent a été menée sur deux aspects simultanément : étude expérimentale et modélisation par éléments finis. Dans cette partie, nous nous sommes intéressés au comportement thermique et mécanique d'assemblage double face par rapport à un assemblage simple face. La géométrie de l'assemblage 3D étant plus complexe, les contraintes plastiques créées sont donc supérieures à celle d'un assemblage 2D.

L'étude thermique a permis de confirmer la théorie sur la dissipation thermique d'assemblage double face qui est doublée par rapport à un assemblage simple face. Un assemblage double face peut donc fonctionner à une puissance deux fois plus élevée pour un auto-échauffement identique par rapport à un assemblage simple face. De plus, l'influence du matériau de la céramique a été démontrée. En effet, plus la céramique a une conductivité élevée plus la résistance thermique de l'assemblage est faible.

3.6. Conclusion

L'étude du comportement thermomécanique via des modélisations par éléments finis est une étape essentielle durant la mise au point d'un procédé d'assemblage. En effet, elle permet de valider les différentes étapes au niveau thermique (analyse de la dissipation thermique), mécanique (analyse des contraintes générées lors du procédé d'assemblage) et thermomécanique (évaluation de la durée de vie des assemblages réalisés). Elle est nécessairement couplée à des essais réels afin de pouvoir définir et de vérifier les modèles. La simulation numérique permet de réduire le nombre d'essais à effectuer pour mettre au point une technologie d'assemblage. En effet, la modélisation permet de tester différents modèles et de trouver par calcul numérique le plus adapté à nos essais.

La modélisation nous a permis de comprendre le comportement thermique et mécanique d'assemblage de puissance réalisé par procédé de frittage de pâte d'argent (simple ou double face). L'état mécanique de l'assemblage suite au frittage a pu être déterminé et l'apparition de déformations plastiques dans la couche d'argent a été observée. De plus, notre modèle a

été validé par rapport aux mesures expérimentales de la résistance thermique (écart relatif de 2,5% entre simulation et expérimentation).

De plus, nous avons pu évaluer l'impact de la porosité de la couche d'argent sur le comportement mécanique et thermique d'assemblage. Trois normes peuvent être établies. La résistance thermique et les contraintes de cisaillement augmentent avec la fraction de porosité. Pour une fraction de porosité donnée, la résistance thermique augmente légèrement avec le diamètre des pores mais la distribution est sans effet. Mais pour une fraction de porosité donnée, les contraintes de cisaillement augmentent avec la distribution alors que le diamètre des pores n'a aucun effet. Les simulations ayant été effectuées avec des diamètres de pores ne correspondant pas à la réalité, les résultats permettent seulement d'obtenir des tendances et les valeurs numériques obtenues ne sont pas à prendre en compte.

La méthodologie d'évaluation de la durée de vie détaillée dans la seconde partie de ce chapitre, nous a permis d'estimer la densité d'énergie de déformation accumulée aux cours du vieillissement d'assemblages de puissance. Une corrélation entre vieillissement accéléré (-40°C / +125°C) et profil de mission, nous a permis d'évaluer le temps de fonctionnement (30 ans) de nos assemblages frittés. Mais les analyses optiques d'assemblages vieillis (cf. chapitre 2) ont montré que la zone sensible thermomécaniquement n'était plus la couche d'argent fritté mais le substrat. Notre méthodologie d'évaluation de la durée de vie est donc remise en cause. Il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes de fissuration de la céramique et de délaminage de la métallisation du substrat car l'hypothèse initiale que l'indicateur le plus précoce de défaillance est le joint d'attache n'est plus validé.

Chapitre 4. : Réalisation d'assemblages spécifiques

SOMMAIRE

4.1. INTRODUCTION	141
4.2. ASSEMBLAGE SUR SEMELLE ET SUBSTRAT SMI.....	142
4.2.1. INTRODUCTION	142
4.2.2. MISE AU POINT DE PROCEDES D'ASSEMBLAGE	142
4.2.3. CARACTERISATIONS THERMIQUE DE L'ASSEMBLAGE	144
4.2.4. ANALYSES OPTIQUES DE LA COUCHE D'ARGENT – INTERFACE SEMELLE/SUBSTRAT.....	145
4.2.5. CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'ASSEMBLAGE SUR SEMELLE ET SUBSTRAT SMI.....	146
4.3. ASSEMBLAGE DE PUISSANCE DOUBLE FACE.....	147
4.3.1. INTRODUCTION	147
4.3.2. MISE AU POINT DU PROCEDE D'ASSEMBLAGE DOUBLE FACE	147
4.3.3. CARACTERISATION DES ASSEMBLAGES DOUBLE FACES	148
4.3.4. CONCLUSION SUR LES ESSAIS D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE DOUBLE FACES.....	152
4.4. PROTOTYPE : PONT DE DIODES DOUBLE FACE.....	153
4.4.1. INTRODUCTION	153
4.4.2. PROCEDE D'ASSEMBLAGE	154
4.4.3. CARACTERISATIONS THERMIQUE ET ELECTRIQUE	155
4.4.3. CONCLUSION SUR LA REALISATION D'UN PONT DE DIODES DOUBLE FACES.....	157
4.5. CONCLUSION	158

4.1. Introduction

Les précédentes études expérimentales (cf. chapitre 2) et modélisations par éléments finis (cf. chapitre 3), nous ont permis de développer et de caractériser thermomécaniquement la technologie de frittage de pâte d'argent. Les analyses menées ont confirmé le potentiel de cette technologie que nous avons étudiée dans le chapitre 1. En effet, dans le cadre de nos études, la fiabilité d'un tel assemblage (substrat - puce) est supérieure à celle des assemblages brasés et les propriétés thermiques, électriques et mécaniques sont similaires ou supérieures.

Dans le but de poursuivre l'étude de la technologie de frittage de pâte d'argent, ce chapitre 4 s'intéresse à la partie dissipation thermique des assemblages de puissance. Les calories générées par l'auto-échauffement des composants de puissance doivent être évacuées et plusieurs niveaux des solutions existent pour effectuer cette tâche. Un premier niveau de solution est l'utilisation d'une semelle qui est une liaison entre l'assemblage substrat/puce et le refroidisseur. Différentes technologies de semelles existent et nous avons essayé de les adapter à la technologie de frittage de pâte d'argent. Le second niveau est l'emploi d'assemblage de type 3D, les connexions électriques en face supérieure des composants sont remplacées par un second substrat assurant une meilleure dissipation thermique par rapport à de simples fils de câblage. Ces deux niveaux de solutions d'amélioration de la dissipation thermique sont étudiés dans ce dernier chapitre et nous ont permis de développer un prototype basé sur la technologie de frittage de pâte d'argent et des différentes études effectuées décrites dans ce manuscrit.

4.2. Assemblage sur semelle et substrat SMI

4.2.1. Introduction

Un assemblage de puissance est composé de différentes parties comme nous avons pu le voir précédemment (cf. 1.2.), chacune assurant un rôle précis. Les chapitre 2 et 3 se sont intéressés à la partie module des assemblages de puissance : assemblage de puce semi-conductrices, composants assurant la fonction électrique, et de substrats, supports du circuit de puissance. Le fonctionnement des assemblages de puissance génère un auto-échauffement dans la puce, les calories ainsi produites doivent être dissipées afin de permettre le comportement prévu des composants électriques. Cette dissipation est réalisée par un gradient de température appliqué entre le module et le système de refroidissement, une liaison est nécessaire entre ces deux zones. La semelle est le composant assurant ce rôle qui est de garantir un bon échange thermique dans le but d'évacuer les calories générées dans la puce. Les semelles sont brasées sur la partie inférieure des substrats (DBC, substrat céramique brasé Si_3N_4) ou sont directement intégrées aux substrats (SMI). La technologie de frittage de pâte d'argent a été testée sur ces deux technologies par des analyses thermiques. L'objectif principal est de mettre au point deux procédés d'assemblage (l'un pour l'attache semelle et le second pour l'attache SMI).

4.2.2. Mise au point de procédés d'assemblage

Le premier objectif a été d'adapter le procédé d'assemblage établi avec la pâte d'argent nanométrique Argomax® 2020 (cf. 2.2.3). Pour cette étude, nous avons fait le choix de travailler uniquement sur un type de pâte dont le choix a été motivé par les précédentes études. La pâte d'argent Argomax® 2020 utilisée lors de l'étude sur l'influence de la métallisation et de l'étude sur l'influence de la surface de la puce a donné les meilleurs résultats en vieillissement accéléré (cf. 2.3) par rapport à la pâte d'argent micrométrique LTS 043-04P2 et au film d'argent Argomax® 8000. Deux procédés d'assemblage ont été établis pour cette étude : le premier permet l'assemblage d'un module de puissance sur une semelle et le second permet l'assemblage d'une puce sur un substrat SMI.

Les premiers essais menés sur des semelles en cuivre métallisé nickel ($70 \times 40 \times 0,2 \text{ mm}^3$). L'argent fritté n'ayant pas d'affinité chimique avec le nickel (figure 4.1), aucune diffusion n'est possible et donc l'attache n'est pas réalisable, nous avons donc retiré par

polissage le nickel. Pour obtenir un frittage correct, il est nécessaire d'avoir à l'interface semelle/substrat (dans le dépôt d'argent) une température uniforme identique à celle de frittage défini pour le procédé d'assemblage puce/substrat (250°C). L'épaisseur de l'assemblage semelle/substrat étant plus importante que celle d'un assemblage substrat/puce, la température des plateaux chauffants doit être adaptée. De plus, la montée en température lorsque l'on presse l'assemblage doit être rapide afin de réaliser le frittage aux paramètres optimaux. Pour le procédé d'assemblage puce/substrat la température maximale est atteinte en 10 secondes environ une fois la pression appliquée, notre objectif a donc été d'obtenir les mêmes paramètres pour avoir un assemblage correct. Différents essais ont été effectués pour aboutir à une température de plateaux chauffants de 285°C pour permettre d'avoir un procédé optimal au niveau de la température.

Ensuite, des analyses optiques aux rayons X ont permis de confirmer l'uniformité de la couche d'argent (figure 4.2), les surépaisseurs (tâches sombres sur les bords du substrat) et les manques de matière (tâches claires dans la partie basse du substrat) proviennent de l'utilisation d'un clinquant particulier et peu maniable réalisé avec une feuille de transparent de 100µm d'épaisseur environ. En effet, les deux clinquants à notre disposition ne permettent pas de sérigraphier la pâte d'argent pour la surface des substrats.

Dans un second temps, nous avons décidé d'utiliser le même procédé d'assemblage pour réaliser un assemblage semelle/substrat/puce en une seule étape (des diodes en silicium de 3,8 x 3,8 x 0,120 mm³). Après vérification avec un thermocouple, les différentes zones à fritter (semelle/substrat et substrat/puce) sont aux bonnes températures (250°C) durant le frittage sous pression. Contrairement aux assemblages brasés où deux étapes différentes sont nécessaires pour réaliser un assemblage semelle/substrat/puce (une brasure de température différente pour chaque attache), une seule étape est nécessaire avec le frittage de pâte d'argent. Comme nous le verrons par la suite avec les caractérisations thermiques, les assemblages semelle/substrat/puce réalisés sont entièrement fonctionnels.

En suivant la même procédure d'essai, un procédé d'assemblage sur substrat SMI a été développé avec la pâte d'argent Argomax® 2020 bien qu'une pâte spécifique existe (Argomax® 4020) pour les substrats métallisé cuivre. Les puces utilisées sont des diodes en silicium de 3,8 x 3,8 x 0,120 mm³. Les essais ont permis de définir une température de 270°C nécessaire pour les plateaux chauffants afin d'obtenir la température de frittage correcte à

l'interface puce/substrat SMI. Le déliantage et les paramètres de frittage (temps et pression) restent inchangés comme pour l'étude précédente.



Figure 4.1 : Pâte d'argent Argomax® 2020 frittée entre deux plaques en nickel - les trois parties se séparent naturellement du fait de la fonction barrière que joue le nickel sur la diffusion de l'argent

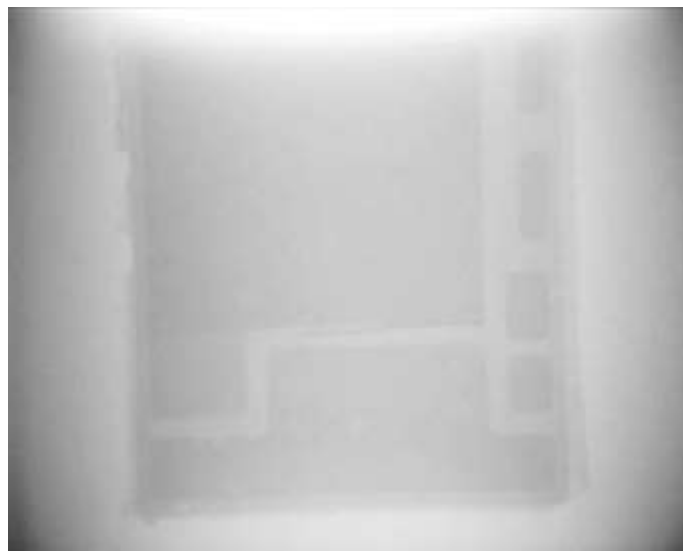


Figure 4.2 : Analyse optique aux rayons X d'un assemblage semelle/substrat

4.2.3. Caractérisations thermiques de l'assemblage

Le banc de caractérisation thermique utilisé précédemment (cf. 2.3.2.4), nous a permis de caractériser la résistance thermique des assemblages. Trois types de véhicules de tests ont été assemblés : assemblage puce/substrat DBC Al_2O_3 , assemblage puce/DBC Al_2O_3 /semelle et assemblage puce/SMI (puces en silicium de type diode de $3,8 \times 3,8 \times 0,120 \text{ mm}^3$). Les véhicules de tests ont été calibrés puis leurs résistances thermiques ont été mesurées avec l'analyseur thermique en suivant la méthode décrite dans le chapitre 2 (cf. 2.3.2.4).

Les caractérisations thermiques nous ont permis d'obtenir les résultats suivants pour les trois types de véhicules test (figure 4.3). L'ajout d'une semelle à un assemblage substrat/puce augmente légèrement la résistance thermique mais permet de confirmer le bon comportement de la couche d'argent. La présence d'un isolant électrique dans le substrat SMI, ayant une conductivité thermique faible, augmente sensiblement la résistance thermique du substrat et les mesures thermiques effectuées sur les véhicules de tests le prouvent. Une différence importante est obtenue entre les résistances thermiques des assemblages avec un substrat DBC et avec un substrat SMI. Néanmoins, ces deux technologies ne sont pas comparables car elles ont des applications différentes.

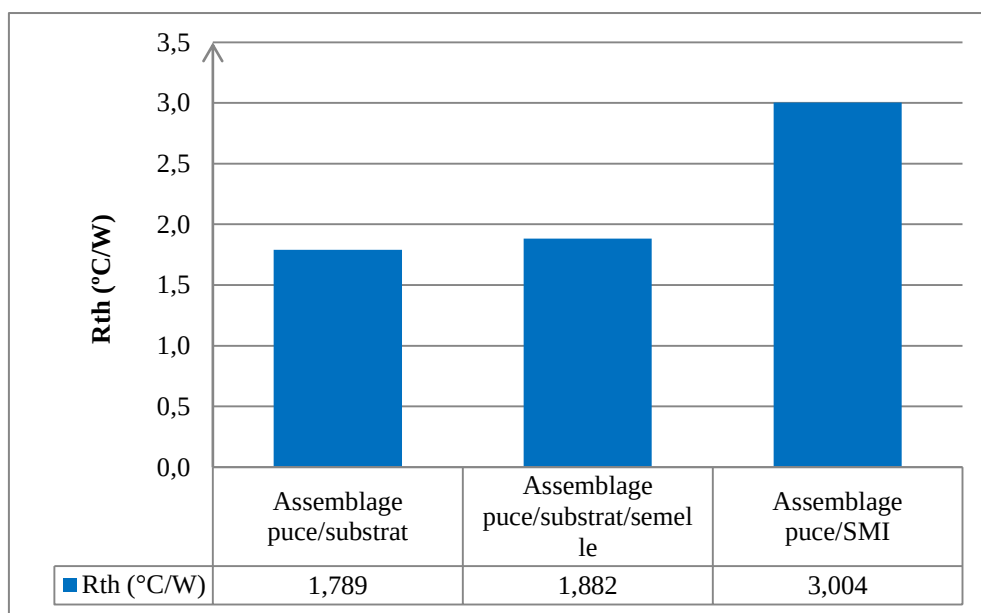


Figure 4.3 : Résistances thermiques d'assemblage simple, d'assemblage sur semelle et d'assemblage sur substrat SMI

4.2.4. Analyses optiques de la couche d'argent - interface semelle/substrat

Les analyses optiques des assemblages semelle/substrat/puce vont permettre de caractériser la microstructure de l'interface d'argent et de comparer le frittage de l'interface entre la puce et le substrat avec celle entre le substrat et la semelle. Nous avons dans un premier temps analysé les zones situées aux bords du substrat, zones dans lesquelles des différences de contraste ont été observées lors des analyses aux rayons X. Le clinquant, utilisé pour cette étude, ne permettant pas d'obtenir une sérigraphie régulière, des irrégularités d'épaisseur sont apparues lors de la sérigraphie et ont été conservées après le frittage (figure 4.2). La microstructure de ces zones montre une couche à forte porosité (figure 4.4 droite) et la présence de lacunes dues à un manque de pâte d'argent (figure 4.4

gauche). Ces premières analyses montrent qu'il est nécessaire de réaliser une étude plus précise avec un clinquant optimisé et non avec une feuille de transparent comme dans notre étude. Néanmoins, ces zones imparfaites se limitent à quelques millimètres et les observations optiques de la zone centrale de la couche d'argent (figure 4.5 - sous la majeure partie du substrat et de la puce) permettent d'observer un frittage complet tel qu'on a pu l'obtenir pour un assemblage puce/substrat fonctionnel étudié au cours du chapitre 2.

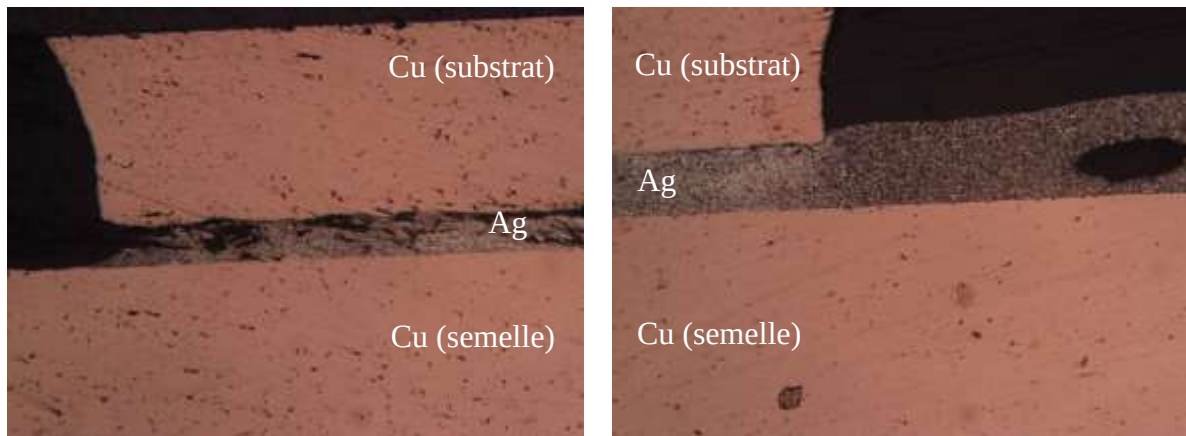


Figure 4.4 : Analyses optiques de la couche d'argent à l'interface semelle/substrat située aux bords du substrat

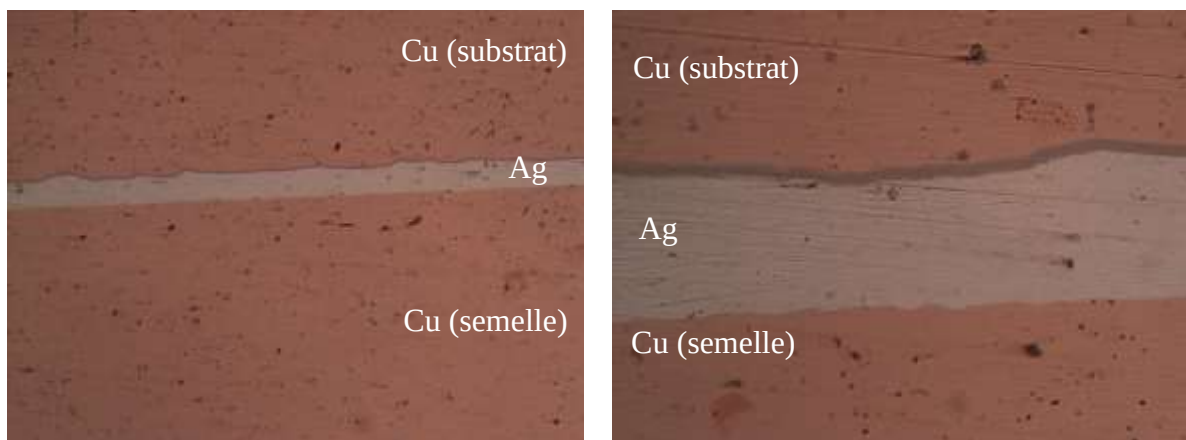


Figure 4.5 : Analyses optiques de la couche d'argent à l'interface semelle/substrat située sous la puce

4.2.5. Conclusion sur les essais d'assemblage sur semelle et substrat SMI

L'objectif de réaliser des assemblages spécifiques a nécessité un ajustement des procédés d'assemblages par frittage de pâte d'argent que nous avons développés précédemment (cf. 2.2). Les assemblages sur semelle et sur substrat SMI ont nécessité la modification de la température des plateaux chauffants de la presse dans le but d'avoir la température de frittage optimale dans l'assemblage et ainsi obtenir une couche d'argent frittée optimisée. Une optimisation de la sérigraphie est nécessaire (utilisation d'un clinquant adapté) pour

l'assemblage du substrat sur une semelle. Néanmoins comme les observations optiques nous ont permis de le voir, la couche d'argent obtenue est similaire à celle d'un assemblage substrat/puce. Ce qui confirme les bonnes performances thermiques obtenues lors de la mesure de la résistance thermique de ces assemblages. Nous avons également étudié le report de puce semi-conductrice sur substrat SMI par frittage de pâte d'argent dans le but de pouvoir utiliser ce procédé pour développer un prototype par la suite (cf. 4.4).

4.3. Assemblage de puissance double face

4.3.1. Introduction

La technologie d'assemblage double face est l'une des solutions envisagées afin de répondre à la problématique thermique de l'électronique dans l'automobile et l'aéronautique du fait de la miniaturisation des composants électroniques et d'une localisation proche de zones à haute température. Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre précédent (cf. 3.5.1), la technologie d'assemblage double face offre une réponse à cette problématique. En effet, elle assure une dissipation thermique par les deux faces des puces, permettant ainsi de diminuer l'échauffement dû au fonctionnement électrique de l'assemblage. Différentes solutions d'assemblage double face à base de brasure sont déjà disponible commercialement (132). Notre travail a été de mettre au point un procédé d'assemblage double face en se basant sur l'un des procédés de frittage de pâte d'argent décrit dans le chapitre 2. Des caractérisations électriques, thermiques, optiques et mécaniques vont être détaillées pour comprendre le comportement des assemblages double face frittés et les comparer avec des assemblages simple face brasés et frittés.

4.3.2. Mise au point du procédé d'assemblage double face

Le frittage de pâte d'argent est un procédé effectué sous pression uni-axiale, la principale difficulté pour réaliser un assemblage double face réside donc dans l'alignement substrat/puce/substrat. Cet alignement doit être parfait car la pression doit être appliquée uniquement sur la surface de la puce lors de l'assemblage. En effet, si la pression n'est pas appliquée uniquement sur le composant, de fortes contraintes de cisaillement apparaissent au niveau de la puce qui est alors irrémédiablement endommagée comme les premiers essais réalisés ont pu le démontrer. Les conséquences d'un mauvais alignement sont connues, notamment dans le cas d'assemblages tridimensionnels utilisant la technologie micro ou nano poteaux de cuivre (16).

Les essais ont été menés en utilisant des diodes tranzil bidirectionnelles Microsemi 3,5 x 3,5 mm² d'épaisseur 500 microns dont les deux faces sont identiques avec une métallisation Ti/Ni/Ag. Le substrat utilisé est un substrat DBC (céramique de type alumine métallisée cuivre sur ses deux faces) gravé sur une face et recouvert d'une métallisation Ni/Au. Différentes astuces sont utilisées pour obtenir un assemblage double face. Afin d'appliquer la pression sur la surface de la puce et uniquement, un caoutchouc en silicone est placé entre le substrat supérieur et le plateau chauffant. L'alignement des différents composants est facilité en sérigraphiant la pâte d'argent sur le substrat inférieur et sur la face supérieure de la puce. Un ajustement de la température des plateaux chauffants (270°C) a été nécessaire afin d'obtenir la température de frittage correcte aux interfaces à fritter (250°C), Nous avons donc pu définir un plan d'alignement (figure 4.6) pour obtenir des assemblages double face fonctionnels comme les différentes caractérisations suivantes vont le démontrer. Le déliantage se déroule à 130°C en 30 minutes suivi du frittage en une minute sous 10 MPa de pression.

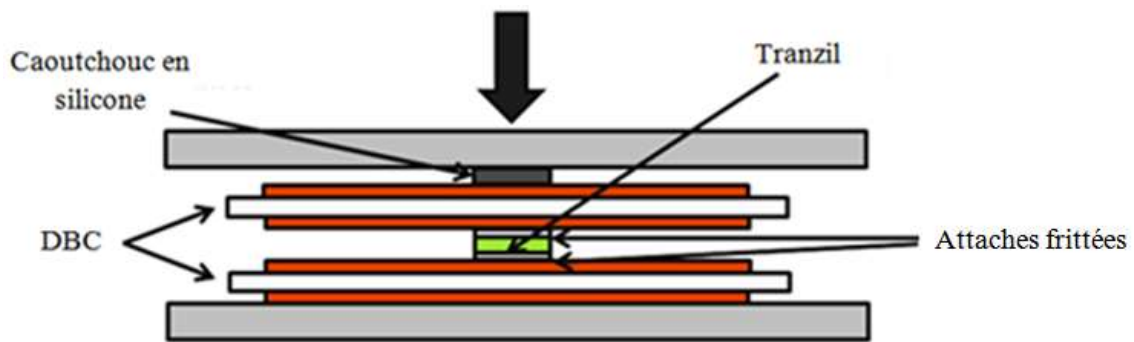


Figure 4.6 : Schématisation de l'appareillage utilisé pour réaliser un assemblage double face par frittage

4.3.3. Caractérisation des assemblages double face

Des analyses mécaniques, électriques, thermiques et optiques ont été menées sur les assemblages double face réalisés avec la procédure précédente. Puis, nous les avons comparées avec celles effectuées sur des assemblages simple face brasés et frittés. Les assemblages simple face brasés SnAgCu nous ont été fournis par Microsemi.

Nous avons dans un premier temps effectué des analyses de la tenue en cisaillement des différents assemblages (tableau 4.1). Pour les assemblages double face, la mesure a pu être effectuée en cassant l'une des attaches frittées manuellement, cette méthode bien que non réglementaire, nous a permis d'obtenir des résultats cohérents. En effet, les valeurs moyennes

de tenue en cisaillement des assemblages simple face et double face frittés sont proches et l'écart entre les deux valeurs se retrouve lors des modélisations par éléments finis effectuées dans le chapitre précédent. Le frittage d'assemblage double face engendre davantage de contraintes résiduelles que le frittage simple face. L'assemblage 3D est donc plus contraint et sa tenue au cisaillement est donc logiquement plus faible. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, la tenue en cisaillement d'un assemblage brasé est beaucoup moins élevée que celle d'assemblages frittés. Ces mesures de la tenue en cisaillement permettent de valider la procédure d'assemblage utilisée.

Tableau 4.1 : Tenue au cisaillement des assemblages simple et double face - brasé et fritté

Type	Minimum (MPa)	Maximum (MPa)	Moyenne (MPa)
Assemblages brasés	17,85	21,70	19,60
Assemblages frittés simple face Face inférieure de la puce	26,70	44,80	36,50
Assemblages frittés double face Face supérieure de la puce	24,50	37,90	32,90

Des diodes tranzil bidirectionnelles ont été utilisées pour réaliser les différents assemblages de cette étude, elles permettent une protection de type parasurtenseur et sont composées de deux diodes Zener en opposition montées en parallèle. Nous avons donc choisi de tester électriquement la chute de tension des différents assemblages pour s'assurer du bon fonctionnement des assemblages double face. La courbe I-V obtenue a été comparée à celle obtenue pour un assemblage fritté en face arrière (avec fils de câblage en face avant) et pour des assemblages brasés (avec fils de câblage en face avant). On remarque (figure 4.7) que les différents tracés sont superposés ce qui démontre que la procédure d'assemblage double face ne modifie pas les caractéristiques électriques du composant.

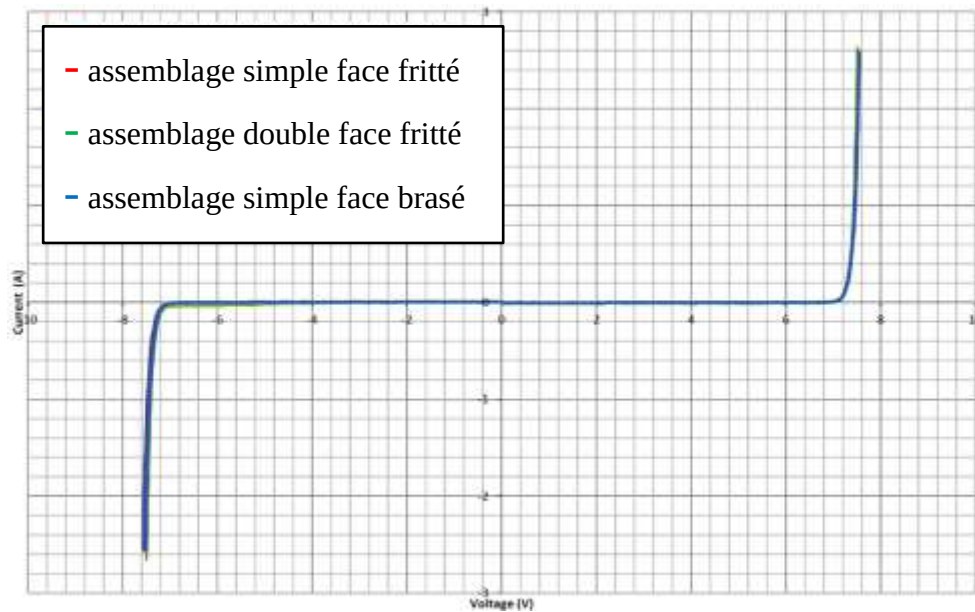


Figure 4.7 : Comparaison de courbes I-V obtenues pour différents procédés d'assemblage

Des micro-sections des assemblages double face frittés ont été réalisées pour pouvoir comparer les deux couches d'argent de l'assemblage. Il apparaît que les deux couches font $26\ \mu\text{m}$ d'épaisseur (comparable aux précédentes mesures pour des assemblages simple face) et de plus aucune différence n'est observable entre les deux couches d'argent (figure 4.8). La procédure d'assemblage double face permet donc d'obtenir un assemblage aux propriétés de structure proche de celle d'un assemblage simple face.

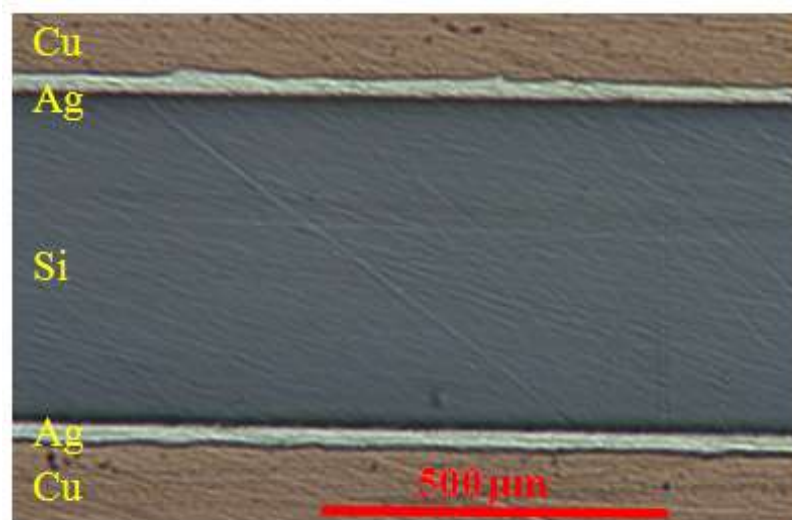


Figure 4.8 : Analyse optique d'une micro-section d'un assemblage double face

Nous avons conclu les essais sur l'étude des assemblages double face en analysant la dissipation thermique via la mesure de la résistance thermique. Pour cela, une puissance de 7W a été injectée dans les assemblages placés entre deux boîtes à eau permettant le maintien

à 25°C des deux surfaces extérieures des substrats (figure 4.9). Les premiers essais de mesures n'ont pas permis d'aboutir à la résistance thermique des assemblages double face. En effet, soit à l'instant de la pose de la boîte à eau supérieure sur l'assemblage ou soit au moment de l'application de la pression, les différents assemblages se cassent. Ce phénomène est dû à un bras de levier apparaissant entre la boîte à eau aux grandes dimensions et l'assemblage aux dimensions plus réduites. Il est donc nécessaire de trouver un appareillage permettant la mesure de la résistance thermique tout en conservant la stabilité mécanique de l'ensemble (tableau 4.2). Dans le cas idéal de la théorie, la résistance thermique d'un assemblage double face est deux fois inférieure à celle d'un assemblage simple face (l'assemblage double face fonctionnant comme un circuit avec deux résistances en parallèle). La mesure de la résistance thermique des assemblages simple face a permis d'aboutir à une valeur de 3,34°C/W, nous nous attendons donc à obtenir une valeur d'environ 1,7°C/W pour les assemblages double face. Comme le montre le tableau 4.2, les différents appareillages n'ont pas permis d'aboutir à une valeur cohérente de la résistance thermique des assemblages double face.

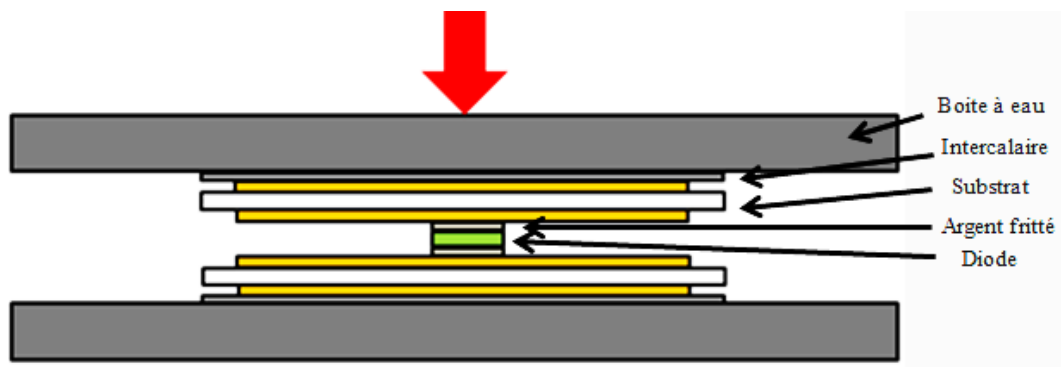
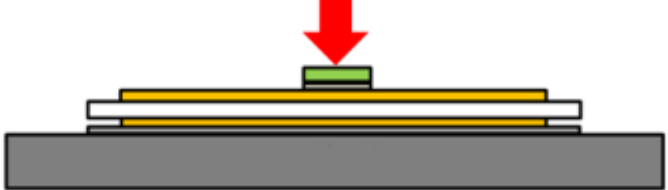


Figure 4.9 : Schématisation de l'appareillage utilisé pour la mesure de la résistance thermique d'assemblage double face

Tableau 4.2 : Différents appareillages utilisés dans le but d'obtenir une valeur de la résistance thermique d'un assemblage double face

Appareillage Utilisation d'un caoutchouc siliconé pour équilibrer la pression due à la boîte à eau supérieure	R _{th} (°C/W)	Remarques
	3,9	Pas de pression → Contact thermique faible → Mesure incorrecte
	2,5	Pression de 1 MPa → Dissipation thermique améliorée → Contact thermique pas optimisé → Mesure incorrecte
	3,34	Mesure de référence Pression de 1 MPa

4.3.4. Conclusion sur les essais d'assemblage de puissance double face

Cette étude a démontré qu'un assemblage double face peut être réalisé par un procédé de frittage de pâte d'argent nanométrique sous faible pression. La procédure expérimentale a été validée par les caractérisations électriques, mécaniques et optiques réalisées qui démontrent les performances des assemblages double face. Les essais menés sur des diodes tranzil sont utilisables sur tous types de puces double face métallisées argent ou or. La procédure peut donc permettre de réaliser des assemblages double face avec des puces GaN ou SiC par exemple. Les assemblages double face de transistors (IGBT, MOSFET, etc.) nécessitent une étude spécifique du fait de la présence des deux électrodes sur la surface supérieure de la puce (électrode de contrôle et électrode de puissance).

Les différentes caractérisations effectuées ont permis d'évaluer les performances d'un assemblage double face et de les comparer à celle d'un assemblage simple face. Les analyses optiques d'une micro-section ont montré que les couches d'argent étaient identiques pour les

différents types d'assemblage. Les propriétés électriques ne sont pas modifiées ou altérées par le procédé d'assemblage et sont identiques à celle d'assemblage simple face (brasé et fritté). La tenue au cisaillement des assemblages est comparable voire supérieure à celle d'assemblages brasés. La principale difficulté a été de caractériser thermiquement les assemblages double face, les différents appareillages utilisés ne nous ont pas permis d'aboutir à la caractérisation de la dissipation thermique des assemblages. La fragilité des assemblages soumis à des contraintes inégales de la part des boîtes à eau reste un obstacle pour la mesure de la résistance thermique. Plusieurs solutions ont été envisagées dans le but d'étudier la dissipation thermique des assemblages double face. L'une d'entre elle est de réaliser des assemblages avec un plus grand nombre de puces afin d'augmenter la surface d'attache et ainsi de renforcer la tenue mécanique de l'assemblage. Par manque de composants double face, la mesure de la résistance thermique a été effectuée au cours de la réalisation d'un prototype pont de diodes double face (cf. 4.4)

La procédure développée est aisément industrialisable du fait qu'elle se déroule en une seule étape, néanmoins l'espace entre les deux substrats est très faible (de l'ordre de 500 μm pour les assemblages de notre étude) et l'injection du gel de protection contre les tensions élevées peut poser problème et nécessite une étude spécifique. De plus, des essais de vieillissement accéléré couplés à une étude de modélisation par éléments finis sont nécessaires dans le but d'évaluer le comportement thermomécanique et la durée de vie des assemblages double face. Il reste néanmoins le problème majeur de l'évacuation des calories par un système de boîtes à eau que nous n'avons pu résoudre. Il est nécessaire de penser au système complet (assemblage + évacuation) pour de futurs travaux.

4.4. Prototype : pont de diodes double face

4.4.1. Introduction

La dernière étape expérimentale a été la réalisation d'un démonstrateur optimisé à architecture innovante utilisant la technologie de frittage de pâte d'argent. Nous avons choisi de réaliser un pont de diodes (quatre diodes montées en pont) qui assure la fonction électrique permettant le redressement d'un signal électrique (figure 4.10) ainsi que sa conversion d'un courant alternatif en courant continu. C'est une fonction simple qui nous a permis de réaliser un prototype en utilisant le procédé d'assemblage double face par frittage de pâte d'argent vu

précédemment (cf. 4.3). L'étude du comportement thermique et électrique a été effectuée sur une série d'assemblage double face et comparée à une série d'assemblage simple face utilisant la technologie de câblage classique.

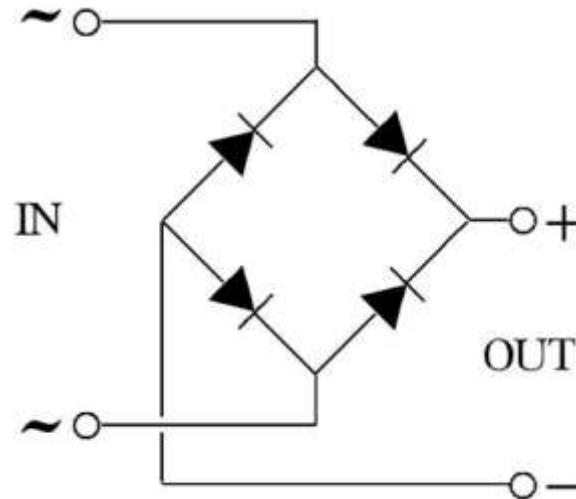


Figure 4.10 : Représentation schématique d'un pont de diodes

4.4.2. Procédé d'assemblage

Deux séries de véhicules de tests ont été assemblées en utilisant le procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent vu précédemment : sérigraphie de 100 μm de pâte d'argent, déliantage à 130°C pendant 30 minutes et frittage à 250°C (température des plateaux chauffants de 270°C) sous 10 MPa pendant une minute. Les composants électroniques utilisés sont des diodes en silicium de 6,35 x 6,35 x 0,120 mm³ métallisées argent sur les deux faces. Elles ont été reportées sur des substrats SMI de 3 mm d'épaisseur utilisés pour la facilité à travailler la métallisation cuivre dans le but de « séparer » les diodes entre elles afin d'obtenir la fonction voulue. En effet, pour obtenir la fonction pont de diodes il est nécessaire de graver les substrats SMI pour ainsi placer les diodes en accord avec la schématisation d'un pont de diodes (figure 4.11). La gravure des substrats a été réalisée à l'aide d'une Dremel jusqu'à qu'il n'y est plus de contact électrique entre les zones à isoler électriquement entre elles. Les assemblages simple et double face (figure 4.12) obtenus ont ensuite été testés électriquement et thermiquement.

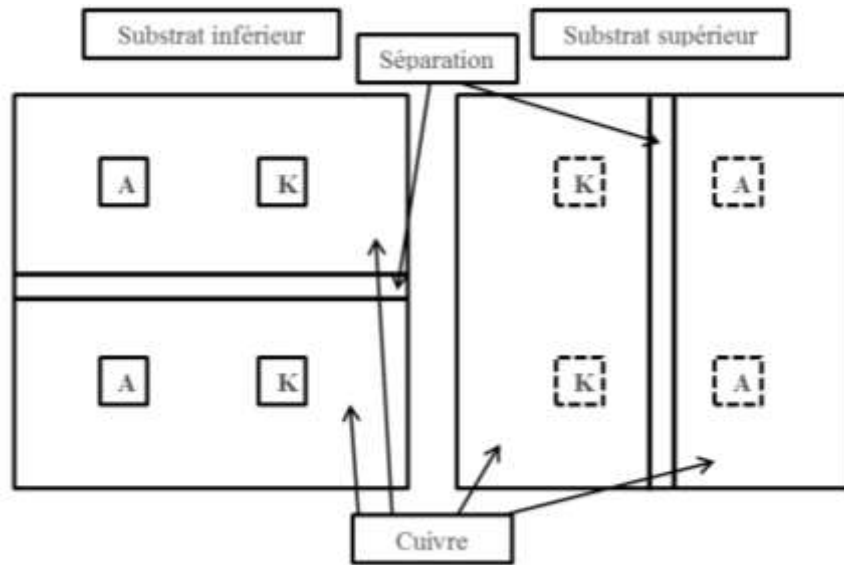


Figure 4.11 : Représentation schématique du pont de diodes vu de dessus : Les lettres A (anode) et K (cathode) représentent la face de la diode en contact avec le substrat ; la « séparation » représente la gravure réalisée à l'aide d'une dremel

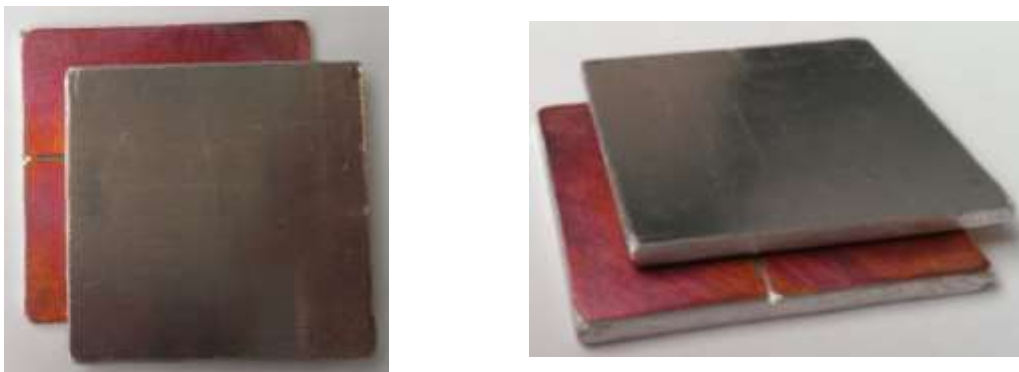


Figure 4.12 : Photographie de l'assemblage double face pont de diodes sous plusieurs angles

4.4.3. Caractérisations thermique et électrique

Compte tenu des problèmes liés aux mesures thermiques des assemblages double face rencontrés au cours du développement d'un procédé d'assemblage, nous avons choisi de réaliser des véhicules de tests spécifiques pour étudier la dissipation thermique des assemblages pont de diodes. Pour cela, nous avons assemblé deux séries de véhicules de tests (simple et double face). Une seule puce est assemblée entre deux substrats SMI de petite dimension dans le but d'augmenter le pourcentage de surface d'attache par rapport à la surface totale du substrat pour ainsi renforcer mécaniquement l'assemblage (figure 4.13). De même, les assemblages simple face ont été réalisés avec des substrats de dimensions identiques.



Figure 4.13 Assemblages spécifiques réalisés pour la mesure de la résistance thermique : assemblage simple face non câblé (gauche) et assemblage double face (droite)

L'utilisation d'assemblage de petites dimensions, nous a permis de mener à son terme l'étude thermique des véhicules de tests double face en utilisant le dispositif de mesures explicité précédemment (cf. 4.3). En moyenne, la résistance thermique des assemblages double face est de $3,8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ et de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ pour les assemblages simple face. Nous obtenons donc une réduction de 43% de la résistance thermique pour les assemblages double face. Cette valeur est proche des 50% de réduction obtenue par la théorie (cf. 4.3.3) et par les modélisations par éléments finis effectuées (cf. 3.5). Le remplacement des fils de câblage par un second substrat permet donc de réduire la résistance thermique des assemblages de puissance. De plus, le procédé de frittage est adapté à la réalisation de tel assemblage et permet une augmentation de la puissance injectée dans la puce sans augmentation de l'auto-échauffement par rapport à un assemblage simple face.

Les caractérisations électriques ont été effectuées en connectant les bornes d'entrée du pont de diodes à un générateur de basses fréquences (GBF) et les bornes de sorties (+ et -) à un oscilloscope. Un signal sinusoïdal de 5 V est envoyé dans les différents assemblages (simple et double face) et en sortie, nous obtenons le signal d'entrée redressé (figures 4.14 et 4.15). Les assemblages pont de diodes simple et double face permettent d'obtenir des signaux de sortie identiques. La technologie de fils de câblage est donc bien remplaçable du point de vue électrique par la technologie d'assemblage double face.

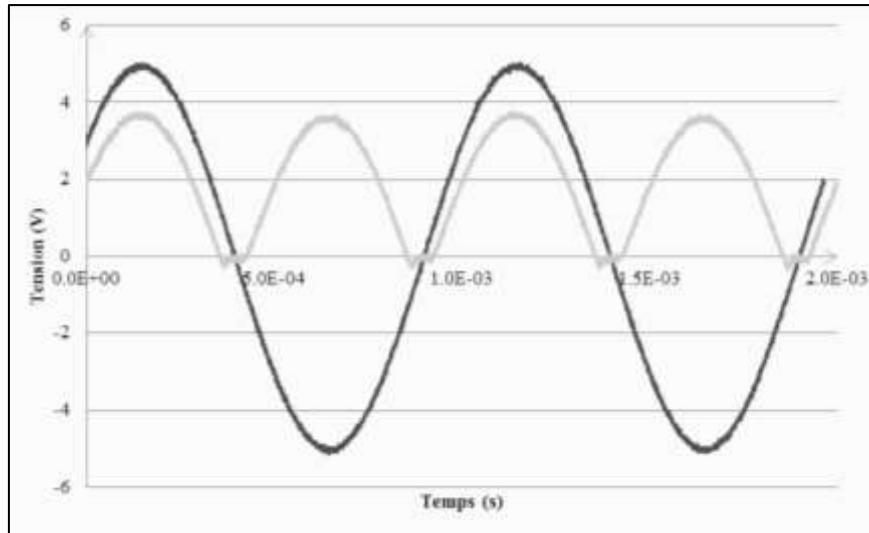


Figure 4.14 : Caractérisation électrique d'un assemblage pont de diodes simple face

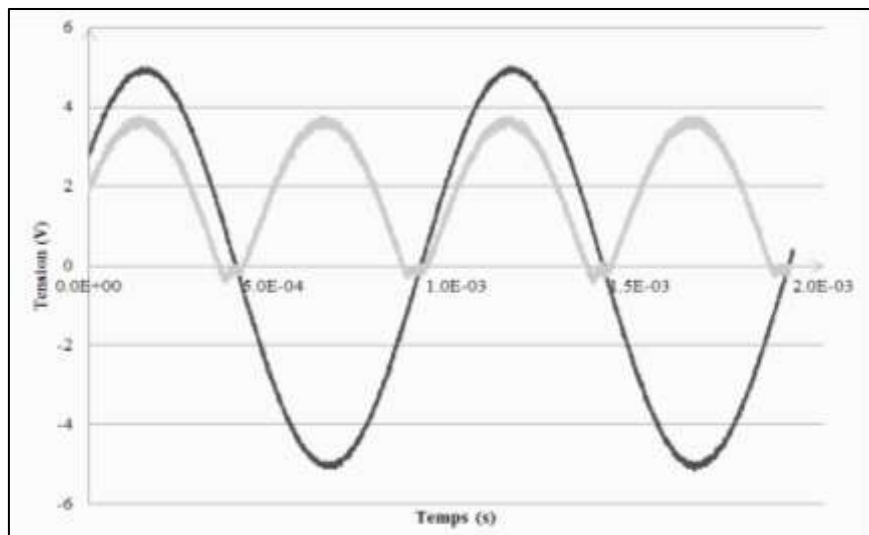


Figure 4.15 : Caractérisation électrique d'un assemblage pont de diodes double face

4.4.3. Conclusion sur la réalisation d'un pont de diodes double face

L'objectif de cette dernière étude était de réaliser un prototype d'assemblage de puissance fonctionnel. Pour cela, nous avons utilisé le procédé d'assemblage double face par frittage de pâte d'argent que nous avons développé (cf. 4.3). Le principal obstacle (fragilité des substrats après gravure à la dremel) a été court-circuité en utilisant des substrats SMI épais (3 mm) dans le but de renforcer mécaniquement les substrats et ainsi obtenir des assemblages double face solides mécaniquement. Nous avons choisi de réaliser un pont de diodes dont la fonction électrique permet le redressement d'un signal sinusoïdal. L'utilisation du procédé d'assemblage double face se justifie par deux aspects. Tout d'abord, les fils de câblage ne sont plus nécessaires et la dissipation thermique de l'assemblage est augmentée par la

présence d'une importante zone de contacts thermiques sur le haut de la puce (second substrat). Les caractérisations électriques (redressement d'un signal sinusoïdal) ont permis de valider le procédé d'assemblage ainsi que le bon fonctionnement du module double face (fonctionnement identique à celui d'un pont de diodes simple face). Les essais de mesure de la résistance thermique ont montré que la dissipation thermique dans les assemblages double face est supérieure à celle dans les assemblages simple face (réduction de 42% de la résistance thermique de l'assemblage). Les essais menés nous ont donc permis de réaliser un prototype fonctionnel de pont de diodes double face utilisant le procédé de report par frittage de pâte d'argent.

4.5. Conclusion

Dans le but de prolonger l'étude commencée au cours du chapitre 2 (développement de procédés d'assemblage par frittage de pâte d'argent et étude du comportement thermomécanique de ces assemblages), le chapitre 4 a fait l'objet d'expérimentations sur des assemblages spécifiques. Des assemblages de puissance sur semelle, des reports de puces sur substrats SMI, la mise au point d'un procédé d'assemblage double face et sa mise en application pour la fabrication d'un prototype ont été l'objet d'essais expérimentaux ainsi que des caractérisations dans le but d'évaluer les différents assemblages réalisés. Bien que le procédé ne soit pas complètement optimisé, nous avons montré que l'utilisation du procédé d'assemblage par frittage de pâte d'argent nanométrique est possible pour l'attache substrat/semelle et permet d'obtenir des caractéristiques thermiques supérieures à celle d'un assemblage puce/substrat SMI et proches de celle d'un assemblage substrat/puce. Dans le but d'optimiser la dissipation thermique d'assemblage de puissance, nous avons développé un procédé d'assemblage double face utilisant le frittage de pâte d'argent. Théoriquement, un tel assemblage permet une réduction de 50% de la résistance thermique de l'assemblage, grâce au procédé développé, nous avons pu obtenir une réduction de 42% de la résistance thermique pour un assemblage double face réalisé en utilisant un procédé de frittage de pâte d'argent nanométrique. Cette étude a été l'objet de plusieurs difficultés dont la principale était la fragilité des assemblages double face obtenus de par la faible surface de contact par rapport aux dimensions du substrat, ce qui rendait les analyses thermiques compliquées. Plusieurs solutions ont été envisagées comme l'augmentation de la surface de contact en reportant plusieurs puces en même temps, solution abandonnée à cause du manque de puces reportables sur les deux faces. La seconde solution envisagée et utilisée pour la mesure a été

de réduire les dimensions du substrat. Cette solution a été réalisée au cours de la dernière partie de ce chapitre par la réalisation d'un prototype pont de diodes d'assemblage double face par frittage de pâte d'argent nanométrique. Ce prototype, réalisant la fonction simple de redressement d'un signal sinusoïdal améliore sensiblement ses performances thermiques et électriques. Il permet de montrer le potentiel du procédé d'assemblage double face par frittage de pâte d'argent.

Conclusion générale

Les problématiques actuelles en électronique de puissance sont liées au remplacement des alliages de brasure à base de plomb par une nouvelle technique d'assemblage et à l'étude de la fiabilité des modules de puissance de plus en plus complexes et aux dimensions de plus en plus réduites. Dans le cadre de nos travaux, le frittage de pâte d'argent a été proposé comme alternative aux alliages de brasure dans le but de répondre à ces problématiques. L'objectif de nos travaux a donc été de comparer le comportement thermique, mécanique et thermomécanique de modules de puissance en fonction de différentes technologies de frittage de pâte d'argent et d'évaluer leur fiabilité en se basant sur des essais expérimentaux et des simulations numériques.

L'analyse de la structure et de la composition d'un module de puissance, le recensement des différentes techniques d'assemblage et des principaux modes de défaillances ont été effectués dans le premier chapitre. Cela nous a permis de mettre en évidence l'aspect multi domaines des assemblages de puissance et d'illustrer la problématique de la miniaturisation des modules et du remplacement du plomb. Différentes technologies alternatives d'assemblage sont développées pour apporter une solution à ces problématiques. Les premiers résultats prometteurs sur le frittage de pâte d'argent, nous ont amené à nous intéresser de façon plus précise à cette technique d'assemblage. Après avoir sélectionné la technologie qui a été étudiée, la fatigue thermomécanique des joints d'assemblages a été considérée comme cause principale de défaillance dans les assemblages de puissance.

L'évaluation d'une nouvelle technologie d'assemblage doit respecter une démarche en deux étapes : la validation du procédé d'assemblage et l'étude de sa fiabilité. L'expérimentation et la simulation numérique sont les deux outils nécessaires à cette démarche de qualification du procédé.

Dans un premier temps, des procédés d'assemblage simples et flexibles par frittage de pâte d'argent micrométrique (Heraeus) et nanométrique (Alpha) ont été mis au point. Différents types de substrat, de métallisation et de dimensions de puce sont utilisables avec le procédé mettant en œuvre la pâte d'argent nanométrique. Les analyses mécaniques, thermiques et optiques ont permis de montrer l'apport du frittage de pâte d'argent pour le remplacement des brasures au plomb dans les assemblages de puissance. En parallèle, des

modélisations par éléments finis ont permis de valider mécaniquement notre procédé d'assemblage en analysant les contraintes résiduelles obtenues lors du frittage sous pression.

Les modules de puissance ainsi réalisés par frittage ont une durée de vie estimée à 30 ans pour un profil de mission en circulation urbaine et un critère de défaillance thermique expérimental basé sur l'évolution des performances de dissipation thermique du module. Le calcul de la densité d'énergie de déformation, indicateur de la fatigue thermique, a été le critère de défaillance lié aux modélisations afin d'établir une correspondance entre vieillissements accélérés et modélisations par éléments finis. Les analyses optiques des modules frittés vieilliss ont permis d'observer de nouvelles zones sensibles aux variations thermiques qui ne sont pas prise en compte par le modèle numérique. L'hypothèse primaire consistant à estimer que la fatigue thermomécanique des joints est la principale cause de défaillance des assemblages de puissance ne peut plus être maintenue. Cette méthodologie ne permet donc d'obtenir qu'une estimation partielle de la durée de vie réelle en fonctionnement des assemblages de puissance.

Les expérimentations et les modélisations par éléments finis menées ont permis de valider le procédé d'assemblage et de comprendre la fiabilité de modules de puissance frittés. Les assemblages réalisés ont des comportements mécaniques, thermiques et thermomécaniques supérieurs à ceux d'assemblages brasés SnPb37. Le cahier des charges défini lors de la première étape de ce travail est donc respecté. Les premiers objectifs de nos travaux sont ainsi achevés et le frittage de pâte d'argent est donc un excellent candidat pour remplacer les alliages au plomb.

Une série de simulations numériques a été effectuée pour étudier l'influence de la porosité de la couche d'argent sur sa capacité de résistance à un chargement de type cisaillement et d'auto-échauffement de la puce. Bien que réalisé avec des géométries non représentatives de la structure réelle de la couche d'argent, les simulations effectuées ont permis de mettre en avant la dépendance du comportement thermique et mécanique avec la porosité. La pression est l'un des principaux paramètres permettant de réduire la porosité d'une céramique, son utilisation au cours du procédé de frittage de pâte d'argent est donc pleinement justifiée par les simulations effectuées lors de cette étude.

L'objectif final de nos travaux a été de réaliser un prototype fonctionnel à architecture innovante. Suite au développement d'un procédé d'assemblage double face par frittage de

pâte d'argent, des modélisations par éléments finis ont permis de valider le procédé d'assemblage. L'avantage d'une structure 3D est d'avoir une dissipation thermique sur les deux faces de la puce. Cette structure a permis d'obtenir une réduction significative de la résistance thermique par rapport à un assemblage simple face. D'une réduction de 50% obtenue théoriquement par les simulations, nous observons une réduction de 42% de la résistance thermique de l'assemblage. Les étapes de développement ainsi effectuées, un prototype double face fonctionnel assurant la fonction pont de diodes a été réalisée et validé par des caractérisations mécaniques, thermiques, optiques et électriques.

L'étude sur le frittage de pâte d'argent dont les différents objectifs ont été menés à terme, permet de dégager plusieurs perspectives envisageables pour de futurs travaux sur cette nouvelle technologie d'assemblage.

Il serait intéressant de poursuivre l'étude sur les assemblages double face afin d'évaluer leur fiabilité par la méthodologie présentée dans ce manuscrit. Les performances thermomécaniques d'un assemblage double face devraient être supérieures compte-tenu d'une dissipation thermique plus élevée et donc une structure moins sensible aux variations thermiques.

La migration de l'argent est connue pour être un phénomène déclenché par la présence d'oxygène et d'humidité. Il a été observé qu'à haute température ($>300^{\circ}\text{C}$), l'argent fritté dans un assemblage est sujet à ce phénomène qui est amplifié par les champs électriques des puces semi-conductrices. L'étude de ce phénomène serait à envisager pour essayer de trouver une solution technologique viable qui puisse limiter cette migration entraînant l'apparition de court-circuits dans les modules.

Les différentes caractérisations menées au cours des différentes études effectuées, ne se sont intéressées qu'au suivi des paramètres mécaniques, thermiques et optiques des modules frittés. L'étude de l'évolution des paramètres électriques caractéristiques des puces semi-conductrices serait donc un point à examiner au cours de vieillissements accélérés.

L'un des atouts majeurs du frittage de pâte d'argent est la température de fusion élevée de l'argent (961°C) ce qui permet une utilisation de tels assemblages à très hautes températures (200°C - 300°C). Il serait donc intéressant de tester les performances thermomécaniques d'assemblages de puissance frittés pour des deltas de températures plus importants ($>200^{\circ}\text{C}$) lors de vieillissements accélérés pour l'aéronautique.

Bibliographie

1. UNFCCC.
http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/kyoto_protocol/items/3274.php,
2011.
2. **Masson, A.** Mise en oeuvre de techniques d'attaches de puces alternatives aux brasures classiques pour des applications haute température. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2011.
3. Techno-Science. <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6710>.
4. **Boursat, B.** *Comprendre les problemes de procede de l'electronique de puissance*. s.l. : Alstom PEARL, 2006.
5. Techno-Science. <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6708>.
6. **Dimitrijević, S. et Jamet, P.** Advanced in SiC power MOSFET technology. Microelectronics reliability, 2003. Vol. 43, pp. 225-233.
7. **Brosselard, P. et Planson, D.** Conception d'un transistor JFET 5kW en SiC-4H. EPF, Toulouse : s.n., 2004.
8. **Allard, B.** L'electronique de puissance : bases, perspectives et guide de lecture. 2006. Vol. D3060, pg 1-10, pp. 1-10.
9. **Tournier, D.** Composants de puissance SiC : technologie. Techniques de l'ingénieur, 2007. Vol. D3120, pg 1-9, pp. 1-9.
10. **Civrac, G.** Vers la realisation de composants haute tension, forte puissance sur diamant CVD, developpement des technologies associees. Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2009.
11. **Pearton, S.J. et al., et.** GaN : processing, defects and devices. Journal of applied physics, 1999. Vol. 86, pp. 1-78.
12. **Zelmat, S.** Etude des proprietes electriques d'un materiau polyimide a haute temperature : applications a la passivation de composants de puissance en carbure de silicium. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2006.
13. Insulated metal substrate copper clads and pre-preg. <http://www.aitechnology.com/>.
14. Thermal materials. [En ligne] The Berquist company. www.bergquistcompany.com.
15. Curamik ceramic substrates. www.curamik.com.
16. **Ménager, L.** Contribution à l'intégration des convertisseurs de puissance en 3D. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2008.

17. **Woïrgard, E.** Contribution a l'etude d'une integration hybride adaptee a l'electronique automobile. Thèse de doctorat, Universite de Bordeaux, 1992.
18. **Sheng, W.W. et Colino, R.P.** Power elcetronics modules : design and manufacture. CRC press, 2005.
19. **Asai, S. et Funaki, H.** Fabrication of an insulated metal substrate having an insulating layer with a high dielectric constant. IEEE transactions on components, hybrids and manufacturing technology1993. Vol. 16, pg 499-504, pp. 499-504.
20. **Godbold, C.V., Sankaran, V.A. et Hudgins, J.L.** Thermal analysis of high power modules. IEEE transactions on power electronics, 2001. Vol. 12, pg 3-11, pp. 3-11.
21. **Savrun, E.** Packaging considerations for very high temperature microsystems. IEEE sensors, 2002. Vol. 2, pg 1139-1143, pp. 1139-1143.
22. **Dupont, L.** Contribution a l'etude de la duree de vie des assemblages de puissance dans des environnements haute temperature et avec des cycles thermiques de grande amplitude. These de doctorat, ENS Cachan, 2006.
23. **Dupont, L., Lefebvre, S. et Khatir, Z.** Evaluation of substrate technologies under high temperature cycling. IEEE international conference on integrated power systems, 2006.
24. **Ciappa, Mauro.** Selected failure mechanisms of modern power modules. Microelectronics reliability, 2002. pp. 1-15.
25. **Schultz-Harder, J.** Ceramic substrates and micro channel cooler. Nuremberg : s.n., ECPE, 2006.
26. **Harris, J.H.** Sintered aluminim nitride ceramics for high-power electronic applications. Journal of the minerals metals and materials society, 1998. Vol. 50, pg 56-60, pp. 56-60.
27. Kyocera SieN4 AMB products. [En ligne] Kyocera corporation, 2005. www.kyocera.com.
28. **Reicher, R., Smetan, W. et Schuster, J.** A fritless copper conductor system for power electronic applications. Microelectronics reliability, 2001. Vol. 41.
29. **Lindemann, A. et Strauch, G.** Properties of direct bonded aluminium substrates for power semiconductor components. IEEE power electronics specialists conference, 2004.
30. **Occhionero, M.A., Adams, R. et Fenessy, K.** A new substrate for electronics packaging : aluminium-silicon carbide (AlSiC) composites. Santa Clara : s.n., Annual portable by design conference, 1997.
31. **Bienvenu, Y.** Assemblage par diffusion (soudage ou brasage). Techniques de l'ingénieur, 2010.

32. **Manikan, V.R. et Cheong, K.Y.** Die attach materials for high temperature applications. IEEE transactions 2011. Vol. 1, pg 457-478, pp. 457-478.
33. **Poupon, G.** Remplacement du plomb dans les alliages de soudure en microelectronique. CEA-LETI www.sans-plomb.org.
34. **Roche, J.F. et Allard, B.** Definition d'un dissipateur thermique en milieu industriel. Techniques de l'ingenieur, 2002. Vol. D3117.
35. **Hamidi, A., Beck, N. et Thomas, K.** Reliability and lifetime evaluation of different wire bonding technologies for high power IGBT modules. Microelectronics reliability, 1999. Vol. 39, pg 1153-1158, pp. 1153-1158.
36. **Wen, S.** Design and analysis of a dimple array interconnect technique for power electronics packaing. Ph.D. dissertation, Virginia polytechnic institute, 2002.
37. **Luechinger, C.** Large aluminum ribbon bonding : an alternative interconnect solution for power module applications. Long Beach : s.n., International symposium on microelectronics, 2004.
38. <http://www.mitsubishichips.com>. [En ligne]
39. **Leclercq, J.** Electronique de puissance - Elements de technologie. Techniques de l'ingenieur. Vol. D3220.
40. **Lebey, T., et al., et al.** A new method to detect partial discharges in high voltage power modules. IEEE European power electronics conference, 2003.
41. **Abtew, Mulugeta et Selvaduray, Guna.** Lead-free solders in microelectronics. Materials science ad engineering, 2000. Vol. 27.
42. **Favre, I. et Woirgard, E.** Etat de l'art et expertise technico-économique des modules de puissance existants.
43. **Siewert, T. et al., et.** Database for solder properties with emphasis on new lead-free solders. 11 Février 2002.
44. **Grusd, Angela.** Lead free solders in electronics. West Conshohocken, PA : s.n.
45. **Lee, H.T. et al., et.** Reliability of Sn-Ag-Sb lead-free solder joints. Materials science and engineering, 2005.
46. **Sommadossi, Silvana Andrea.** Investigation on diffusion soldering in Cu/In/cu and Cu/In-48Sn/Cu systems. Stuttgart : s.n., 2002.
47. **Guo, Z. et al., et.** Modeling material properties of lead-free solder alloys. Journal of electronic materials, 2007. Vol. 37.

48. **Lalena, J.N., Dean, N.F. et Weiser, M.W.** Experimental investigation of Ge-doped Bi-11Ag as a new Pb-free solder alloy for power die attachment. *Journal of electronic materials*, 2002. Vol. 31.
49. **Luan, Q.H. et al., et.** Nano copper wires interconnection for three-dimensional integration in power electronic. *Power electronics specialists conference*, 2008.
50. **Gao, F. et Takemoto, T.** Mechanical properties evolution of Sn-3.5Ag based lead-free solders by nanoindentation. *Materials letters*, 2006.
51. **Zhao, J. et al., et.** Fatigue crack growth behavior in 63Sn-37Pb and 95Pb-5Sn solder materials. *Journal of electronics materials*, 2001. Vol. 30.
52. **Carabello, C.M.** Lead-free solder - New methodology and perception. Selangor, Malaysia : s.n.
53. **Xu-jun.** Study of Sn-Bi-Cu lead-free solder. *IEEE, 10th electronics packaging technology conference*, 2008.
54. **Chidambaram, Vivek, Hattel, Jesper et Hald, John.** High-temperature lead-free solder alternatives. *Microelectronic Engineering*, 2011.
55. **Luan, Quoc Hung.** Etude et mise en oeuvre de techniques d'assemblages hybrides pour l'intégration tridimensionnelle en électronique de puissance. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
56. 5/95 Solder (95Pb-5Sn), UNS L54320 .
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=e256317852084a148c4a0a2c672bf0fe&ckck=1>.
57. **Amro, R.** Packaging and interconnection technologies of power devices, challenges and future trends. *World academy of science, Engineering and technology*, 2009.
58. **Geim, A.K.** Microfabricated adhesive mimicking Gecko foot-hair. *Nature material*, 2003.
59. **Autumn, K.** Evidence for Van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2002. Vol. 99, pg 12252-12256, pp. 12252 - 12256.
60. —. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature material*, 2000.
61. **Berber, S., Kwon, Y.K. et Tomanek, D.** Bonding and energy dissipation in a nanohook assembly. *Physical review letters*, 2003. Vol. 91, 16.
62. **Yung, K.P., Wei, J. et Tay, B.K.** Formation and assembly of carbon nanotube bumps for interconnection applications. *Diamond and related materials*, 2009.
63. **Lau, K.T., Lu, M. et Hui, D.** Coiled carbon nanotubes : synthesis and their potential applications in advanced composite structures. *Composites Part B : Engineering*, 2006.

64. **Basavanhally, N.H., Cirelli, R.A et Lopez, O.D.** High density nanostructured interconnection. Octobre Brevet européen, 2005.
65. **Van-Hai, N.** Nouvelle connectique adaptée à l'intégration 3D dans l'électronique de puissance. Toulouse : s.n., Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
66. **Mir, I. et Kumar, D.** Recent advances in isotropic conductive adhesives for electronics packaging applications. International journal of adhesion and adhesives, 2008. Vol. 28.
67. **Tiziani, R., Passoni, G. et Santospirito, G.** Adhesive die attach for power application : performance and reliability in plastic package. Microelectronics reliability, 2002. Vol. 42.
68. **Zhang, Z.** Processing and characterization of microscale and nanoscale silver paste for power semiconductor device attachment. Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Intitute (USA), 2005.
69. **Li, Y. et Wong, C.P.** Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging : Materials, processing, reliability and applications. Materials science and engineering, 2006.
70. **Kisiel, R. et Szczepanski, Z.** Die-attachment solutions for SiC power devices. Microelectronics reliability, 2009. Vol. 49.
71. **Bernstein, L.** Semi-conductor joining by solid liquid interdiffusion (SLID) process. Journal of applied physics, 1966. Vol. 113, pp. 1282-1288.
72. **Hotl, J.B. et Dunmead, D.** Self-heating synthesis of materials. Annual review of materials science, 1991. Vol. 21, pg 305-334, pp. 305-334.
73. **Duvall, D.S., Owczarski, A.W. et Paulonis, D.F.** TLP bonding : a new method for joining heating resisting alloys. Welding journal, 1974. Vol. 53, pp. 203-214.
74. **McDonald, W.D. et Eagar, T.W.** Transient liquid-phase bonding. Annual review of materials science, 1992. Vol. 22, pg 23-46, pp. 23-46.
75. **Mustain, H.A., Brown, W.D. et Ang, S.S.** Transient liquid phase die attach for high-temperature solicon carbide power devices. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2010. Vol. 33.
76. **Gale, W.F. et Butts, D.A.** Transient liquid phase bonding. Science and technology of welding and joining, 2004. Vol. 9, pg 283-300, pp. 283-300.
77. **Guth, K. et al., et.** New assembly and interconnects beyond sintering methods. PCIM, Nuremberg, 2010.
78. **Lugscheider, E., Bobzin, K. et Lake, M.K.** Deposition of solder for micro-joining on MEMS components by means of magnetron sputtering. Surface and coatings technology, 2001. Vol. 142, pg 813-816, pp. 813-816.

79. **Owczarski, W.A.** Eutectic brazing of zircaloy 2 to type 204 stainless steel. *Welding journal*, 1962. Vol. 42, pg 78-83, pp. 78-83.
80. **Schwarzbauer, H. et Kuhnert, R.** Novel large area joining technique for improved power device performance. *IEEE Transactions on industry applications*, 1991. Vol. 27.
81. **Göbl, C.** Sinter technology enhances power module robustness. 1 Octobre *Power electronics technology*, 2009.
82. **Scheuermann, U.** Power module design without solder interfaces - an ideal solution for hybrid vehicle traction application. *APEC*, 2009.
83. **Kang, Suk-Joong L.** Sintering: densification, grain growth and microstructure. Elsevier, 2005.
84. **Bernache-Assollant, Didier et Bonnet, Jean-Pierre.** Frittage : aspects physico-chimiques. *Techniques de l'ingénieur*, 2005.
85. **Abdizadeh, H.** Elaboration et caractérisation de composites duplex "composites tri-couches à base d'alumine. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1997.
86. **Agniel, Y.** Rôle des propriétés des granules pour la fabrication de pièces de poudres céramiques sans défaut de compaction. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1992.
87. **Lange, F.F. et Hirlinger, M.N.** Hindrance of grain-growth in Al₂O₃ by ZrO₂ inclusions. *Journal of the american ceramic society*, 1984. Vol. 67, pg 164-168, pp. 164-168.
88. **Hausonne, J.M. et al., et.** Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration. Presses polytechniques et universitaires romandes, *Traité des matériaux* numéro 16.
89. **Göbl, C., Beckedahl, P. et Braml, H.** Low temperature sinter technology die attachment for automotive power electronic applications. *Automotive power electronics*, Paris, 2006.
90. **Amro, R. et al., et.** Double-sided low-temperature joining technique for power cycling capability at high temperature. *EPE*, Dresden, 2005.
91. **Zhang, Z. et Lu, G.Q.** Pressure-assisted low-temperature sintering of silver paste as an alternative die-attach solution to solder reflow. *IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing*, 2002. Vol. 25.
92. **Kock, M., Eisele, R. et Rudzki, J.** Pressure sintering for power modules. *PCIM*, Nuremberg, 2007.
93. **McCluskey, F.P.** Reliability of high temperature solder alternatives. *Microelectronics reliability*, 2006. Vol. 46.
94. **Schmitt, W.** Novel silver contact paste lead free solutions for die attach. *PCIM*, Nuremberg, 2010.
95. mAgic sinter products. www.heraeus.com, 2013.

96. **Lu, G. et al., et.** Low-temperature sintering of nanoscale silver paste for power chip attachment. Eurosime 2007.
97. **Aschenbrenner, S.F. et al., et.** Development of a nano structure based interconnection technology. Nanotech in Northern Europe, 2006.
98. **Wakuda, D., Kim, K.S. et Suganuma, K.** Ag nanoparticle paste synthesis for room temperature bonding. IEEE Transactions on components and packaging technologies, 2010. Vol. 33.
99. **Murray, A.J. et al., et.** Sintering of silver nanoparticles for the formation of high temperature interconnect joints. Materials research society, 2006.
100. **Albert, A. et al., et.** Low temperature, pressure-assisted sintering of nanoparticulate silver films. Actu materials Inc., 2007.
101. **Zheng, H. et al., et.** Low-pressure (<5 MPa) low-temperature joining of large-area chips on copper using nanosilver paste. CIPS, Nuremberg, 2012.
102. **Bai, G.** Low-temperature sintering of nanoscale silver paste for semiconductor device interconnection. Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute (USA), 2005.
103. **Bai, J.G. et al., et.** Low-temperature sintered nanoscale silver as a novel semiconductor device-mettalized substrate interconnect material. IEEE, 2005.
104. **Lu, G.Q. et al., et.** Low-temperature and pressureless sintering technology for high-performance and high temperature interconnection of semiconductor devices. Eurosime, London, 2007 : s.n.
105. **Bai, J. et Lu, G.Q.** Thermomechanical reliability of low-temperature sintered silver die attached SiC power device assembly. IEEE Transactions on device and materials reliability, 2006. Vol. 6.
106. **Kuramoto, M. et al., et.** New silver paste for die-attaching ceramic light-emitting diode packages. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing, 2011.
107. **Lei, T. et al., et.** Low-temperature sintering of nanoscale silver paste for attaching large-area (>100 mm²) chips. IEEE Transactions on components and packaging technology, 2010. Vol. 33.
108. **Shammas, N.Y.A.** Present problems of power module packaging technology. Microelectronics reliability, 2003. pp. 1-9.
109. **Ye, Hua, Lin, Minghui et Basaran, Cemal.** Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging. Finite elements in analysis and design, 2001.
110. **De Lambily, H. et Keser, H.O.** Failure analysis of power modules : a look at the packaging and reliability of large IGBT's. IEEE Transactions on components and hybrids manufacturing technology, 1993. pp. 412-417.

111. **Pietranico, S. et al., et.** Thermal fatigue and failure of electronic power substrates. International journal of fatigue, 2009. pp. 1-6.
112. **Erinc, M., Schreurs, P.J.G. et Geers, M.G.D.** Intergranular thermal fatigue damage evolution in SnAgCu lead-free solder. Mechanics of materials, 2008. pp. 1-4.
113. **Erinc, M. et al., et.** Integrated numerical-experimental analysis of interfacial fatigue fracture in SnAgCu solder joints. Welding journal, 2007. Vol. pg 5680-5694.
114. **Martin, A. et al., et.** Correlation between thermal fatigue and thermal anisotropy in a Pb-free solder alloy. Scripta materiala, 2005.
115. **Subramanian, K.N. et Lee, J.G.** Effect of anisotropy of tin on thermomechanical behavior of solder joints. Journal of material science, 2004. Vol. pg 235-240, pp. 235-240.
116. **De Vries, J., Jansen, M. et Van Driel, W.** The effect of board stiffness on the solder-joint reliability of HVGFN-packages. Eurosime, 2007.
117. **Lu, Hua et al., et.** Design for reliability of power electronics modules. Microelectronics reliability, 2009.
118. **Plumbridge, W.J.** New avenues for failure analysis. Engineering failure analysis, 2009. pp. 1-8.
119. **Gekenidis, S., Ramezani, E. et Zeller, H.** Explosion tests on IGBT high voltage modules. The international symposium on power semiconductor devices and ICs, 1999.
120. **Zeller, H.R.** Cosmic ray induced failures in high power semiconductor devices. Microelectronics reliability, 1997. Vol. 37, pg 1711-1718, pp. 1711-1718.
121. **McCluskey, F.P.** Reliability of high temperature solder alternatives. Microelectronics reliability, 2004.
122. Metaux precieux. Octobre <http://www.metaux-precieux.fr>, 2013.
123. Bergquist thermal materials. http://www.bergquistcompany.com/thermal_materials.
124. **Chin, H.S., Cheong, K.Y. et Ismail, A.B.** A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices. Metallurgical and material transactions, 2010. Vol. 41B, pg 824-832, pp. 824 - 832.
125. **Gracia, A.** Contribution a la conception thermomecanique optimisee d'assemblage sans plomb. Thèse de doctorat, Universite de Bordeaux 1, 2005.
126. **Yu, D. et al., et.** Applying Anand model to low-temperature sintered nanoscale silver paste chip attachment. Material and design, 2009. Vol. 30, pg 4574-4579, pp. 4574-4579.
127. *Impact of ball via configuration on solder joint reliability in tape based chip-scale packages.* **Zahn, B.A.** 2002, Proceeding of the 52nd electronic components and technology conference.

128. Electrolube . <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/008f/0900766b8008f25f.pdf>.
129. **Thebaud, J.M et al., et.** Strategy for designing accelerated aging tests to evaluate IGBT power module lifetime in real operation mode. IEEE Transactions on components and packaging technologies, 2003. Vol. 26.
130. **Brown, S., Anand, L. et Kim, K.H.** An internal variable constitutive model for hot working of metal. International journal of plasticity, 1989. Vol. 5.
131. **Plassais, A.** Nanoporosite, texture et proprietes mecaniques de pates de ciments. These universitaire, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 2003.
132. **Gillot, C. et al., et.** Double-sided cooling for high power IGBT modules using flip chip technology. IEE Transactions on components and packaging technologies, 2001.
133. **Zheng, H. et al., et.** Low-pressure (<5 MPa) low-temperature joining of large-area chips on copper using nanosilver paste. CIPS, Nuremberg, 2012.

Contribution à l'étude, la mise en œuvre et à l'évaluation d'une solution de report de puce de puissance par procédé de frittage de pâte d'argent à haute pression et basse température

Résumé

Ces travaux s'intègrent dans la recherche de solutions alternatives aux alliages de brasure pour les assemblages de puissance. De par les propriétés intrinsèques de l'argent et les premiers travaux publiés, le frittage de pâte d'argent a été sélectionné comme technique d'assemblage pour être étudiée et évaluée. Après avoir effectué un état de l'art sur la structure d'un module de puissance, sur les différentes techniques d'assemblage, la fiabilité des assemblages et le frittage, différents essais ont été menés en partenariat avec les projets FIDEA et ASPEEC. Ils nous ont permis de définir des procédés d'assemblages, de caractériser thermiquement et mécaniquement les assemblages frittés et d'évaluer la fiabilité de ces assemblages par des essais expérimentaux et des simulations numériques. Ces travaux nous ont permis au final de réaliser un prototype d'assemblage double face fonctionnel aux propriétés thermomécaniques supérieures à celles d'un assemblage brasé.

Mots clés : assemblages de puissance, fiabilité, packaging, frittage de pâte d'argent, techniques d'assemblages sans plomb, RoHS, modélisations par éléments finis, évaluation de la durée de vie.

Contribution to the study, the processing and the evaluation of a power semiconductor device attachment solution: silver sintering technology at high pressure and low temperature

Abstract

This work is part of the research for lead-free die-attach solutions for power modules to offer a solution to the European directive RoHS, which banishes lead in electrical and electronic equipments. The intrinsic silver properties and the previous work published helped us choose silver sintering as the die-attach technology to be tested and evaluated in our work. After a state of the art on power module structure, on different die-attach technologies and on power module reliability, various works have been carried out in collaboration with the FIDEA and ASPEEC projects. Through experimental tests and finite element modeling analysis (FEM), die-attach processes have been defined, thermal and mechanical characterizations and reliability assessment of silver sintered power modules have been done. Finally, a silver sintered rectifier bridge double side assembly with higher thermomechanical properties than a lead-solder die-attach assembly was developed as final prototype.

Keywords: power module, reliability, packaging, silver paste sintering technology, lead-free die-attach technology, RoHS, FEM analysis, lifetime evaluation.